

# **Chapitre 3**

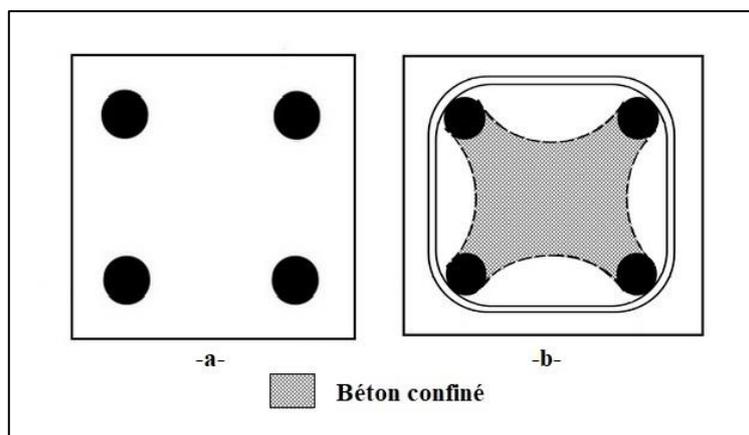
## **COMPORTEMENT DU BETON SOUS L'EFFET DU CONFINEMENT**

### 3.1. INTRODUCTION

Afin de prédire le comportement d'un élément en béton armé confiné, il faut tout d'abord connaître bien le comportement des matériaux constituants (acier et béton confiné). D'ici, la connaissance du comportement de ces deux matériaux constituants est indispensable. Le contenu de ce chapitre surligne le comportement d'un béton armé confiné, dans un premier lieu, on doit définir c'est quoi le confinement d'un béton armé, ensuite, on cite les différents types de confinement. Dans le second lieu, les différentes lois de comportement d'un béton sous l'effet du confinement sont présentées, à savoir : Kent et Park (1971), Kent et Park (1971) modifiée, Sheikh et Uzumeri (1982), Mander et *al.* (1988), Cusson et Paultre 1995, Attard et Setunge (1996), Eurocode 2 (EN 1992, 2004), Samani et Attard (2012), et Piscesa et *al.* (2017).

### 3.2. Confinement du béton

Dans la pratique, le béton peut être confiné par les armatures transversales, ceci par l'utilisation des cadres, épingles et étriers... (Park et Paulay 1975 ; Hachemi 2004). Le béton devient confiné lorsque la résistance du noyau est supérieure à celle du béton hors noyau (non-confiné). La figure 3.1 montre la différence entre une section confinée et l'autre non confinée, où l'armature transversale forme une zone sous un confinement (3.1b).



*Figure 3.1 : Confinement du béton*

Sous la pression latérale due au confinement (figure 3.2), un changement radical sur le comportement du béton est produit, où des contraintes et des déformations plus élevées sont atteintes.

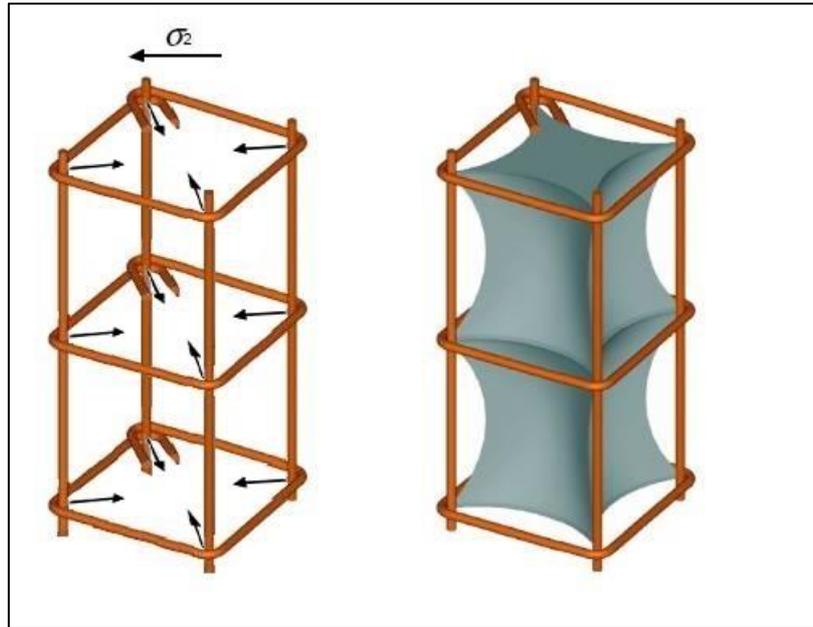


Figure 3.2 : Pression latérale (Paultre et Légéron (2008)).

### 3.3. Types de confinement du béton

On distingue deux types différents de confinement passif et actif.

#### 3.3.1. Confinement passif

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

#### 3.3.2. Confinement actif

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

### 3.4. Paramètres influant le confinement du béton

La réponse post-pic du béton confiné dépend de plusieurs paramètres, dont les plus importants sont (Paultre (2011) ; Park et Paulay (1975) ; Cusson et Paultre (1995)) :

- La résistance en compression du béton ;
- La limite élastique des armatures transversales ;

- La configuration des armatures transversales et longitudinales ;
- Le taux en volume d'armatures transversales (diamètre, espacement) ;
- Le diamètre de l'armatures transversale.

### 3.5. Lois de comportement du béton confiné

La différence de comportement entre un béton confiné et non confiné apparait lorsque la contrainte dans le béton s'approche de la résistance maximum du béton non confiné (Figure 3.3) (Paultre (2011)). Nous présentons dans cette section des modèles qui tient compte de l'effet du confinement passif et actif.

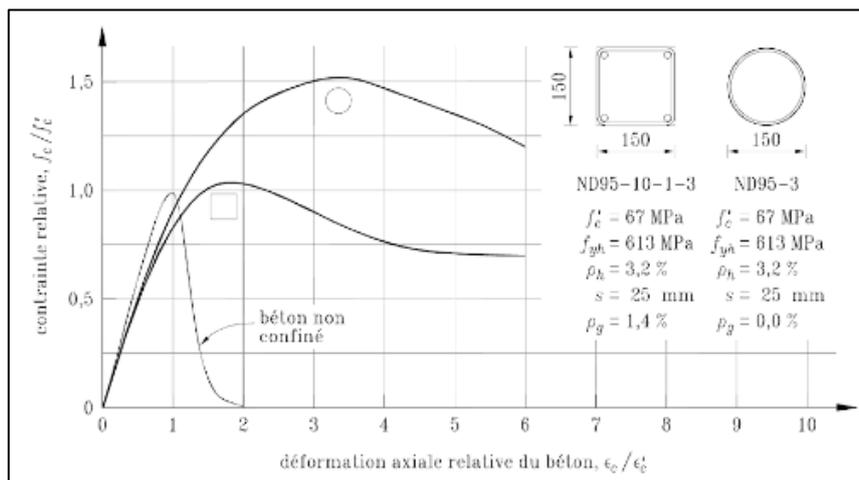


Figure 3.3 : Comparaison entre le comportement d'un béton confiné et non confiné (Paultre (2011)).

#### 3.5.1. Lois de comportement de Kent et Park 1971

Basant sur les résultats expérimentaux des poteaux carrés avec des résistances de béton jusqu'à 60 MPa et confinés à l'aide des cadres transversaux, Kent et Park (1971) ont proposé un simple modèle contrainte-déformation ( $f-\epsilon$ ) applicable pour un béton confiné. Dans ce modèle, les auteurs ont considéré que l'effet de confinement pourra influencer la phase plastique seulement, la figure (3.4) et les équations suivantes illustrent bien ce modèle :

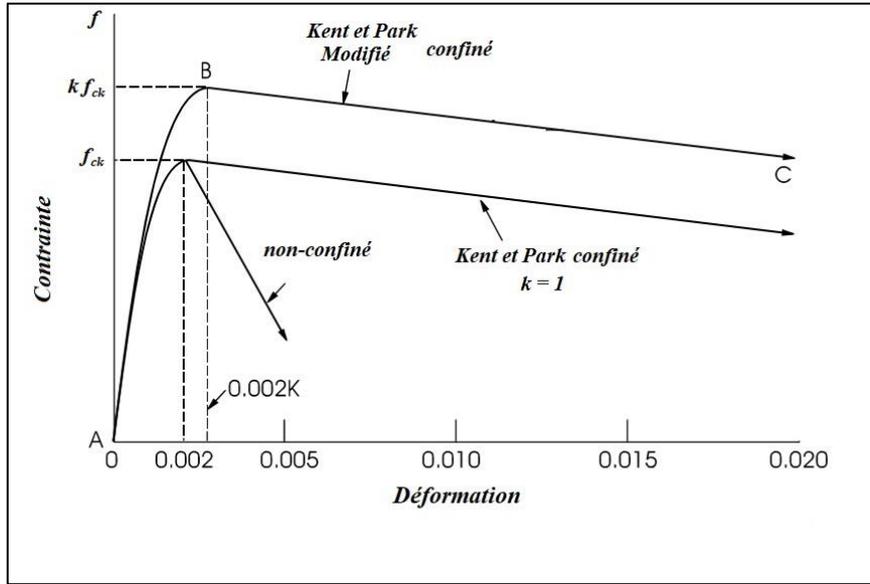


Figure 3.4 : Modèles contrainte-déformation de Kent et Park (1971) et Kent et Park modifié.

La partie ascendante : (Parabole) :

$$f_c = f'_c * \left[ \frac{2 * \varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) \right]^2 \quad (3.1)$$

La partie descendante :

$$f_c = f'_c * [1 - z_m(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad (3.2)$$

Où ;

$f'_c$  est contrainte de calcul de béton et  $\varepsilon_0$  est la déformation à la fin de la phase élastique du béton.

$$z_m = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_0} \quad (3.3)$$

$\varepsilon_{50u}$  est la déformation correspondante à  $0.5 f'_c$  pour un béton non confiné :

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.002 * f'_c}{f'_c - 1000} \quad (3.4)$$

Et :

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} * \rho_s \sqrt{b''/s} \quad (3.5)$$

$\rho_s$  est le rapport de l'aire du cadre sur l'aire du béton :

$$\rho_s = \frac{A_{cadre}}{A_{béton}} \quad (3.6)$$

$f_{yh}$  est la limite élastique des cadres,  $b''$  est la largeur de la zone confinée,  $s$  est l'espacement entre les cadres.

### 3.5.2. Lois de comportement Kent et Park (Modifiée)

Le modèle de confinement publié par Kent et Park en (1971) a été basé sur les tests des poteaux carrés avec quatre barres en coins et reliées par des cadres carrés. Ultérieurement, ce modèle est modifié par Scott et al (1982) et Park et al (1982) pour inclure un facteur d'amélioration ( $K$ ). Le nouveau modèle est décrit dans la figure 3.4 et les équations suivantes

La partie ascendante : (Parabole) :

$$f_c = k * f'_c * \left[ \frac{2 * \varepsilon_c}{.002k} - \left( \frac{\varepsilon_c}{.002k} \right) \right]^2 \quad (3.7)$$

La partie descendante :

$$f_c = k * f'_c * [1 - z_m(\varepsilon_c - .002k)] \geq 0.2 * k * f'_c \quad (3.8)$$

Où ;

$$k = 1 + \frac{\rho_s * f_{yh}}{f'_c} \quad (3.9)$$

$$z_m = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_0} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{0.3 + 0.29 * f'_c}{145 * f'_c - 1000} \quad (3.11)$$

### 3.5.3. Lois de comportement de Sheikh et Uzumeri 1982

Ceci était le premier modèle qui a considéré l'influence de la disposition des armatures longitudinales et la méthode de configuration des cadres transversaux sur la pression latérale. Les auteurs suggèrent un facteur d'amélioration ( $Ks$ ), qui dépendant du taux et de la limite élastique des armatures transversales. Ce modèle est décrit par la figure 3.5 et les équations suivantes :

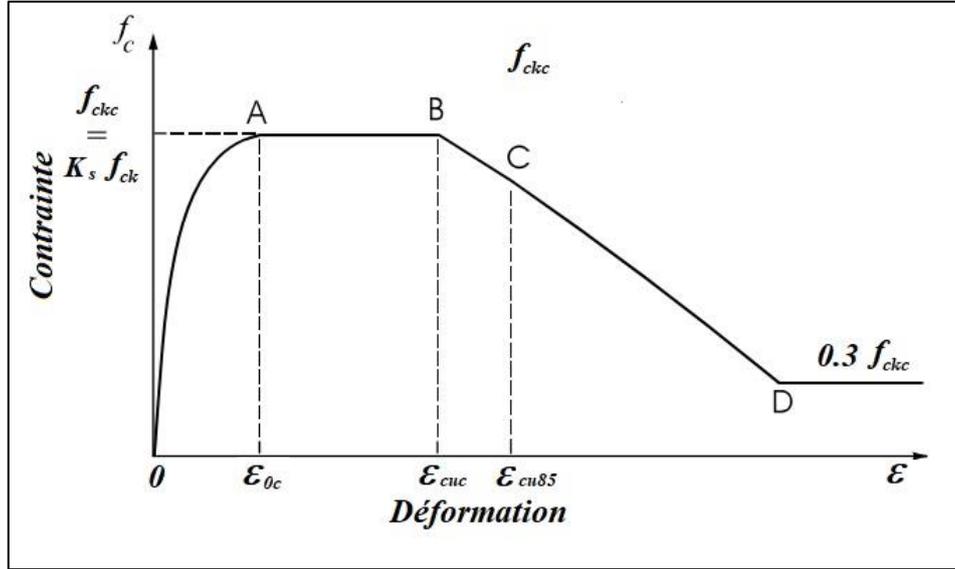


Figure 3.5 : Modèle contrainte-déformation de Sheikh et Uzumeri (1982).

La partie pré-maximale (parabolique),  $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{0c}$

$$f_c = f_{ckc} * \left[ \frac{2 * \varepsilon_c}{K_s * \varepsilon_{s1}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{K_s * \varepsilon_{s1}} \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

La réponse Post-maximale ( $\varepsilon_c > \varepsilon_{0c}$ )

$$f_c = f_{ckc} * \left[ 1 - \frac{0.15 * (\varepsilon_c - \varepsilon_{s2})}{(\varepsilon_{s85} - \varepsilon_{s1})} \right] \geq 0.3 * f_{ckc} \quad (3.13)$$

Où,  $f_{ckc}$  est la résistance du béton confiné :

$$f_{ckc} = K_s * f_{ck} \quad (3.14)$$

Avec :

$f_{ck}$  est la résistance du béton non confiné.

$$k_s = 1 + \frac{2.73 * B^2}{P_{occ}} * \left[ \left( 1 - \frac{n * c^2}{5.5 * B^2} \right) * \left( 1 - \frac{s}{2 * B} \right)^2 \right] * \sqrt{\rho_s * f_{yh}} \quad (3.15)$$

Avec :

$$P_{occ} = 0.85 * f_{ck} * (B^2 - A_s) \quad (3.16)$$

$B$  est la largeur de la zone confinée,  $C$  est distance entre les barres longitudinales,  $n$  est le nombre des barres longitudinales,  $s$  est l'espacement entre les cadres transversaux,  $\rho_s$  est le rapport volumique des armatures transversales,  $f_{yh}$  est la limite élastique des armatures transversales.

Les déformations du béton confiné sont données comme suit :

La déformation à la fin de la phase élastique :

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0 * k_s \quad (3.17)$$

La déformation ultime :

$$\frac{\varepsilon_{cuc}}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{248}{c} * (1 - 5(S/B)^2) * \frac{\rho_s * f'_s}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (3.18)$$

La déformation à la rupture :

$$\varepsilon_{s85} = 0.22 * \rho_s * \sqrt{B/S} + \varepsilon_{cuc} \quad (3.19)$$

Avec :

$f'_s$  est la contrainte dans les armature transversales.

#### 3.5.4. Lois de comportement de Mander, Priestely et Park 1988

Ce modèle de confinement est capable de prédire les avantages de confinement dans les poteaux circulaires ou rectangulaires sous un chargement cyclique ou monotonique. Pour tenir compte de l'observation expérimentale que toute la section du béton ( $A_c$ ) n'est pas effectivement confinée, les auteurs réduisent la pression de confinement latérale ( $f_l$ ) par le coefficient ( $K_e$ ), comme décrit dans les équations suivantes :

$$f'_l = k_e * f_l \quad (3.20)$$

$$k_e = A_e/A_c \quad (3.21)$$

Avec :

$f'_l$  est la pression de confinement latérale effective ;

$A_e$  est la section de béton confinée effective.

Mander et *al.* (1988) ont pris une approche semblable à cela prise par Cheikh et Uzumeri (1982), où ils ont défini la région confinée en fonction de la configuration et de l'espacement entre les barres longitudinales et transversales. Les valeurs typiques pour le coefficient  $k_e$  sont 0.95 pour les poteaux circulaires confinées par des cerces, 0.75 pour les poteaux carrés, et 0.50 pour les voiles.

Basant sur l'expression originale d'un béton non confiné de Popovics (1973), Mander et al. (1988) ont proposé la relation contrainte-déformation ( $f_c$ - $\epsilon_c$ ) suivante :

$$\frac{f_c}{f_{ckc}} = \frac{(\epsilon_c/\epsilon_{0c})^n}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon_{0c})^n} \quad (3.22)$$

Avec :

$$n = \frac{E_c}{[E_c - (f_{ckc}/\epsilon_{0c})]} \quad (3.23)$$

Où ;

$E_c$  est le module élastique du béton ;

$f_{ckc}$  est la résistance du béton confiné ;

$\epsilon_{0c}$  est la déformation maximale du béton confiné, elle est donnée comme suit :

$$\epsilon_{0c} = \epsilon_0 (5 * f_{ckc}/f_{ck} - 4) \quad (3.24)$$

Avec :

$f_{ck}$  est la résistance du béton non confiné et  $\epsilon_0$  est la déformation maximale du béton non confiné.

La figure 3.6 présente le modèle contrainte-déformation proposé par Mander et al. (1988) :

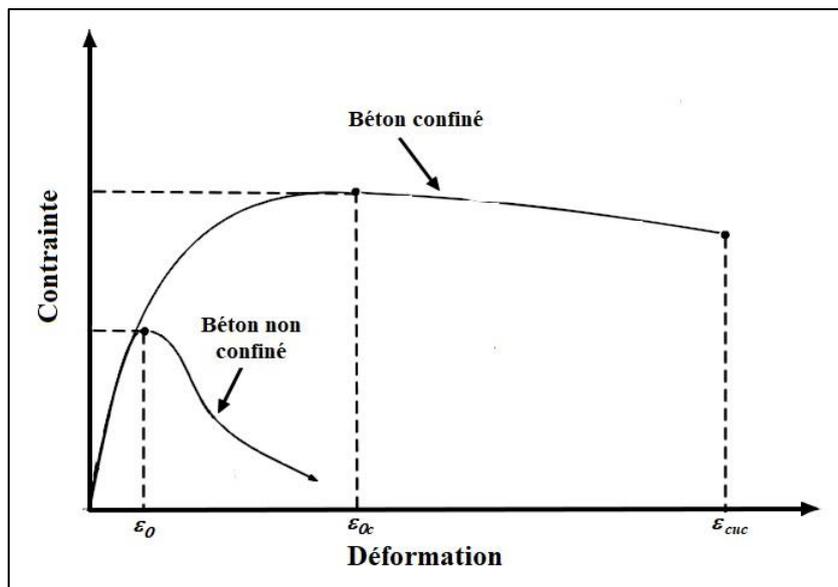


Figure 3.6 : Modèle contrainte-déformation de Mander et al. (1988).

### 3.5.5. Loïs de comportement de Cusson et Paultre 1995

Ce modèle de béton confiné est développé et calibré sur la base des résultats expérimentaux de cinquante poteaux de grandes dimensions en béton à haute performance testés sous un chargement centré. Les effets de la résistance en compression du béton, des limites élastiques des aciers utilisés, de la configuration des étriers, de la quantité volumétrique d'armatures latérales, de l'espacement des étriers et de la quantité d'armatures longitudinales sont considérés dans le modèle proposé. La figure 3.7 illustre la courbe analytique du modèle proposé.

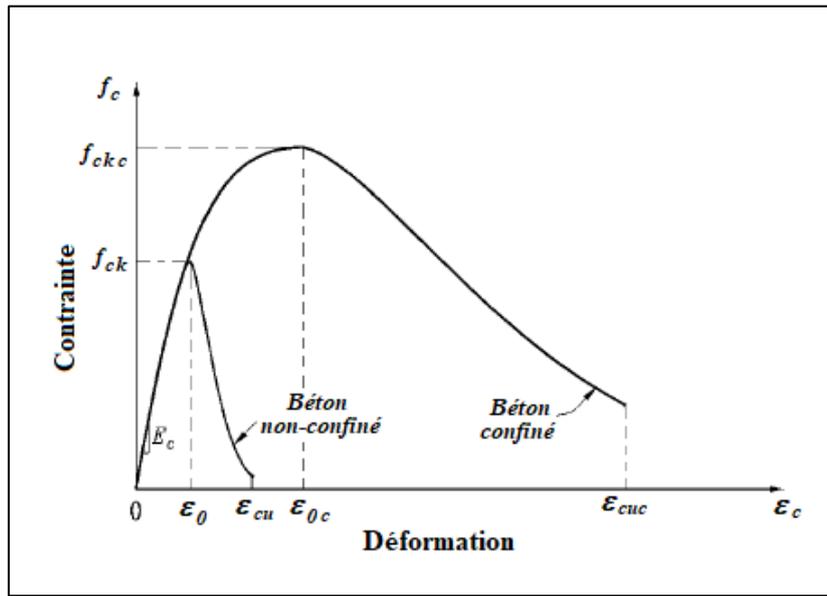


Figure 3.7 : Modèle contrainte-déformation de Cusson et Paultre (1995).

- La partie ascendante (OA) est une relation originale proposée par Popovic (1973), elle s'écrit :

$$f_c = f_{ckc} \left[ \frac{k_1(\varepsilon_c/\varepsilon_{0c})}{k-1+(\varepsilon_c/\varepsilon_{0c})^k} \right] \quad (3.25)$$

$$k = \frac{E_c}{E_c - (f_{ckc}/\varepsilon_{0c})} \quad (3.26)$$

Où :

$f_c$  et  $\varepsilon_c$  sont la contrainte et la déformation correspondante dans le béton ;

$f_{ckc}$  est la résistance du béton confiné à la compression :

$$f_{ckc} = f_{ck} \left( 1 + 2.1 \left( \frac{f_{le}}{f_{ck}} \right)^{0.7} \right) \quad (3.27)$$

Avec :

$f_{ck}$  est la résistance du béton non confiné à la compression,  $f_{le}$  est la pression de confinement effective.

$\varepsilon_{0c}$  est la déformation à la fin de la phase élastique du béton confiné :

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0 + 0.21 \left( \frac{f_{le}}{f_{ck}} \right)^{1.7} \quad (3.28)$$

$k$  est un facteur contrôlant la pente, et  $E_c$  est le module élastique du béton.

- La partie descendante (ABC) de la courbe contrainte-déformation est une modification de la relation proposée par Fafitis et Shah (1985) pour le béton confiné à hautes performances :

$$f_c = f_{ckc} \exp[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon_{0c})^{k_2}] \quad (3.29)$$

Avec :

$$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\varepsilon_{cuc} - \varepsilon_{0c})^{k_2}} \quad (3.30)$$

$$k_2 = 0.58 + 16 \left( \frac{f_{le}}{f_{co}} \right)^{1.4} \quad (3.31)$$

Où :

$\varepsilon_{cuc}$  est la déformation ultime du béton confiné :

$$\varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu} + 0.15 \left( \frac{f_{le}}{f_{ck}} \right)^{1.1} \quad (3.32)$$

Avec :

$\varepsilon_{cu}$  est la déformation ultime du béton non confiné.

Basant sur le même modèle de Cusson et Paultre (1995), Legeron et Paultre (2003) ont proposé des nouvelles formules pour la résistance et les déformations élastique et ultime et du béton confiné. Elles deviennent comme suit :

La résistance du béton confiné à la compression ( $f_{ckc}$ ) :

$$f_{ckc} = f_{ck}(1 + 2.4(I'_e)^{0.7}) \quad (3.33)$$

Où ;

$I'_e$  est l'indice de confinement effectif évalué au pic de la courbe.

La déformation à la fin de la phase élastique du béton confiné ( $\varepsilon_{0c}$ ) :

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0(1 + 35(I'_e)^{1.2}) \quad (3.34)$$

La déformation ultime du béton confiné ( $\varepsilon_{cuc}$ ) :

$$\varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu}(1 + 60I_{e50}) \quad (3.35)$$

Où ;

$I_{e50}$  est l'indice de confinement effectif évalué au  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cuc}$ .

### 3.5.6. Lois de comportement de Attard et Setunge 1996

Basant sur les résultats expérimentaux, Attard et Setunge (1996) ont proposé un modèle contrainte -déformation pour un béton à haute résistance confiné. Les poteaux testés ont des résistances de béton jusqu'à 130 MPa et une pression latérale (confinement) entre 1 et 20 MPa. La courbe contrainte déformation est présentée dans la figure 3.8.

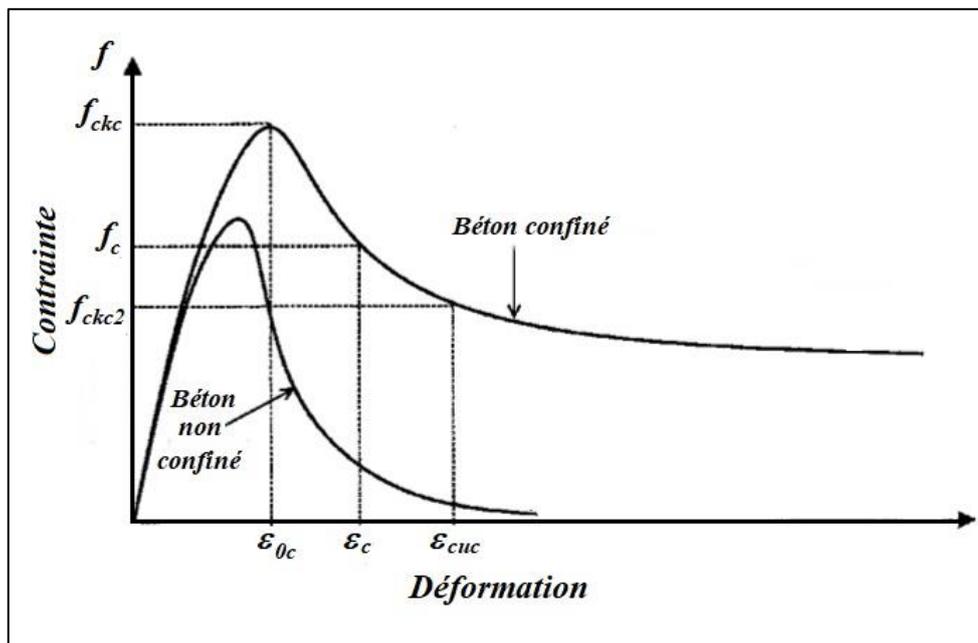


Figure 3.8 : Modèle contrainte-déformation de Attard et Setunge 1996.

La relation contrainte-déformation ( $f-\varepsilon$ ) est basée sur l'ancienne modèle de Sargin (1971), où ce dernier est donné comme suit :

$$Y = \frac{AX+BX^2}{1+CX+DX^2} \quad (3.36)$$

Avec :

$$Y = \frac{f_c}{f_{ckc}} \quad (3.37)$$

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0c}} \quad (3.38)$$

Où :  $f$  est la contrainte correspondante à la déformation  $\varepsilon$ ,  $f_{ckc}$  est la contrainte maximale correspondante à la déformation à la fin de la phase élastique  $\varepsilon_{0c}$  et  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont des constants.

1. Pour la partie ascendante les constants  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont donnés par :

$$A = \frac{E_{ti} \varepsilon_{0c}}{f_{ckc}} \quad (3.39)$$

$$B = \frac{(A-1)^2}{\alpha \left(1 - \frac{f'_{pl}}{f_{ckc}}\right)} + \frac{A^2(1-\alpha)}{\alpha^2 \frac{f_{pl}}{ckc} \left(1 - \frac{f_{pl}}{f_{ckc}}\right)} - 1 \quad (3.40)$$

$$C = (A - 2) \quad (3.41)$$

$$D = (B + 1) \quad (3.42)$$

Avec :

$$\alpha = E_{ii}/E_c \quad (3.43)$$

Où :

$E_{ii}$  est le module tangentiel initial correspondante à une contrainte nulle et  $E_c$  est le module tangentiel correspondante à une contrainte égale  $0.45f_{ck}$ .

2. Pour la partie descendante les constants  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont donnés par :

$$A = \left[ \frac{\varepsilon_{cuc} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0c}} \right] \left[ \frac{\varepsilon_{cuc} E_c}{(f_{ckc} - f_c)} - \frac{4\varepsilon_c E_{cuc}}{(f_{ckc} - f_{ckc2})} \right] \quad (3.44)$$

$$B = (\varepsilon_c - \varepsilon_{cuc}) \left[ \frac{E_c}{(f_{ckc} - f_c)} - \frac{4E_{cuc}}{(f_{ckc} - f_{ckc2})} \right] \quad (3.45)$$

$$C = A - 2 \quad (3.46)$$

$$D = B + 1 \quad (3.47)$$

Avec :

$$E_c = \frac{f_c}{\varepsilon_c} \quad \text{et} \quad E_{cuc} = \frac{f_{cuc}}{\varepsilon_{cuc}}$$

### 3.5.7. Lois de comportement de l'Eurocode 2

L'Eurocode 2 (EN 1992, 2004) fournit un modèle contrainte-déformation ( $\sigma_c$ - $\varepsilon_c$ ) pour un béton confiné similaire au béton non confiné (parabole-rectangle), avec un changement au niveau des contraintes et des déformations. Pour le dimensionnement des sections transversales d'un élément en béton armé non confiné, on utilise le diagramme contrainte-déformation du calcul illustré dans la figure 3.9 (A), caractérisé par les relations des contraintes et des déformations suivantes :

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] & \text{pour } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_{cd} & \text{pour } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (3.48)$$

Où :

$\varepsilon_c$  est la déformation résultante de la compression du béton ;

$n$  est un exposant qui prend les valeurs suivantes :

$$n = \begin{cases} 2 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.4 + 23.4 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3.49)$$

$\varepsilon_0$  est la déformation de compression du béton sous la contrainte maximale  $f_{ck}$  :

$$\varepsilon_0 (\text{‰}) = \begin{cases} 2 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2 + 0.085 (f_{ck} - 50)^{0.53} & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3.50)$$

$\varepsilon_{cu}$  est la déformation de compression ultime :

$$\varepsilon_{cu} (\text{‰}) = \begin{cases} 3.5 & \text{pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 2.6 + 35 \left( \frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 & \text{pour } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3.51)$$

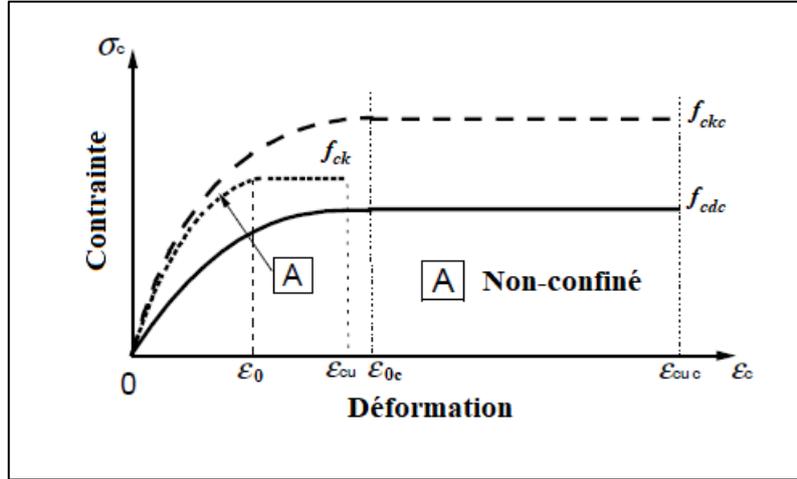


Figure 3.9 : Modèle contrainte-déformation de l'Eurocode 2 (EN 1992, 2004).

Les relations suivantes illustrent les nouvelles formules obtenues :

La résistance à l'intérieur des cadres  $f_{ckc}$  :

$$f_{ckc} = \begin{cases} f_{ck} \left( 1 + 5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) & \text{pour } \sigma_2 \leq 0.05 f_{ck} \\ f_{ck} \left( 1.125 + 2.5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) & \text{pour } \sigma_2 > 0.05 f_{ck} \end{cases} \quad (3.52)$$

La déformation à la fin de la phase élastique  $\varepsilon_{0c}$  :

$$\varepsilon_{0c} = \varepsilon_0 \left( \frac{f_{ckc}}{f_{ck}} \right)^2 \quad (3.53)$$

La déformation ultime  $\varepsilon_{cuc}$  :

$$\varepsilon_{cuc} = \varepsilon_{cu} + 0.2 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \quad (3.54)$$

### 3.5.8. Lois de comportement de Samani et Attard 2012

Basant sur des anciens modèles, Samani et Attard (2012) ont développé un modèle pour prédire le comportement d'un béton ordinaire et à haute résistance avec et sans confinement. Le modèle proposé est principalement basé sur le modèle de Attard et Setunge (1996), la formule de la contrainte  $f$  est donnée comme suit :

1. Pour la partie ascendante, quand  $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{0c}$  et  $0 \leq f \leq f_{ckc}$  :

$$\frac{f}{f_{ckc}} = \frac{AX + BX^2}{1 + (A-2)X + (B+1)X^2} \quad (3.55)$$

Avec :

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{0c}} \quad (3.56)$$

$f_{ckc}$  est la contrainte maximale correspondante à la déformation à la fin de la phase élastique  $\varepsilon_{0c}$  et les constants  $A$  et  $B$  sont définis comme celui de Attard et Setunge (1996).

2. Pour la partie descendante, quand  $\varepsilon \geq \varepsilon_{0c}$  :

$$\frac{f}{f_{ckc}} = \frac{f_{res}}{f_{ckc}} + \left(1 - \frac{f_{res}}{f_{ckc}}\right) \left(\frac{f_{ic}}{f_{ck}}\right)^{\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{0c}}{\varepsilon_c - \varepsilon_{0c}}\right)^2} \quad (3.57)$$

Avec :

$f_{ic}$  est donnée par la formule suivante :

$$\frac{f_{ic}}{f_{ck}} = 1.41 - \ln(f_{ck}) \quad (3.58)$$

$f_{res}$  est la contrainte résiduelle :

$$f_{res} = f_{ckc} \left(1 - \frac{1}{a \left(\frac{f_r}{f_{ck}}\right)^k + 1}\right) \quad (3.59)$$

Avec :

$$a = 795.7 - 3.391 f_{ck} \quad (3.60)$$

$$k = \left(5.79 \left(\frac{f_r}{f_{ck}}\right)^{0.694} + 1.301\right) \quad (3.61)$$

### 3.5.9. Lois de comportement de Piscesa et al. 2017

Piscesa et al. (2017) ont développé une nouvelle approche pour prédire le comportement du béton confiné. Le nouveau modèle proposé est basé sur l'étude de Menetrey et Willam (1995). La formule de la contrainte  $f_c$  est en fonction des trois coordonnées cylindriques de Haigh-Westergaard ( $\xi, \rho, \theta$ ) donnée comme suit :

$$f(\rho, \xi, \theta) = \left( \frac{\sqrt{1.5}}{f_{ck}q_h(k)} \right)^2 + m\alpha \left[ \frac{\rho}{\sqrt{6}f_{ck}q_h(k)} r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3}f_{ck}q_h(k)} \right] - q_s(k) \quad (3.62)$$

Où :

$f'_c$  est la résistance du béton à la compression,  $q_h(k)$ ,  $q_s(k)$  et  $r(\theta, e)$  sont les fonctions ascendante, descendante et elliptique du modèle proposé,  $m$  est le paramètre de frottement,  $\alpha$  est le paramètre conducteur de frottement et  $e$  est l'excentricité d'ovalisation.

### 3.6. CONCLUSION

A la lecture de ce chapitre, on peut dire que le confinement a une incidence favorable sur la performance du béton en améliorant leurs propriétés à savoir :

- La résistance du béton ;
- La déformation élastique ;
- La déformation et ultime ;
- La ductilité du béton (une phase plastique importante).