

**Annexe A**  
(informative)  
**Structures en béton armé**

## **A.1 Domaine d'application**

(1) La présente annexe contient les informations spécifiques relatives à l'évaluation des bâtiments en béton armé dans leur état actuel, et à leur mise à niveau, si nécessaire.

## **A.2 Identification de la géométrie, des dispositions constructives et des matériaux**

### **A.2.1 Généralités**

Il convient d'examiner les aspects suivants avec la plus grande attention :

- i. état physique des éléments en béton armé et présence de toute dégradation due à une carbonatation, une corrosion des armatures, etc.
- ii. continuité des descentes de charges entre les éléments de contreventement.

### **A.2.2 Géométrie**

(1) Il convient que les données recueillies comprennent les éléments suivants :

- i. Identification du système de contreventement dans chacune des deux directions,
- ii. Orientation des dalles de plancher portant dans une seule direction.
- iii. Hauteur et largeur des poutres, poteaux et murs.
- iv. Largeurs des semelles de poutres en T.
- v. Excentricités potentielles entre les axes des poutres et des poteaux au droit des nœuds.

### **A.2.3 Dispositions constructives**

(1) Il convient que les données recueillies comprennent les éléments suivants :

- i. Quantité d'armatures longitudinales dans les poutres, poteaux et murs.
- ii. Quantité et dispositions constructives des armatures de confinement dans les régions critiques et au niveau des nœuds poteau-poutre.
- iii. Quantité d'armatures dans les dalles de plancher contribuant au moment négatif de résistance à la flexion des poutres en T.
- iv. Longueurs d'assise et conditions d'appui des éléments horizontaux.
- v. Épaisseur d'enrobage en béton.
- vi. Longueurs de recouvrement des armatures longitudinales.

## A.2.4 Matériaux

(1) Il convient que les données recueillies comprennent les éléments suivants :

- i. Résistance du béton.
- ii. Limite d'élasticité, résistance et allongement à la rupture de l'acier.

## A.3 Modèles de capacité résistante pour la réévaluation

### A.3.1 Introduction

(1) Les dispositions du présent paragraphe s'appliquent à la fois aux éléments sismiques primaires et aux éléments sismiques secondaires.

(2) Classification des éléments/mécanismes :

- i. « ductiles » : poutres, poteaux et murs soumis à flexion avec et sans effort normal,
- ii. « fragiles » : mécanisme de cisaillement des poutres, poteaux, murs et nœuds.

### A.3.2 Poutres, poteaux et murs soumis à flexion avec et sans effort normal

#### A.3.2.1 Introduction

(1) La capacité de déformation des poutres, poteaux et murs, qui doit être vérifiée conformément aux **2.2.2(2)P**, **2.2.3(2)P** et **2.2.4(2)P**, est définie en termes de rotation de corde  $\theta$ , c'est-à-dire de l'angle entre la tangente de la fibre moyenne de l'élément au droit de l'extrémité plastifiée et la corde reliant ladite extrémité à l'extrémité de la portée d'effort tranchant ( $L_V = M/V =$  moment/effort tranchant calculée au droit de la section d'extrémité), c'est-à-dire le point d'inflexion. La rotation de corde est aussi égale au déplacement relatif, c'est-à-dire, la flèche au droit de l'extrémité de la portée d'effort tranchant par rapport à la tangente de la fibre moyenne de l'élément au droit de l'extrémité plastifiée, divisée par cette même portée.

#### A.3.2.2 Etat limite de quasi-effondrement (NC)

(1) La valeur de la capacité totale de rotation de corde (parties élastique et non élastique) à la limite ultime,  $\theta_{um}$ , des éléments en béton sous l'action de charges cycliques peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 \cdot (0,3^{\nu}) \left[ \frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left( \frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left( \alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} \left( 1,25^{100 \rho_d} \right) \quad \dots \text{(A.1)}$$

où :

$\gamma_{el}$  est égal à 1,5 pour les éléments sismiques primaires et à 1,0 pour les éléments sismiques secondaires (tels que définis en **2.2.1(6)P**),

$h$  est la hauteur de la section transversale,

$L_V = M/V$  est le rapport moment/effort tranchant au droit de la section d'extrémité,

$\nu = N/bhf_c$  ( $b$  largeur de la zone comprimée,  $N$  effort normal positif en compression),

$\omega, \omega'$  est le pourcentage mécanique d'armatures longitudinales tendues ( $\gamma$  compris les armatures d'âme), et comprimées, respectivement,

$f_c$  et  $f_{yw}$  sont respectivement la résistance à la compression du béton (MPa) et la limite d'élasticité des cadres (MPa), obtenues directement comme valeurs moyennes à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, divisées par les coefficients de confiance appropriés, tels que définis en **3.5(1)P** et dans le Tableau 3.1, en tenant compte du niveau de connaissance atteint,

$\rho_{sx} A_{sx}/b_w s_h$  = pourcentage d'armatures transversales parallèles au sens x de chargement ( $s_h$  = espacement des cadres),

$\rho_d$  est le pourcentage d'armatures diagonales (lorsqu'elles existent), dans chaque direction diagonale,

$\alpha$  est le coefficient d'efficacité du confinement, qui peut être pris égal à :

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o}\right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6h_o b_o}\right) \quad \dots \text{(A.2)}$$

où :

$b_o$  et  $h_o$  sont les dimensions du noyau confiné limité par l'axe des armatures de confinement,

$b_i$  est l'espacement entre axes des barres longitudinales (d'indice  $i$ ) retenues latéralement par un angle d'étrier ou une épingle le long du périmètre de la section transversale.

Dans le cas des murs, la valeur donnée par l'expression (A.1) est divisée par 1,6.

Lorsque de l'acier fragile écroui est utilisé, la capacité totale de rotation de corde ci-dessus est divisée par 1,6.

(2) La valeur de la partie plastique de la capacité de rotation de corde des éléments en béton sous chargement cyclique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_{um} - \theta_y = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,0145 \cdot (0,25)^v \left[ \frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} \right]^{0,3} \cdot f_c^{0,2} \cdot \left( \frac{L_V}{h} \right)^{0,35} 25^{\left( \alpha \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} \left( 1,275^{100 \rho_d} \right) \quad \dots \text{(A.3)}$$

où il convient de calculer la rotation de corde à la plastification,  $\theta_y$ , conformément à **A.3.2.4**,  $\gamma_{el}$  est égal à 1,8 pour les éléments sismiques primaires et à 1,0 pour les éléments sismiques secondaires et où toutes les autres variables sont définies comme pour l'expression (A.1).

Dans le cas des murs, la valeur donnée par l'expression (A.3) est multipliée par 0,6.

Lorsque de l'acier fragile écroui est utilisé, la partie plastique de la capacité de rotation de corde est divisée par 2.

(3) Dans le cas des éléments pour lesquels aucune disposition constructive relative à la résistance aux séismes n'est présente, les valeurs données par les expressions (A.1) et (A.3) sont multipliées par 0,825.

(4) Les alinéas **(1)** et **(2)** s'appliquent aux éléments comprenant des barres longitudinales crénelées (à haute adhérence) sans recouvrement à proximité de la région d'extrémité soumise à plastification. Lorsque le recouvrement des extrémités droites des barres longitudinales à haute adhérence commence au droit de la section d'extrémité de l'élément — comme cela est souvent le cas des poteaux et des murs où la jonction par recouvrement commence au niveau du plancher — il convient d'utiliser les expressions (A.1) et (A.3) avec une valeur du pourcentage d'armatures comprimée,  $\omega'$ , double de la valeur qui s'applique à l'extérieur de la jonction par recouvrement. Par ailleurs, si la longueur de recouvrement  $l_o$  est inférieure à  $l_{ou,min}$ , il convient de multiplier la partie plastique de la capacité de rotation de corde donnée en **(2)** par  $l_o/l_{ou,min}$ , tandis qu'il y a lieu que la valeur de la rotation de corde à la plastification,  $\theta_y$ , qui lui est ajoutée pour obtenir la capacité totale de rotation de corde, tienne compte de l'effet du recouvrement conformément à **A.3.2.4(3)**. La valeur de la longueur  $l_{ou,min}$  est égale à  $l_{ou,min} = d_{bL} f_{yL} / [(1,05 + 14,5 \alpha \rho_{sx} f_{yw} / f_c) \sqrt{f_c}]$ , où

$d_{bL}$  est le diamètre des barres en recouvrement,

$f_{yL}$  est la valeur moyenne de la limite d'élasticité de l'acier des barres en recouvrement, obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, multipliée par le coefficient de confiance correspondante, tel que défini en **3.5** et dans le Tableau 3.1, en tenant compte du niveau de connaissance atteint (voir **3.5(2)P**),

$f_c$ ,  $f_{yw}$  et  $\rho_{sx}$  sont définis en **(1)**, et

$\alpha_f = (1 - s_h/(2b_o))(1 - s_h/(2h_o))n_{restr}/n_{tot}$ , où

—  $n_{restr}$  est le nombre de barres longitudinales en recouvrement retenues latéralement par un angle d'étrier ou une épingle, et

—  $n_{tot}$  est le nombre total de barres longitudinales en recouvrement le long du périmètre de la section transversale.

(5) Les éléments dont les barres longitudinales lisses sont sans recouvrement à proximité de la région d'extrémité soumise à plastification, la capacité totale de rotation de corde peut être prise égale à la valeur calculée conformément à **(1)**, multipliée par 0,575, tandis que la partie plastique de la capacité de rotation de corde peut être prise égale à celle calculée conformément à **(2)**, multipliée par 0,375 (ces coefficients incluant le coefficient de réduction 0,825 défini en **(3)** pour rendre compte de l'absence de dispositions constructives relatives à la résistance aux séismes). Si le recouvrement des barres longitudinales commence au droit de la section d'extrémité de l'élément et si les extrémités desdites barres comportent des crochets standards et présentent une longueur de recouvrement  $l_0$  au moins égale à  $15 d_{bL}$ , la capacité de rotation de corde peut être calculée comme suit :

— Dans les expressions (A.1) et (A.3), la portée d'effort tranchant  $L_V$  (rapport  $M/V$  – moment/effort tranchant au droit de la section d'extrémité) est réduite de la longueur de recouvrement  $l_0$ , dans la mesure où la condition ultime est contrôlée par la région immédiatement après la fin du recouvrement.

— La capacité totale de rotation de corde peut être prise égale à la valeur calculée conformément à **(1)**, multipliée par  $0,0025 (180 + \min(50, l_0/d_{bL}))(1 - l_0/L_V)$ , tandis que la partie plastique de la capacité de rotation de corde peut être prise égale à celle calculée conformément à **(2)**, multipliée par  $0,0035 (60 + \min(50, l_0/d_{bL}))(1 - l_0/L_V)$ .

(6) L'expression alternative suivante peut être utilisée pour l'évaluation de la capacité ultime de rotation de corde :

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left( \theta_y + (\phi_u - \phi_y) L_{pl} \left( 1 - \frac{0,5 L_{pl}}{L_V} \right) \right) \quad \dots \text{(A.4)}$$

où :

$\theta_y$  est la rotation de corde à la plastification, telle que définie par les expressions (A.10) ou (A.11),

$\phi_u$  est la courbure ultime au droit de la section d'extrémité,

$\phi_y$  est la courbure à la limite élastique au droit de la section d'extrémité.

La valeur de la longueur  $L_{pl}$  de la rotule plastique dépend de la façon dont l'augmentation de la résistance et de la capacité de déformation du béton due au confinement est prise en compte dans le calcul de la courbure ultime de la section d'extrémité,  $\phi_u$ .

(7) Si la courbure ultime de la section d'extrémité  $\phi_u$ , sous chargement cyclique, est calculée avec :

a) la déformation ultime des armatures longitudinales,  $\varepsilon_{su}$ , prise égale :

- aux valeurs minimales données dans l'EN 1992-1-1, Tableau C.1, pour la déformation caractéristique à la force maximale,  $\varepsilon_{uk}$ , pour les classes d'acier A ou B,
- à 6 % pour l'acier de classe C, et

b) le modèle de confinement défini dans l'EN 1992-1-1:2004, **3.1.9**, avec la contrainte transverse effective de confinement  $\sigma_2$  prise égale à  $\alpha \rho_{sx} f_{yw}$ , où  $\rho_{sx}$ ,  $f_{yw}$  et  $\alpha$  ont été définis en **(1)**,

alors, pour les éléments comportant des dispositions constructives relatives à la résistance aux séismes et sans recouvrement des barres longitudinales à proximité de la section soumise à plastification,  $L_{pl}$  peut être calculé à partir de l'expression suivante :

$$L_{pl} = 0,1 L_V + 0,17 h + 0,24 \frac{d_{bL} f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c (\text{MPa})}} \quad \dots \text{(A.5)}$$

où :

$h$  est la hauteur de la section de l'élément et  $d_{bL}$  est le diamètre (moyen) des armatures tendues.

(8) Si la courbure ultime de la section d'extrémité  $\phi_u$ , sous chargement cyclique, est calculée avec :

a) la déformation ultime des armatures longitudinales,  $\varepsilon_{su}$ , prise égale à celle donnée en **(7)a**, et

b) un modèle de confinement qui représente mieux que le modèle défini dans l'EN 1992-1-1:2004, **3.1.9**, l'amélioration de  $\phi_u$  due au confinement sous chargement cyclique, à savoir un modèle dans lequel :

- la résistance du béton confiné est évaluée par :

$$f_{cc} = f_c \left[ 1 + 3,7 \left( \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0,86} \right] \quad \dots (A.6)$$

- la déformation à laquelle la résistance  $f_{cc}$  est observée est considérée comme augmentant au delà de la valeur  $\varepsilon_{c2}$  du béton non confiné, suivant l'expression :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad \dots (A.7)$$

- et la déformation ultime de la fibre extrême de la zone comprimée est prise égale à :

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 0,5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}} \quad \dots (A.8)$$

où :

$\alpha$ ,  $f_{yw}$  et  $\rho_{sx}$  sont définis en **(1)** et **(7)** et  $f_{cc}$  est la résistance du béton, améliorée par le confinement,

alors, pour les éléments comportant des dispositions constructives relatives à la résistance aux séismes et sans recouvrement des barres longitudinales à proximité de la section plastifiée,  $L_{pl}$  peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$L_{pl} = \frac{L_V}{30} + 0,2h + 0,11 \frac{d_{bL} f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c} (\text{MPa})} \quad \dots (A.9)$$

(9) Si le modèle de confinement défini dans l'EN 1992-1-1:2004, **3.1.9**, est adopté dans le calcul de la courbure ultime de la section d'extrémité,  $\phi_u$ , et la valeur de  $L_{pl}$  obtenue par l'expression (A.5) est utilisée dans l'expression (A.4), alors le facteur  $\gamma_{el}$  qui y est défini peut être pris égal à 2 pour les éléments sismiques primaires et à 1,0 pour les éléments sismiques secondaires. Si, en revanche, le modèle de confinement donné par les expressions (A.6) à (A.8) est utilisé, ainsi que l'expression (A.9), alors la valeur du coefficient  $\gamma_{el}$  peut être prise égale à 1,7 pour les éléments sismiques primaires et à 1,0 pour les éléments sismiques secondaires.

NOTE Les valeurs de la capacité totale de rotation de corde calculée conformément à **(1)** et **(2)** ci-dessus (compte tenu des expressions **(3)** à **(5)**) sont généralement très similaires. L'expression (A.1) est plus appropriée lorsque les calculs et les demandes sont fondés sur les rotations totales de corde, tandis que l'expression (A.3) convient davantage aux cas où les calculs et les demandes sont fondés sur la partie plastique des rotations de corde. Par ailleurs, l'expression **(4)** donne la capacité de rotation de corde des éléments comprenant des barres longitudinales à haute adhérence et des extrémités droites dont le recouvrement commence au droit de la section d'extrémité seulement avec l'expression (A.3). L'expression (A.4) avec  $\gamma_{el} = 1$  donne des résultats pratiquement similaires lorsqu'elle est utilisée avec **(7)** ou avec **(8)**, mais les différences par rapport aux estimations données par **(1)** ou **(2)** sont plus importantes. La dispersion des résultats d'essai eu égard aux résultats de l'expression (A.4) pour  $\gamma_{el} = 1$  utilisée avec **(8)** est moins importante que ce qu'elle est lorsque ladite expression est utilisée avec **(7)**. Ceci se traduit dans les différentes valeurs de  $\gamma_{el}$  spécifiées en **(1)**, **(2)** et **(9)**, pour les éléments sismiques primaires, dans la mesure où  $\gamma_{el}$  est destiné à convertir les valeurs moyennes en valeurs moyennes moins un écart type. Enfin, les effets de l'absence de dispositions constructives relatives à la résistance aux séismes et de la présence d'une jonction par recouvrement dans la zone des rotules plastiques sont spécifiés dans les expressions **(3)** à **(5)** seulement pour l'utilisation des expressions (A.1) et (A.3).

(10) Les murs existants conformes à la définition des «Murs de grandes dimensions en béton peu armé» donnée dans l'EN 1998-1:2004 peuvent faire l'objet d'une vérification conformément à l'EN 1992-1-1:2004.

### A.3.2.3 État limite de dommages significatifs (SD)

(1) La capacité de rotation de corde correspondant au dommage significatif  $\theta_{SD}$  peut être supposée égale à 3/4 de la valeur de la rotation ultime de la corde  $\theta_u$  donnée en **A.3.2.2**.

### A.3.2.4 État limite de limitation des dommages (DL)

(1) La capacité applicable à cet état limite et utilisée dans les vérifications est le moment fléchissant à la plastification concomitant à la valeur de calcul de l'effort normal.

(2) Lorsque la vérification est effectuée en termes de déformations, la capacité correspondante est donnée par la rotation de corde à la plastification  $\theta_y$ , évaluée comme suit :

Pour les poutres et les poteaux :

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V + \alpha_V z}{3} + 0,00135 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_V} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d-d'} \frac{d_b f_y}{6 \sqrt{f_c}} \quad \dots \text{(A.10a)}$$

Pour les murs de section rectangulaire, en T ou murs de rive en retour :

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V + \alpha_V z}{3} + 0,002 \left( 1 - 0,135 \frac{L_V}{h} \right) + \frac{\varepsilon_y}{d-d'} \frac{d_b f_y}{6 \sqrt{f_c}} \quad \dots \text{(A.11b)}$$

ou à partir des expressions alternatives (et équivalentes) pour les poutres et les poteaux :

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V + \alpha_V z}{3} + 0,0013 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_V} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \dots \text{(A.10b)}$$

et pour les murs de section rectangulaire, en T ou murs de rive en retour :

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_V + \alpha_V z}{3} + 0,002 \left( 1 - 0,125 \frac{L_V}{h} \right) + 0,13 \phi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}} \quad \dots \text{(A.11b)}$$

où :

$\phi_y$  est la courbure à la limite élastique de la section d'extrémité,

$\alpha_V z$  est le décalage du diagramme des moments fléchissants (voir EN 1992-1-1:2004, **9.2.1.3(2)**), avec :

$z$  bras de levier interne, pris égal à  $d-d'$  dans les poutres, les poteaux ou les murs à section avec murs de rive en retour ou en T, ou à  $0,8h$  pour les murs à section rectangulaire, et

$\alpha_V = 1$  si la fissuration d'effort tranchant précède la plastification en flexion au droit de la section d'extrémité (c'est-à-dire lorsque le moment à la plastification au droit de la section d'extrémité,  $M_y$ , est supérieur au produit de  $L_V$  par la résistance à l'effort tranchant de l'élément considéré sans armature d'effort tranchant,  $V_{R,c}$ , prise conformément à l'EN 1992-1-1:2004, **6.2.2(1)**) ; dans les autres cas, (c'est-à-dire si  $M_y < L_V V_{R,c}$ ),  $\alpha_V = 0$ ,

$f_y$  et  $f_c$  sont la limite d'élasticité de l'acier et la résistance à la compression du béton, respectivement, telles que définies pour l'expression (A.1), et toutes les deux en MPa,

$\varepsilon_y$  est égal à  $f_y/E_s$ ,

$d$  et  $d'$  sont les hauteurs utiles des armatures tendues et des armatures comprimées, respectivement, et

$d_{bL}$  est le diamètre (moyen) des armatures tendues.

Le premier terme des expressions (A.10) et (A.11) tient compte de la contribution de la flexion. Le deuxième terme représente la contribution de la déformation d'effort tranchant, tandis que le troisième terme représente le glissement d'ancrage des barres.

NOTE Les deux ensembles alternatifs d'expressions (A.10a), (A.11a) d'une part, et (A.10b), (A.11b) d'autre part, sont pratiquement équivalents. Les expressions (A.10a) et (A.11a) sont plus rationnelles, mais les expressions (A.10b) et (A.11b) sont plus pratiques, et leur utilisation peut dans l'ensemble être plus adaptée, dans la mesure où le calcul de  $\phi_y$  peut se révéler difficile et plus enclin à provoquer des erreurs.

(3) Les alinéas (1) et (2) s'appliquent aux éléments comprenant des barres longitudinales sans recouvrement à proximité de la région d'extrémité soumise à plastification. Si les barres longitudinales sont à haute adhérence avec des extrémités droites dont le recouvrement commence au droit de la section d'extrémité de l'élément (comme dans le cas des poteaux et murs où la jonction par recouvrement commence au niveau du plancher), il convient de calculer le moment à la plastification  $M_y$  et la courbure à la limite élastique  $\phi_y$  dans les expressions (A.10), (A.11) avec une valeur du pourcentage d'armatures comprimées double de la valeur qui s'applique à l'extérieur de la jonction par recouvrement. Si la longueur de recouvrement droit  $l_o$  est inférieure à  $l_{oy,min} = 0,3d_{bL}f_{yL}/\sqrt{f_c}$ , où  $d_{bL}$  est le diamètre des barres en recouvrement,  $f_{yL}$  (MPa) est la valeur moyenne de la limite d'élasticité de l'acier des barres en recouvrement, obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, multipliées par les coefficients de confiance appropriés, tels que définis en 3.5 et dans le Tableau 3.1, en tenant compte du niveau de connaissance atteint (voir 3.5(2)P) et  $f_c$  (MPa) est tel que défini pour l'expression (A.1), alors :

- il convient de calculer  $M_y$  et  $\phi_y$  avec la limite d'élasticité,  $f_y$ , multipliée par  $l_o/l_{oy,min}$ ,
- il convient de multiplier la déformation à la limite d'élasticité,  $\varepsilon_y$ , dans le dernier terme des expressions (A.10a), (A.11a) par  $l_o/l_{oy,min}$ ,
- il convient de multiplier le deuxième terme des expressions (A.10), (A.11) par le rapport de la valeur du moment à la plastification  $M_y$  tel que modifié pour tenir compte de la jonction par recouvrement, et du moment à la plastification à l'extérieur de ladite jonction,
- afin de déterminer si le terme  $\alpha_{VZ}$  contribue au premier terme des expressions (A.10), (A.11) avec  $\alpha_V = 1$ , le produit  $L_V V_{R,c}$  est comparé au moment à la plastification  $M_y$  tel que modifié pour tenir compte de l'effet du recouvrement.

(4) Les alinéas (1) et (2) peuvent être considérés comme s'appliquant également aux éléments comportant des barres longitudinales lisses, même lorsque le recouvrement de leurs extrémités, munies de crochets standards, commence au droit de la section d'extrémité de l'élément (comme dans le cas des poteaux et des murs pour lesquels la jonction par recouvrement commence au niveau du plancher), sous réserve que la longueur de recouvrement  $l_o$  soit au moins égale à  $15d_{bL}$ .

(5) Si la vérification est effectuée en termes de déformations, il convient de calculer les demandes de déformation à partir d'une analyse basée sur un modèle structural dans lequel la rigidité de chaque élément est prise comme étant égale à la valeur moyenne de  $M_y L_V / 3\theta_y$  au droit des deux extrémités de l'élément. Dans ce calcul, la portée d'effort tranchant au droit de la section d'extrémité,  $L_V$ , peut être prise égale à la demi-longueur de l'élément.

### A.3.3 Poutres, poteaux et murs : effort tranchant

#### A.3.3.1 État limite de quasi-effondrement (NC)

(1) La résistance à l'effort tranchant cyclique,  $V_R$ , diminue en fonction de la partie plastique de la demande en ductilité, exprimée en termes de ductilité de la flèche transversale à l'extrémité de la portée d'effort tranchant ou de la rotation de corde au droit de l'extrémité de l'élément :  $\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1$ . Dans ce but,  $\mu_{\Delta}^{pl}$  peut être calculée comme le rapport de la partie plastique de la rotation de corde,  $\theta$ , à la rotation de corde à la plastification,  $\theta_y$ , déterminée conformément à A.3.2.4(2) à (4).

L'expression ci-dessous peut être utilisée pour la résistance à l'effort tranchant, lorsqu'elle est contrôlée par les cadres, compte tenu de la réduction ci-dessus (les unités étant MN et mètres) :

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[ \frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + \left( 1 - 0,05 \min\left(5; \mu_{\Delta}^{pl}\right) \right) \cdot \left[ 0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) \left( 1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \quad \dots (A.12)$$

où :

$\gamma_{el}$  est égal à 1,15 pour les éléments sismiques primaires et à 1,0 pour les éléments sismiques secondaires (tels que définis en **2.2.1(6)P**),

$h$  est la hauteur de la section transversale (égale au diamètre  $D$  pour les sections circulaires),

$x$  est la hauteur de la zone comprimée,

$N$  est l'effort normal en compression (positif, pris égal à zéro en traction),

$L_V = M/V$  est le rapport moment/effort tranchant au droit de la section d'extrémité,

$A_c$  est l'aire de la section transversale, prise égale à  $b_w d$  pour une section transversale à âme rectangulaire de largeur (épaisseur)  $b_w$  et une hauteur utile  $d$ , ou égale à  $\pi D_c^2/4$  (où  $D_c = D - 2c - 2d_{bh}$  est le diamètre du noyau de béton à l'intérieur des armatures de confinement, où  $D$  et  $c$  sont tels que définis en b) ci-dessous et  $d_{bw}$  est le diamètre des armatures transversales) pour les sections circulaires,

$f_c$  est la résistance à la compression du béton, telle que définie pour l'expression (A.1) pour les éléments sismiques primaires,  $f_c$  doit ensuite être divisée par le coefficient partiel pour le béton conformément à l'EN 1998-1:2004, **5.2.4**,

$\rho_{tot}$  est le pourcentage total d'armatures longitudinales,

$V_w$  est la contribution des armatures transversales à la résistance à l'effort tranchant, prise égale à :

a) pour les sections transversales à âme rectangulaire de largeur (épaisseur)  $b_w$

$$V_w = \rho_w b_w z f_{yw} \quad \dots (A.13)$$

où :

$\rho_w$  est le pourcentage d'armatures transversales,

$z$  est la longueur du bras de levier interne, comme spécifié en **A.3.2.4(2)**, et

$f_{yw}$  est la limite d'élasticité des armatures transversales, telle que définie pour l'expression (A.1) ; pour les éléments sismiques primaires,  $f_{yw}$  doit ensuite être divisée par le coefficient partiel pour l'acier conformément à l'EN 1998-1:2004, **5.2.4** ;

b) pour les sections transversales circulaires :

$$V_w = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} (D - 2c) \quad \dots (A.14)$$

où :

$D$  est le diamètre de la section,

$A_{sw}$  est l'aire de la section d'un cadre circulaire,

$s$  est l'espacement entre les axes des cadres,

$f_{yw}$  est tel que défini en (a) ci-dessus, et

$c$  est l'enrobage de béton.

(2) La résistance à l'effort tranchant d'un mur en béton,  $V_R$ , ne peut pas être prise supérieure à la valeur correspondant à une rupture par écrasement des âmes,  $V_{R,max}$ , qui, sous l'application de charges cycliques, peut être calculée à partir de l'expression suivante (avec les unités : MN et mètres) :

$$V_{R,max} = \frac{0,85 \left( 1 - 0,06 \min\left(5; \mu_{\Delta}^{pl}\right) \right)}{\gamma_{el}} \left( 1 + 1,8 \min\left(0,15; \frac{N}{A_c f_c}\right) \right) \left( 1 + 0,25 \max\left(1,75; 100\rho_{tot}\right) \right) \left( 1 - 0,2 \min\left(2; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} b_w z \quad \dots (A.15)$$



où  $\gamma_{el} = 1,15$  pour les éléments sismiques primaires et 1,0 pour les éléments sismiques secondaires,  $f_c$  est donnée en MPa,  $b_w$  et  $z$  sont données en mètres et  $V_{R,max}$  est donnée en MN, et où toutes les autres variables sont telles que définies en (1).

La résistance à l'effort tranchant sous l'application de charges cycliques, contrôlée par l'écrasement des âmes préalablement à la plastification en flexion est obtenue à partir de l'expression (A.15) pour  $\mu_{\Delta}^{pl} = 0$ .

(3) Si, dans un poteau en béton, le rapport de portée d'effort tranchant,  $L_V/h$ , calculé au droit de la section d'extrémité avec la valeur maximale des deux moments d'extrémité, est inférieur ou égal à 2, il convient que sa résistance à l'effort tranchant,  $V_R$ , ne soit pas prise supérieure à la valeur correspondant à la rupture par écrasement des âmes le long de la diagonale du poteau après une plastification en flexion,  $V_{R,max}$ , qui, sous l'application de charges cycliques, peut être calculée à partir de l'expression suivante (avec unités : MN et mètres) :

$$V_{R,max} = \frac{\frac{4}{7} \left( 1 - 0,02 \min \left( 5 ; \mu_{\Delta}^{pl} \right) \right)}{\gamma_{el}} \left( 1 + 1,35 \frac{N}{A_c f_c} \right) \left( 1 + 0,45 \left( 100 \rho_{tot} \right) \right) \sqrt{\min \left( 40 ; f_c \right) b_w z \sin 2\delta} \quad \dots \text{(A.16)}$$

où :

$\delta$  est l'angle compris entre la diagonale et l'axe du poteau ( $\tan \delta = h/2L_V$ ),

toutes les autres variables étant telles que définies en (3).

(4) Il convient d'utiliser, pour la réévaluation, la valeur minimale de la résistance à l'effort tranchant calculée conformément à l'EN 1992-1-1:2004 ou à l'aide des expressions (A.12)-(A.16).

(5) Il convient d'utiliser dans les calculs les propriétés moyennes des matériaux déterminées à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires.

(6) Dans le cas des éléments sismiques primaires, il convient que les résistances moyennes des matériaux, outre le fait qu'elles soient divisées par les coefficients de confiance appropriés associés au niveau de connaissance, soient également divisées par les coefficients partiels applicables aux matériaux conformément à l'EN 1998-1:2004, 5.2.4.

### A.3.3.2 État limite de dommages significatifs (SD) et de limitation des dommages (DL)

(1) La vérification par rapport au dépassement de ces deux états limites n'est pas nécessaire, à moins que ces deux états ne soient les seuls à devoir faire l'objet d'une vérification. Dans ce cas, l'alinéa A.3.3.1 s'applique.

## A.3.4 Nœuds poteau-poutre

### A.3.4.1 État limite de quasi-effondrement (NC)

(1) La demande vis-à-vis du cisaillement sur les nœuds est évaluée conformément à l'EN 1998-1:2004, 5.5.2.3.

(2) La capacité résistante des nœuds vis-à-vis du cisaillement est évaluée conformément à l'EN 1998-1:2004, 5.5.3.3.

(3) Les alinéas A.3.3.1(5) et (6) s'appliquent aux nœuds entre les éléments sismiques primaires et les autres éléments.

### A.3.4.2 État limite de dommages significatifs (SD) et de limitation des dommages (DL)

(1) La vérification vis-à-vis du dépassement de ces deux états limites n'est pas nécessaire, à moins que ces deux états ne soient les seuls à devoir faire l'objet d'une vérification. Dans ce cas, l'alinéa A.3.4.1 s'applique.

## A.4 Modèles de capacité pour le renforcement

### A.4.1 Généralités

(1) Les règles relatives aux capacités de résistance et de déformation des éléments indiquées dans les paragraphes suivants pour les éléments renforcés font référence aux capacités à l'état limite de quasi-effondrement définies en **A.3.2.2** et **A.3.3.1**, préalablement à l'application du coefficient global  $\gamma_{el}$ . Il convient d'appliquer les coefficients  $\gamma_{el}$  spécifiés en **A.3.2.2** et **A.3.3.1** aux capacités de résistance et de déformation de l'élément réparé, telles que déterminées conformément aux paragraphes suivants.

(2) Les coefficients partiels à appliquer au nouvel acier ou au nouveau béton utilisés pour le renforcement sont ceux donnés dans l'EN 1998-1:2004, **5.2.4**, et les coefficients partiels à appliquer au nouvel acier de construction utilisé également pour le renforcement sont ceux donnés dans l'EN 1998-1:2004, **6.1.3(1)P**.

### A.4.2 Chemisage en béton

#### A.4.2.1 Introduction

(1) Les chemisages en béton sont appliqués aux poteaux et aux murs pour tout ou partie des besoins suivants :

- augmentation de la portance,
- augmentation de la résistance en flexion et/ou au cisaillement,
- augmentation de la capacité de déformation,
- amélioration de la résistance des jonctions par recouvrement défailtantes.

(2) Il convient que l'épaisseur des chemisages permette de disposer à la fois des armatures longitudinales et transversales avec un enrobage adéquat.

(3) Lorsque les chemisages ont pour objectif d'augmenter la résistance en flexion, il convient de prolonger les barres longitudinales jusqu'à l'étage contigu par l'intermédiaire de percées dans la dalle, tandis qu'il convient de disposer des épingles horizontales au niveau des nœuds par le truchement de trous horizontaux percés dans les poutres. Les épingles ne sont pas nécessaires dans le cas de nœuds intérieurs entièrement confinés.

(4) Lorsque seule une augmentation de capacité de résistance et de déformation vis-à-vis de l'effort tranchant est à considérer, éventuellement avec une amélioration de la jonction par recouvrement, il convient que l'extrémité des chemisages (à la fois le béton et les armatures) préserve un espace par rapport à la dalle de l'ordre de 10 mm.

#### A.4.2.2 Amélioration de la résistance, de la rigidité et de la capacité de déformation

(1) Afin d'évaluer la résistance et les capacités de déformation des éléments chemisés, les hypothèses simplificatrices approximatives suivantes peuvent être prises :

- le comportement de l'élément chemisé est monolithique, avec un comportement mixte complet des bétons ancien et ajouté,
- il n'est pas tenu compte du fait que l'effort normal s'applique à l'origine uniquement à l'ancien poteau, et l'effort normal total est supposé agir sur l'élément chemisé,
- les propriétés du béton du chemisage sont supposées s'appliquer à toute la section de l'élément.

(2) Les relations suivantes sont supposées prévaloir entre les valeurs de  $V_R$ ,  $M_y$ ,  $\theta_y$ , et  $\theta_u$ , calculées avec les hypothèses susmentionnées et les valeurs  $V_R^*$ ,  $M_y^*$ ,  $\theta_y^*$ , et  $\theta_u^*$  à adopter pour les vérifications de capacité :

— Pour  $V_R^*$  :

$$V_R^* = 0,9 V_R \quad \dots \text{(A.17)}$$

— Pour  $M_y^*$  :

$$M_y^* = M_y \quad \dots \text{(A.18)}$$

— Pour  $\theta_y^*$  :

Si les mesures prises pour relier le chemisage au béton ancien incluent l'indentation de l'interface :

$$\theta_y^* = 1,05 \theta_y \quad \dots \text{(A.19a)}$$

Pour tous les autres types de mesures visant à relier le chemisage au béton ancien, ou si aucune mesure spéciale n'est prise pour relier le chemisage au béton ancien :

$$\theta_y^* = 1,2\theta_y \quad \dots \text{ (A.19b)}$$

— Pour  $\theta_u^*$  :

$$\theta_u^* = \theta_u \quad \dots \text{ (A.20)}$$

(3) Il convient de calculer les valeurs de  $\theta_u^*$ ,  $\theta_y^*$ ,  $M_y^*$  de l'élément chemisé, devant être utilisées pour les comparaisons par rapport aux demandes dans les vérifications de sécurité, sur la base de : (a) la valeur moyenne de la résistance de l'acier existant, directement obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, divisée de manière appropriée par le coefficient de confiance défini en **3.5**, en tenant compte du niveau de connaissance atteint ; et (b) de la résistance nominale du béton et des armatures ajoutés.

(4) Il convient de calculer la valeur de  $V_R^*$  de l'élément chemisé, devant être comparée à la demande dans les vérifications de sécurité, sur la base de : (a) la valeur moyenne de la résistance du béton et de l'acier existants telle que directement obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, divisée par le coefficient de confiance approprié défini au **3.5**, en tenant compte du niveau de connaissance atteint ; et (b) de la résistance nominale du béton et des armatures ajoutés. Dans le cas des éléments sismiques primaires, il convient de diviser la valeur moyenne de la résistance du béton et de l'acier existants et de la résistance nominale des matériaux ajoutés par les coefficients partiels applicables à l'acier et au béton conformément à l'EN 1998-1:2004, **5.2.4**.

(5) Il convient de calculer la valeur de  $M_y^*$  des éléments chemisés dont les effets des actions s'exercent sur les éléments/mécanismes fragiles, lorsque **4.5.1(1)P(b)** est utilisé, sur la base de : (a) la valeur moyenne de la résistance du béton et de l'acier existants telle que directement obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, multipliée par le coefficient de confiance approprié défini en **3.5**, en tenant compte du niveau de connaissance atteint ; et (b) de la résistance nominale du béton et des armatures ajoutés (voir **3.5(2)P**).

### A.4.3 Chemisage en acier

#### A.4.3.1 Introduction

(1) Les chemisages en acier sont appliqués principalement aux poteaux afin d'augmenter leur résistance à l'effort tranchant et d'améliorer la résistance des jonctions par recouvrement insuffisantes. Ils peuvent également être considérés comme contribuant à l'augmentation de la ductilité par le confinement qu'ils apportent.

(2) Les chemisages en acier disposés autour des poteaux rectangulaires sont généralement constitués de quatre cornières auxquelles sont soudées soit des plaques en acier continues, soit des bandes d'acier horizontales discontinues plus épaisses. Les cornières peuvent être collées au béton par l'intermédiaire d'un liant époxydique ou peuvent y être plaquées, sans aucun espace sur toute leur hauteur. Les bandes peuvent être soumises à un traitement thermique préalable au soudage, afin d'assurer par la suite un certain confinement positif sur le poteau.

#### A.4.3.2 Résistance à l'effort tranchant

(1) La contribution du chemisage à la résistance à l'effort tranchant peut être supposée complémentaire à la résistance existante, à condition que le chemisage demeure dans le domaine élastique. Cette condition est nécessaire pour que le chemisage puisse contrôler la largeur des fissures intérieures et assurer l'intégrité du béton, permettant ainsi au mécanisme de résistance à l'effort tranchant d'origine de pouvoir continuer à fonctionner.

(2) Lorsque seuls 50 % de la limite d'élasticité de l'acier du chemisage sont utilisés, l'expression donnant la résistance supplémentaire  $V_j$  à l'effort tranchant, due au chemisage, est la suivante :

$$V_j = 0,5 \frac{2t_j b}{s} f_{y,j,d} \frac{1}{\cos \alpha} \quad \dots \text{ (A.21)}$$

où :

$t_j$  est l'épaisseur des bandes d'acier,

$b$  est la largeur des bandes d'acier, et

$s$  est l'espacement des bandes d'acier ( $b/s = 1$ , dans le cas de plaques en acier continues), et

$f_{y,j,d}$  est la limite d'élasticité de calcul de l'acier du chemisage, égale à sa résistance nominale divisée par le coefficient partiel applicable à l'acier de construction conformément à l'EN 1998-1:2004, **6.1.3(1)P**.

#### A.4.3.3 Couture des jonctions par recouvrement

(1) Les chemisages en acier peuvent assurer une couture efficace des jonctions par recouvrement, afin d'améliorer la capacité de déformation cyclique. Les dispositions suivantes sont nécessaires à l'obtention de ce résultat :

- la longueur du chemisage est supérieure à la longueur de la jonction d'au moins 50 %,
- le chemisage est comprimé contre les faces du poteau par au moins deux rangées de boulons, sur chaque face perpendiculaire au sens du chargement,
- lorsque la jonction s'effectue au droit de l'embase du poteau, il convient que les rangées de boulons soient disposées comme suit : une rangée au sommet de la jonction et l'autre rangée située à une distance de 1/3 de la longueur de ladite jonction, en partant de la base.

#### A.4.4 Placage et enrobage par des polymères renforcés de fibres

##### A.4.4.1 Introduction

(1) Les polymères renforcés de fibres à collage externe destinés à un renforcement parasismique des éléments en béton armé existants sont utilisés principalement dans les cas suivants :

- renforcement de la capacité de résistance à l'effort tranchant des poteaux et des murs, par application de polymères renforcés de fibres à collage externe, les fibres étant disposées dans le sens de l'armature de confinement,
- renforcement de la ductilité disponible au droit des extrémités des éléments, par l'ajout d'un confinement sous la forme de chemisages de polymères renforcés de fibres, ces dernières étant disposées le long du périmètre,
- prévention de toute rupture d'une jonction par recouvrement, par un meilleur confinement le long du recouvrement, les fibres étant une nouvelle fois disposées le long du périmètre.

(2) L'effet du placage et de l'enrobage des éléments, par polymère renforcé de fibres, sur la résistance en flexion de la section d'extrémité et sur la valeur de la rotation de corde à la plastification,  $\theta_y$ , peut être négligé ( $\theta_y$  peut être calculé conformément à **A.3.2.4(2)** à **(4)**, avec  $l_{oy,min}$  égal à  $0,2d_b L \sqrt{f_c}$ , en **A.3.2.4(4)**).

##### A.4.4.2 Résistance à l'effort tranchant

(1) Il est possible d'améliorer la capacité de résistance à l'effort tranchant des éléments fragiles des poutres, des poteaux ou des murs de contreventement par l'application de bandes ou de feuilles de polymère renforcé de fibres. Ces dernières peuvent être appliquées soit par un enrobage complet de l'élément, soit en les collant sur les côtés et la face inférieure de la poutre (bande ou feuille en forme de U), soit en les collant sur les côtés uniquement.

(2) La capacité de résistance totale à l'effort tranchant, telle que contrôlée par les cadres et le polymère renforcé de fibres, est déterminée comme étant la somme d'une contribution de l'élément en béton existant, évaluée conformément à l'EN 1998-1:2004 et d'une autre contribution,  $V_f$ , du polymère renforcé de fibres.

(3) La capacité de résistance totale à l'effort tranchant ne peut pas être prise supérieure à la résistance maximale au cisaillement de l'élément en béton,  $V_{R,max}$ , contrôlée par la compression diagonale de l'âme. La valeur de  $V_{R,max}$  peut être calculée conformément à l'EN 1992-1-1:2004. Dans le cas des murs en béton et des poteaux avec un rapport de portée d'effort tranchant,  $L_v/h$ , inférieur ou égal à 2, la valeur de  $V_{R,max}$  est la valeur minimale entre celle prise conforme à l'EN 1992-1-1:2004 et la valeur calculée à partir de **A.3.3.1(2)** et **A.3.3.1(3)**, respectivement, sous l'application de charges cycliques non élastiques.

(4) Pour les éléments de section rectangulaire, la contribution du polymère renforcé de fibres à la capacité de résistance peut être évaluée comme suit :

- pour un enrobage total par un polymère renforcé de fibres, ou pour des bandes ou des feuilles de polymère renforcé de fibres en forme de U,

$$V_{Rd,f} = 0,9d \cdot f_{tdd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \left( \frac{w_f}{s_f} \right)^2 \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta \quad \dots \text{(A.22)}$$

— pour des bandes ou des feuilles de polymère renforcé de fibres collées sur les côtés :

$$V_{Rd,f} = 0,9d \cdot f_{fdd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad \dots \text{(A.23)}$$

où :

$d$  est la hauteur utile,

$\theta$  est l'angle d'inclinaison des bielles,

$f_{fdd,e}$  est la résistance efficace de calcul vis-à-vis du décollement du polymère renforcé de fibres, qui dépend de la configuration du renforcement conformément à **(5)** pour le polymère renforcé de fibres à enrobage total, à **(6)** pour le polymère renforcé de fibres en forme de U ou à **(7)** pour le polymère renforcé de fibres collé sur les côtés,

$t_f$  est l'épaisseur de la bande, de la feuille ou de la toile de polymère renforcé de fibres (sur un seul côté),

$\beta$  est l'angle compris entre la direction (résistante) des fibres (d'une bande, d'une feuille ou d'une toile de polymère renforcé de fibres et l'axe de l'élément,

$w_f$  est la largeur de la bande ou de la feuille de polymère renforcé de fibres, mesurée dans le sens orthogonal à la direction (résistante) des fibres (pour les feuilles :  $w_f = \min(0,9d, h_w) \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ ), et

$s_f$  est l'espacement des bandes de polymère renforcé de fibres (=  $w_f$  pour les feuilles), mesuré dans le sens orthogonal à la direction (résistante) des fibres.

(5) Dans le cas des chemisages entièrement enrobés (c'est-à-dire fermés) ou ancrés de façon appropriée (dans la zone comprimée), la résistance efficace de calcul vis-à-vis du décollement du polymère renforcé de fibres peut être prise, dans les expressions (A.22) et (A.23), égale à :

$$f_{fdd,e,W} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - k \frac{L_e \sin \beta}{2z} \right] + \frac{1}{2} (f_{fu,W}(R) - f_{fdd}) \cdot \left[ 1 - \frac{L_e \sin \beta}{z} \right] \quad \dots \text{(A.24)}$$

où :

$z = 0,9d$  est le bras de levier interne,

$k = \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right)$ , et :

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \sqrt{0,6 \frac{E_f f_{ctm} k_b}{t_f}} \quad (\text{unités : N, mm}) \quad \dots \text{(A.25)}$$

est la résistance de calcul vis-à-vis du décollement, avec :

$\gamma_{fd}$  coefficient partiel applicable au décollement du polymère renforcé de fibres,

NOTE La valeur assignée à  $\gamma_{fd}$  destinée à être utilisée dans un pays donné est indiquée dans l'annexe nationale au présent document. La valeur recommandée est  $\gamma_{fd} = 1,5$ .

$E_f$  module des feuilles/plaques de polymère renforcé de fibres,

$f_{ctm}$  résistance moyenne du béton à la traction,

$k_b = \sqrt{1,5 \cdot (2 - w_f / s_f) / (1 + w_f / 100 \text{ mm})}$  le coefficient d'enrobage,

dans lequel :

$w_f, s_f, t_f$  sont tels que définis en **(4)**, et

$f_{fu,W}(R)$  est la résistance ultime de la bande ou de la feuille de polymère renforcé de fibres qui enrobe l'angle avec un rayon R, donnée par :

$$f_{fu,W}(R) = f_{fdd} + \langle \eta_R \cdot f_{fu} - f_{fdd} \rangle \quad \dots \text{(A.26)}$$

où il convient de prendre le terme entre  $\langle . \rangle$  uniquement s'il est positif et où le coefficient  $\eta_R$  dépend du rayon d'arrondi  $R$  et de la largeur de la poutre  $b_w$  comme suit :

$$\eta_R = 0,2 + 1,6 \frac{R}{b_w} \quad 0 \leq \frac{R}{b_w} \leq 0,5 \quad \dots \text{(A.27)}$$

$L_e$  est la longueur d'adhérence utile :

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{4} \cdot \tau_{\max}}} \quad (\text{unités : N, mm}) \quad \dots \text{(A.28)}$$

avec :

$\tau_{\max} = 1,8 f_{ctm} k_b$  = résistance maximale par adhérence.

(6) Pour les chemisages en forme de U (c'est-à-dire ouverts), la résistance efficace de calcul vis-à-vis du décollement du polymère renforcé de fibres peut être prise, dans les expressions (A.22) et (A.23), égale à :

$$f_{fdd,e,U} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - k \frac{L_e \sin \beta}{z} \right] \quad \dots \text{(A.29)}$$

où toutes les variables sont telles que définies en (5).

(7) Pour les feuilles/bandes à collage sur le(s) côté(s), la résistance efficace de calcul vis-à-vis du décollement du polymère renforcé de fibres peut être prise, dans les expressions (A.22) et (A.23), égale à :

$$f_{fdd,e,S} = f_{fdd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{z} \cdot \left( 1 - \sqrt{k \frac{L_{eq}}{z_{rid,eq}}} \right)^2 \quad \dots \text{(A.30)}$$

où :

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + L_{eq}, \quad z_{rid} = z - L_e \cdot \sin \beta, \quad L_{eq} = \frac{u_1}{\varepsilon_{fdd}} \cdot \sin \beta \quad \dots \text{(A.31)}$$

avec :

$$\varepsilon_{fdd} = f_{fdd} / E_f, \text{ et}$$

$$u_1 = k_b / 3.$$

(8) Pour les éléments à section circulaire de diamètre  $D$ , la contribution du polymère renforcé de fibres est évaluée comme suit :

$$V_f = 0,5 A_c \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,ed} \quad \dots \text{(A.32)}$$

où :

$A_c$  est l'aire de section transversale des poteaux,

$\rho_f$  égale à  $4 t_f / D$  est le rapport volumétrique du polymère renforcé de fibres, et

$$\varepsilon_{f,ed} = 0,004.$$

(10) Dans le cas des éléments dont les rotules plastiques sont entièrement enrobées d'un chemisage de polymère renforcé de fibres sur une longueur au moins égale à la hauteur de la section de l'élément  $h$ , la résistance cyclique à l'effort tranchant,  $V_R$ , peut être considérée comme décroissant avec la partie plastique de la demande de ductilité à la rotation de corde, calculée au droit de l'extrémité de l'élément :  $\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1$ , conformément à l'expression (A.12), en ajoutant à  $V_w$  (c'est-à-dire à la contribution des armatures transversales à la résistance à l'effort tranchant) la résistance supplémentaire due au chemisage de polymère renforcé de fibres. La contribution à  $V_w$  du chemisage de polymère renforcé de fibres peut être calculée en supposant que la contrainte dans le polymère renforcé de fibres atteint la valeur de calcul de la résistance ultime dudit polymère,  $f_{u,fd}$ , au droit des fibres extrêmes tendues et diminue de façon linéaire pour atteindre la valeur zéro sur la hauteur utile  $d$  :

$$V_{w,f} = 0,5 \rho_f b_w z f_{u,fd} \quad \dots \text{(A.33)}$$

où :

$\rho_f$  égal à  $2t_f/b_w$  est le rapport géométrique de polymère renforcé de fibres,

$z$  est la longueur du bras de levier interne, pris égal à  $d$ , et

$f_{u,fd}$  est la valeur de calcul de la résistance ultime du polymère renforcé de fibres, égale à ladite résistance,  $f_{u,f}$  divisée par le coefficient partiel  $\gamma_{fd}$  affecté à ce même polymère.

NOTE La valeur assignée à  $\gamma_{fd}$  destinée à être utilisée dans un pays donné est indiquée dans l'annexe nationale au présent document. La valeur recommandée est  $\gamma_{fd} = 1,5$ .

#### A.4.4.3 Action de confinement

(1) Le confinement du béton au moyen de chemisages de polymères renforcés de fibres permet d'améliorer la capacité de déformation. Les chemisages sont appliqués autour de l'élément dont les rotules plastiques potentielles doivent être renforcées.

(2) Le niveau de pression de confinement devant être appliquée dépend du rapport  $l_\chi = \mu_{\phi,tar}/\mu_{\phi,ava}$ , entre la ductilité en courbure cible  $\mu_{\phi,tar}$  et la ductilité en courbure disponible  $\mu_{\phi,ava}$ , et peut être calculée comme suit :

$$f_l = 0,4 f_c^2 \frac{f_c \cdot \varepsilon_{cu}^2}{\varepsilon_{ju}^{1,5}} \quad \dots \text{(A.34)}$$

où :

$f_c$  est la résistance du béton, définie comme dans l'expression (A.1),

$\varepsilon_{cu}$  est la déformation ultime du béton, et

$\varepsilon_{ju}$  est la déformation ultime adoptée pour le chemisage de polymère renforcé de fibres, qui est inférieure à la déformation ultime desdits polymères,  $\varepsilon_{fu}$ .

(3) Dans le cas des sections transversales circulaires enrobées de feuilles continues (et non de bandes), la pression de confinement exercée par la feuille de polymère renforcé de fibres est égale à  $f_l = 1/2 \rho_f E_f \varepsilon_{ju}$ ,  $E_f$  étant le module d'élasticité du polymère et  $\rho_f$  étant le rapport géométrique du chemisage de polymère renforcé de fibres par rapport à son épaisseur, avec :  $t_f = \rho_f D/4$ , où  $D$  est le diamètre du chemisage autour de la section transversale circulaire.

(4) Dans le cas des sections transversales rectangulaires dont les angles ont été arrondis afin de permettre l'enrobage par un polymère renforcé de fibres (voir Figure A.1), la pression de confinement exercée par la feuille de polymère est évaluée comme suit :  $f_l = k_s f_l$ , avec  $k_s = 2R_c/D$  et  $f_l = 2 E_f \varepsilon_{ju} t_f / D$ , où  $D$  est la plus grande largeur de section.

(5) Dans le cas d'un enrobage au moyen de bandes avec un espacement  $s_f$ , la pression de confinement exercée par la feuille de polymère renforcé de fibres est évaluée comme suit :  $f_l = k_g f_l$ , avec  $k_g = (1 - s_f/2D)^2$ .

(6) Pour les éléments de section rectangulaire dont les angles sont arrondis comme illustré sur la Figure A.1, une solution alternative à (2) et (4) consiste à calculer la capacité totale de rotation de corde ou sa partie plastique à l'aide des expressions (A.1) ou (A.3), respectivement, en ajoutant à l'exposant du terme dû au confinement (c'est-à-dire la puissance 25 précédant le dernier terme des expressions (A.1) et (A.3) le terme  $\alpha \rho_f f_{f,e}$ , où :

(a)  $\rho_f = 2t_f/b_w$ , est le pourcentage de polymère renforcé de fibres parallèlement au sens de chargement ;

(b)  $f_{f,e}$  est une contrainte effective donnée par l'expression suivante :

$$f_{f,e} = \min\left(f_{u,f}, \varepsilon_{u,f} E_f\right) \left(1 - 0,7 \min\left(f_{u,f}, \varepsilon_{u,f} E_f\right) \frac{\rho_f}{f_c}\right) \quad \dots \text{(A.35)}$$

où :

$f_{u,f}$  et  $E_f$  représentent la résistance et le module d'élasticité du polymère renforcé de fibres et  $\varepsilon_{u,f}$  représente une déformation limite, égale à 0,015 pour les polymères armés de fibres de carbone ou aramide et à 0,02 pour les polymères renforcés de fibres de verre ; et

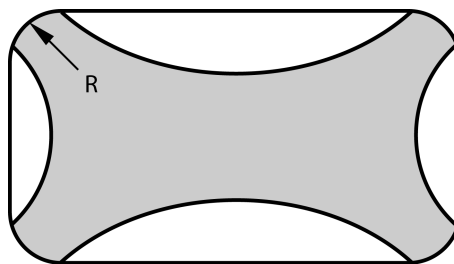
(c)  $\alpha$  est le coefficient d'efficacité du confinement, donné par :

$$\alpha = 1 - \frac{(b - 2R)^2 + (h - 2R)^2}{3bh} \quad \dots (A.36)$$

où :

$R$  est le rayon de l'angle arrondi de la section et  $b, h$  sont les dimensions totales de la section transversale (voir Figure A.1).

(7) L'alinéa (6) s'applique aux éléments comportant des barres longitudinales continues crénelées (à haute adhérence) ou lisses, avec ou sans dispositions constructives relatives à la résistance aux séismes, à condition que la zone d'extrémité soit enrobée de polymère renforcé de fibres jusqu'à une distance par rapport à la section d'extrémité suffisante pour s'assurer que le moment à la plastification  $M_y$  de la partie non enrobée ne sera pas dépassé avant que ne soit atteinte la résistance en flexion prenant en compte la surcapacité  $\gamma_{Rd} M_y$  au droit de la section d'extrémité. Il convient, afin de tenir compte de l'augmentation de la résistance en flexion de la section d'extrémité due au confinement par le polymère renforcé de fibres, que la valeur  $\gamma_{Rd}$  soit au moins égale à 1,3.



**Figure A.1 — Surface à confinement effectif d'une section enrobée de polymères renforcés de fibres**

#### A.4.4.4 Couture des jonctions par recouvrement

(1) L'application d'une pression latérale  $\sigma$  par l'intermédiaire d'un chemisage par polymère renforcé de fibres permet de prévenir tout glissement des jonctions par recouvrement. Pour les poteaux circulaires, d'un diamètre  $D$ , l'épaisseur nécessaire peut être estimée comme suit :

$$t_f = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_{sw})}{2E_f \cdot 0,001} \quad \dots (A.37)$$

où :

$\sigma_{sw}$  est la contrainte de couture due aux cadres atteignant une déformation de 0,001 ( $\sigma_{sw} = 0,001 \rho_w E_s$ ), ou la pression active due à l'injection entre le polymère renforcé de fibres et le poteau, le cas échéant, tandis que  $\sigma_1$  représente la contrainte de couture sur la longueur de jonction par recouvrement  $L_s$ , donnée par :

$$\sigma_1 = \frac{A_s f_{yL}}{\left[ \frac{p}{2n} + 2(d_{bL} + c) \right] L_s} \quad \dots (A.38)$$

où :

$A_s$  est la section de chaque armature longitudinale recouverte,

$f_{yL}$  est la limite d'élasticité des armatures longitudinales, prise égale à la valeur moyenne obtenue à partir des essais *in-situ* et des sources d'information supplémentaires, multipliée par le coefficient de confiance approprié, CF, donné dans le Tableau 3.1 pour le niveau de connaissance approprié (voir 2.2.1(5)P),

$p$  est le périmètre, dans la section transversale du poteau, de la ligne longeant l'intérieur des armatures longitudinales,

$n$  est le nombre d'armatures recouvertes le long de  $p$ ,

$d_{bL}$  est le (plus grand) diamètre des barres longitudinales, et

$c$  est l'épaisseur de l'enrobage en béton.



(2) Dans le cas des poteaux rectangulaires, les expressions ci-dessus peuvent être utilisées en remplaçant  $D$  par  $b_w$ , la largeur de la section, et en réduisant l'efficacité du chemisage de polymère renforcé de fibres au moyen du coefficient défini en **A.4.4.3(4)**.

(3) Pour les éléments de section rectangulaire comportant des barres longitudinales recouvertes sur une longueur  $l_o$  à partir de la section d'extrémité de l'élément, une solution alternative à **(1)** et **(2)**, permettant de déterminer l'effet de l'enrobage de polymère renforcé de fibres disposé sur une longueur supérieure d'au moins 25 % à la longueur de recouvrement, consiste à appliquer **A.3.2.2(4)** :

- a) en tenant compte dans l'expression (A.3) seulement du confinement dû aux armatures transversales (exposant de la puissance 25 précédant le dernier terme), et
- b) en calculant  $l_{ou,min}$  comme  $l_{ou,min} = d_{bL} f_{yl} / [(1,05 + 14,5 \alpha_{i,f} \rho_f f_{f,e} / f_c) \sqrt{f_c}]$  sur la base seulement du polymère renforcé de fibres, avec  $\alpha_{i,f} = 4/n_{tot}$ , et avec  $\rho_f$ ,  $f_{f,e}$  et  $n_{tot}$  définis comme mentionné au **A.4.4.3(6)** pour le polymère renforcé de fibres