

$$\begin{cases} \Delta U = \lambda_{\min} \Delta U + (1 - \lambda_{\min}) \Delta U \\ \Delta F = \lambda_{\min} \Delta F + (1 - \lambda_{\min}) \Delta F \end{cases} \quad (4.142)$$

$\Delta U$  est la somme de deux termes, le premier terme  $\lambda_{\min} \Delta U$  sera retenu pour donner l'état de la structure et actualiser la matrice de rigidité de la structure afin de procéder à l'itération suivante.  $\Delta F$  est la somme de deux termes, le premier terme  $\lambda_{\min} \Delta F$  a déjà servi pour donner l'incrément de déplacement  $\lambda_{\min} \Delta U$ , le deuxième terme  $(1 - \lambda_{\min}) \Delta F$  sera retenu pour effectuer l'itération suivante si  $\lambda_{\min} < 1$ .

#### 4.6. DECOMPOSITION DES LOIS DE COMPORTEMENT DES MATERIAUX CONSTITUANTS LES FIBRES DE LA POUTRE

Les lois constitutives des fibres de la poutre sont décomposées en sous lois élémentaires du type élasto-plastique parfaite, cette technique suppose que chaque fibre est remplacée par un ensemble de sous fibres qui agissent en parallèles. Cette décomposition est illustrée aux figures 4.6 et 4.7.

La loi de comportement de la fibre est approchée par un modèle multilinéaire. Les modules successifs d'écrouissage sont donnés par le rapport des incréments de contraintes aux incréments de déformations.

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \\ E_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \\ E_i = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}} \\ E_n = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}} \end{cases} \quad (4.143)$$

Si une fibre se trouve dans un état de contrainte déformation  $\sigma - \varepsilon$  tel que  $\sigma_i < \sigma < \sigma_{i+1}$  et  $\varepsilon_i < \varepsilon < \varepsilon_{i+1}$ , selon le schéma des figures (4.6 et 4.7) on peut écrire la relation entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$ .

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1 + E_2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \dots + E_{i+1} (\varepsilon - \varepsilon_i) \quad (4.144)$$

La relation (4.144) peut se mettre sous la forme modifiée

$$\begin{aligned} \sigma = & (E_1 - E_2) \varepsilon_1 + (E_2 - E_3) \varepsilon_2 + \dots + (E_i - E_{i+1}) \varepsilon_i + (E_{i+1} - E_{i+2}) \\ & + \dots + ((E_{n-1} - E_n) \varepsilon + E_n \varepsilon \end{aligned} \quad (4.145)$$

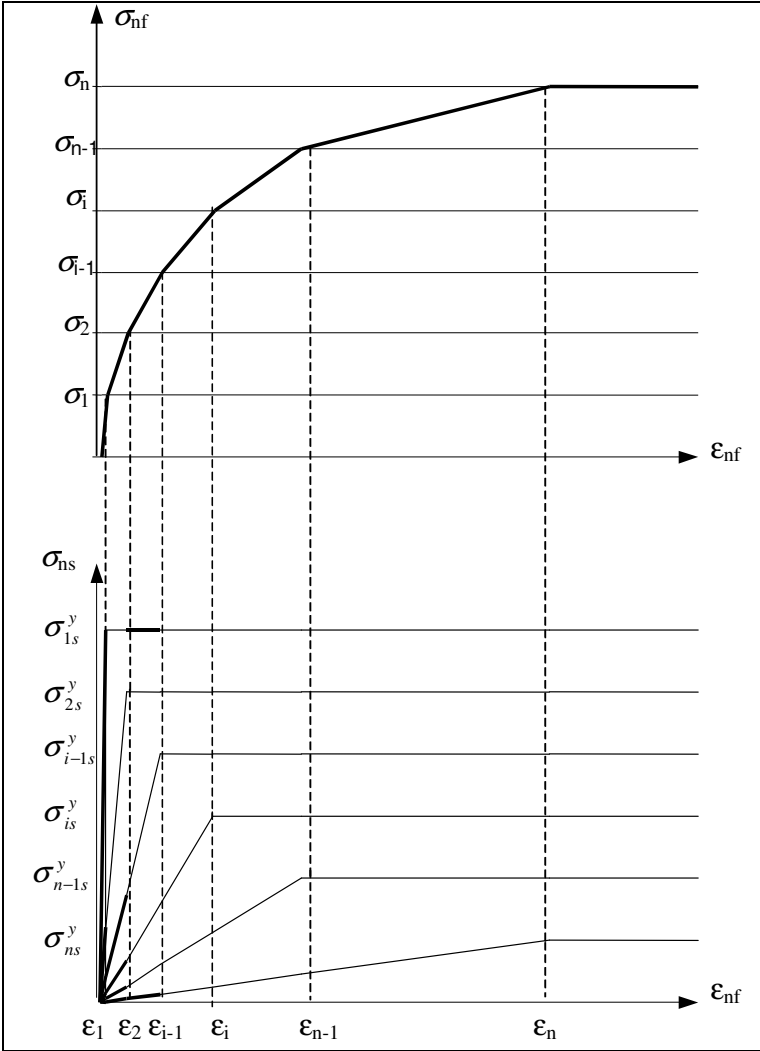


Figure 4.6. Décomposition de la loi de comportement de la fibre

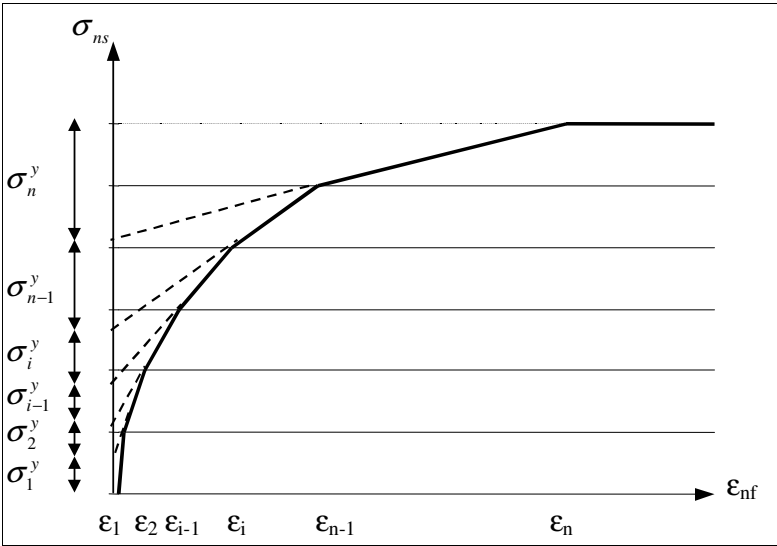


Figure 4.7. Cumul des limites élastiques dans les sous fibres

Si on pose

$$\begin{cases} E_{1s} = E_1 - E_2 \\ E_{is} = E_i - E_{i+1} \\ E_{n-1s} = E_{n-1} - E_n \\ E_{ns} = E_n \end{cases} \quad (4.146)$$

Les contraintes dans les sous fibres sont données par la relation suivante:

$$\begin{cases} \sigma_{1s}^y = (E_1 - E_2)\varepsilon_1 = E_{1s} \cdot \varepsilon_1 \\ \sigma_{2s}^y = (E_2 - E_3)\varepsilon_2 = E_{2s} \cdot \varepsilon_2 \\ \sigma_{is}^y = (E_i - E_{i+1})\varepsilon_i = E_{is} \cdot \varepsilon_i \\ \sigma_{n-1s}^y = (E_{n-1} - E_n)\varepsilon_{n-1} = E_{n-1s} \cdot \varepsilon_{n-1} \\ \sigma_{ns}^y = E_n \cdot \varepsilon_n = E_{ns} \cdot \varepsilon_n \end{cases} \quad (4.147)$$

La relation (4.145) justifie la décomposition de la loi de comportement en sous lois élasto-plastiques parfaites de modules d'élasticité  $E_{ns}$  et de limite élastique  $\sigma_{ns}^y$ , les sous fibres se trouvent dans le même état de déformation que la fibre qu'ils composent et la contrainte dans la fibre est égale à la somme des contraintes dans les sous fibres.

## 4.7. EVALUATION DE L'ETAT INCREMENTAL DU A L'INCREMENT DE DEPLACEMENT

Entre les instants  $t$  et  $t + \Delta t$  l'état efforts déplacements généralisés de la structure passe de  $(F, U)$  à  $(F + \Delta F, U + \Delta U)$ , il en résulte un changement d'état dans les fibres de chaque élément, dans une fibre  $nf$  quelconque l'état de déformation passe de  $\varepsilon_{nf}$  à  $\varepsilon_{nf} + d\varepsilon_{nf}$  comme indiqué à la figure 4.8. Connaissant l'incrément de déplacement généralisé  $\Delta U$ , une suite d'opérations permet de déterminer l'incrément de déformation  $d\varepsilon_{nf}$  dans chaque fibre des éléments poutre de la structure.

A l'aide d'une fonction spéciale on peut extraire du vecteur incrément déplacement  $\Delta U$  généralisé de la structure le vecteur incrément déplacement de l'élément  $\Delta U^e$ . Le vecteur incrément déformation de l'élément  $du^e$  se déduit du vecteur déplacement de l'élément  $\Delta U^e$  à l'aide d'une transformation

### 4.7.1. CALCUL DES INCREMENTS DE DEFORMATION DANS L'ELEMENT

Les incréments de déformation dans l'élément sont obtenus en multipliant la matrice de transformation générale par le vecteur incrément de déplacement de l'élément.

$$du^e = \begin{Bmatrix} du \\ d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{Bmatrix} = (TRGL)\Delta U^e \quad (4.148)$$

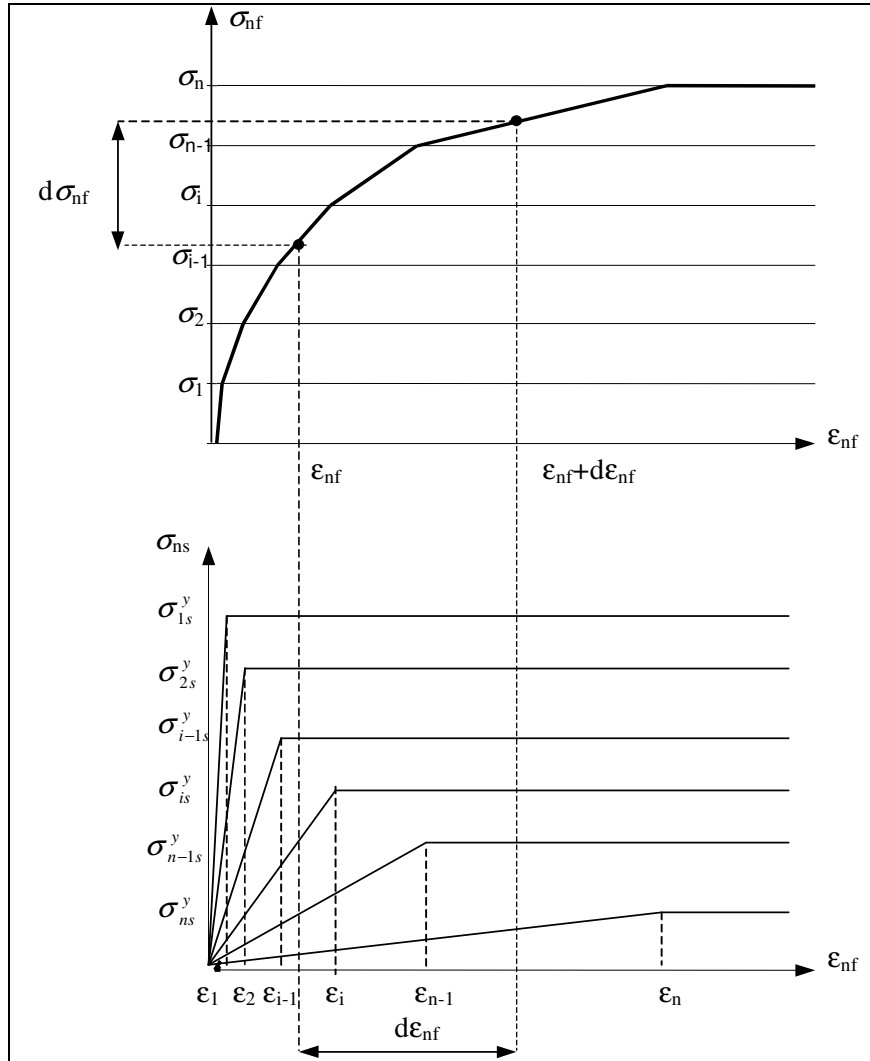


Figure 4.8. Loi de comportement avec spécification d'incrément de déformation.

#### 4.7.2. CALCUL DE L'INCREMENT D'EFFORTS DANS L'ELEMENT

Connaissant les incréments de déformation dans l'élément on calcule les incréments d'efforts correspondants aux extrémités de l'élément en utilisant les équations (4.132) sous forme incrémentale

$$\begin{pmatrix} dN \\ dM_1 \\ dM_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11}^e & k_{12}^e & k_{13}^e \\ k_{21}^e & k_{22}^e & k_{23}^e \\ k_{31}^e & k_{32}^e & k_{33}^e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} du \\ d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{pmatrix} \quad (4.149)$$

#### 4.7.3. CALCUL DE L'INCREMENT D'EFFORTS DANS LE SEGMENT i

L'incrément d'effort normal  $dN$  se transmet intégralement à chaque segment. L'incrément de moment est calculé au milieu de chaque segment en utilisant la formule

$$dM = dM_1 \left( 1 - \frac{x_i + x_{i-1}}{2l} \right) + dM_2 \cdot \frac{x_i + x_{i-1}}{2l} \quad (4.150)$$

#### 4.7.4. EVALUATION DE L'INCREMENT DE DEFORMATION ET DE COURBURE DANS LA FIBRE DE REFERENCE DU SEGMENT i

On écrit les équations (4.68) et (4.72) sous forme incrémentale

$$\begin{cases} d\varepsilon = f_{11}^i . dN + f_{12}^i . dM \\ d\chi = f_{12}^i . dN + f_{22}^i . dM \end{cases} \quad (4.151)$$

#### 4.7.5. EVALUATION DE L'INCREMENT DE DEFORMATION DANS UNE FIBRE QUELCONQUE DU SEGMENT i

L'hypothèse, toute section plane reste plane après déformation, permet d'écrire :

$$d\varepsilon_{nf} = d\varepsilon + y_{nf} d\chi \quad (4.152)$$

Connaissant  $d\varepsilon_{nf}$  on peut calculer l'incrément de contrainte dans chaque sous fibre.

### 4.8. EVALUATION DU FACTEUR MINIMUM $\lambda_{pmin}$ DE L'ELEMENT POUTRE

#### 4.8.1. MARGE DE PRECISION

On affecte à la limite élastique  $\sigma_{ns}^y$  de la sous fibre une marge de précision notée  $\delta_{tol}$ . Dans une itération à l'intérieur d'un pas de temps,  $\delta_{tol}$  permet de réduire l'incrément de déformation dans une fibre de façon à ce que dans une sous fibre ; la valeur absolue de la contrainte n'excède jamais  $\sigma_{ns}^y + \delta_{tol}$  quand la sous fibre passe de l'état élastique à l'état plastique et la valeur absolue de l'incrément de contrainte n'excède jamais  $\delta_{tol}$  quand la sous fibre passe de l'état plastique à l'état élastique selon le motif représenté en figure 4.9

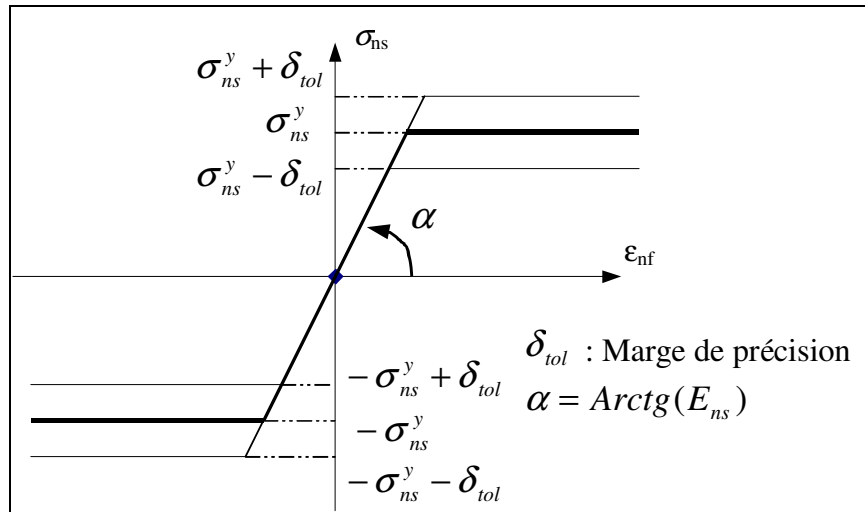


Figure 4.9. Loi de comportement de la sous fibre avec spécification d'une marge de précision  $\delta_{tol}$

#### 4.8.2 CALCUL DU FACTEUR D'EVENEMENT $\lambda$ DANS UNE SOUS FIBRE

L'expression du facteur d'événement  $\lambda$  est donnée en fonction de l'état initiale de la sous fibre, de l'incrément de contrainte  $d\sigma_{ns}$  et de la marge de précision  $\delta_{tol}$

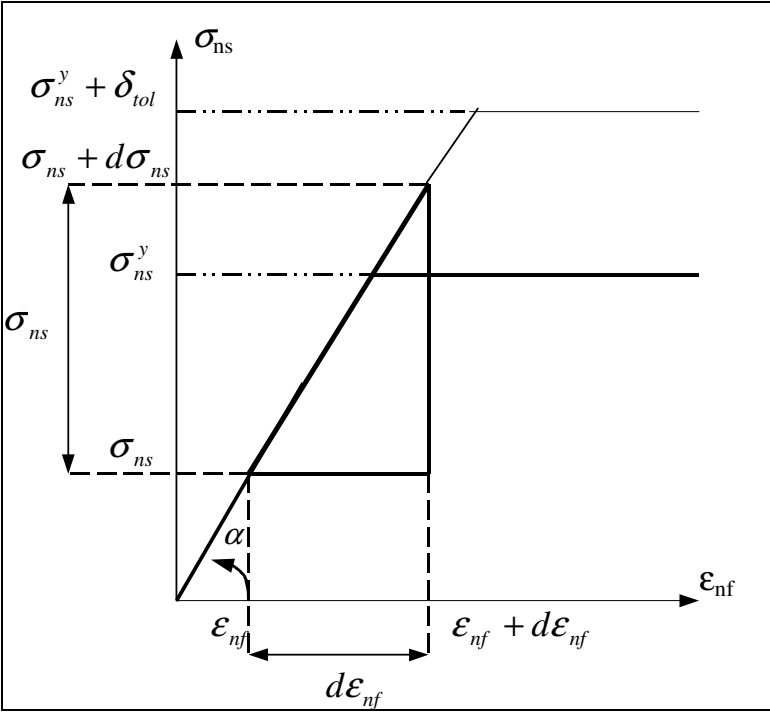


Figure 4.10. L'état final est à l'intérieur de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$

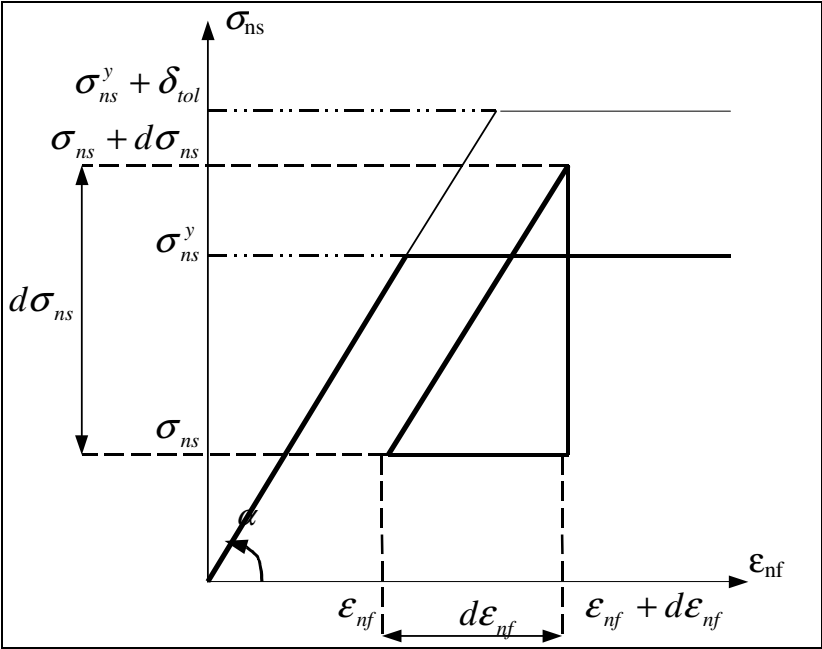


Figure 4.11. L'état final est à l'intérieur de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$

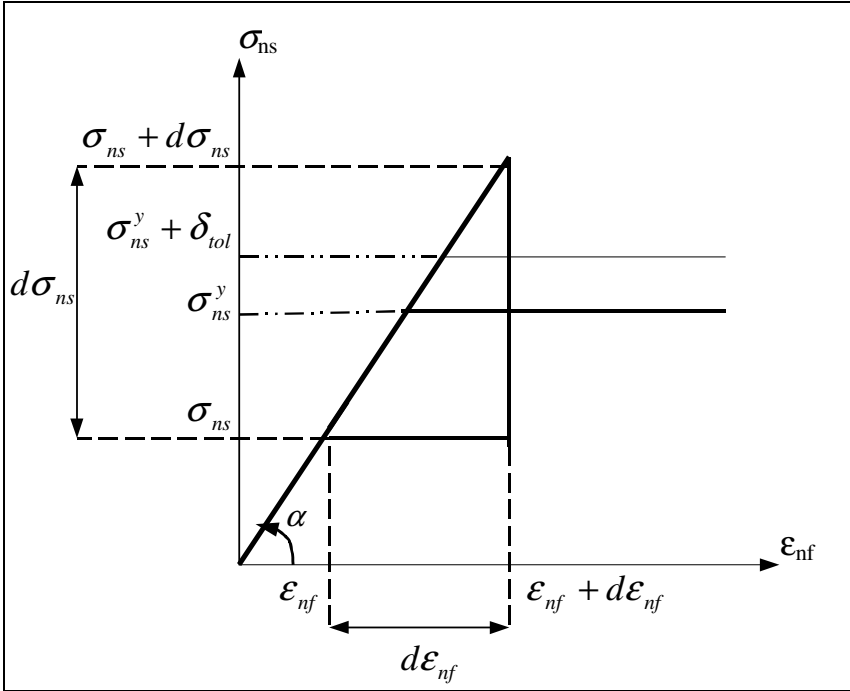


Figure 4.12. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{\sigma_{ns}^y + \delta_{tol} - \sigma_{ns}}{d\sigma_{ns}} \quad \text{avec } d\sigma_{ns} = E_{ns} d\epsilon_{nf}$$

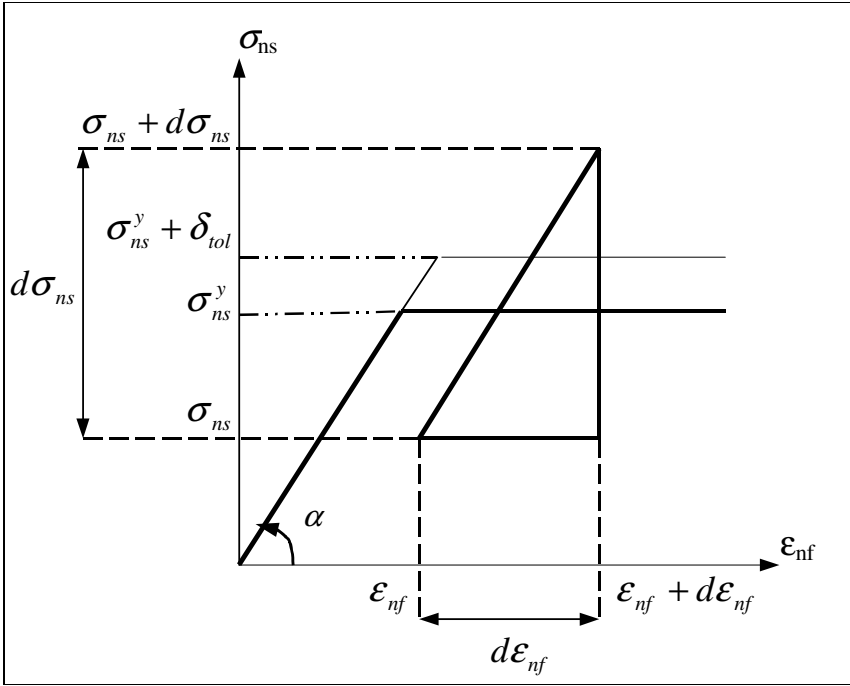


Figure 4.13. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{\sigma_{ns}^y + \delta_{tol} - \sigma_{ns}}{d\sigma_{ns}} \quad \text{avec } d\sigma_{ns} = E_{ns} d\epsilon_{nf}$$

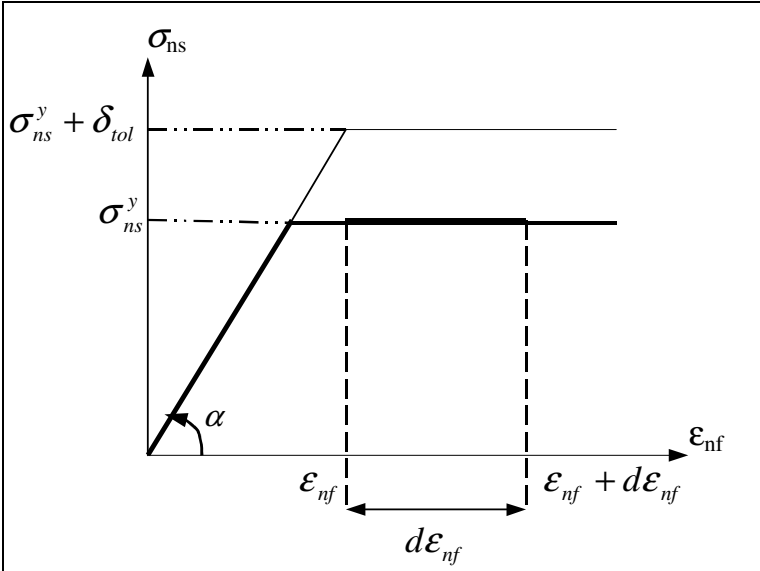


Figure 4.14. Incrément sans changement d'état  
 $\lambda = 1.0$

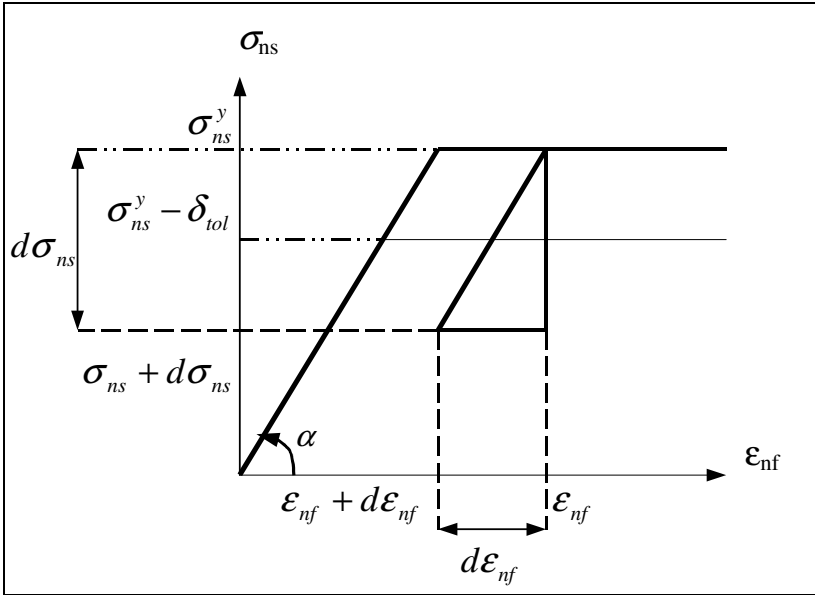


Figure 4.15. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-stol}{E_{ns} \cdot d\epsilon_{nf}} = \frac{-stol}{d\sigma_{ns}}$$



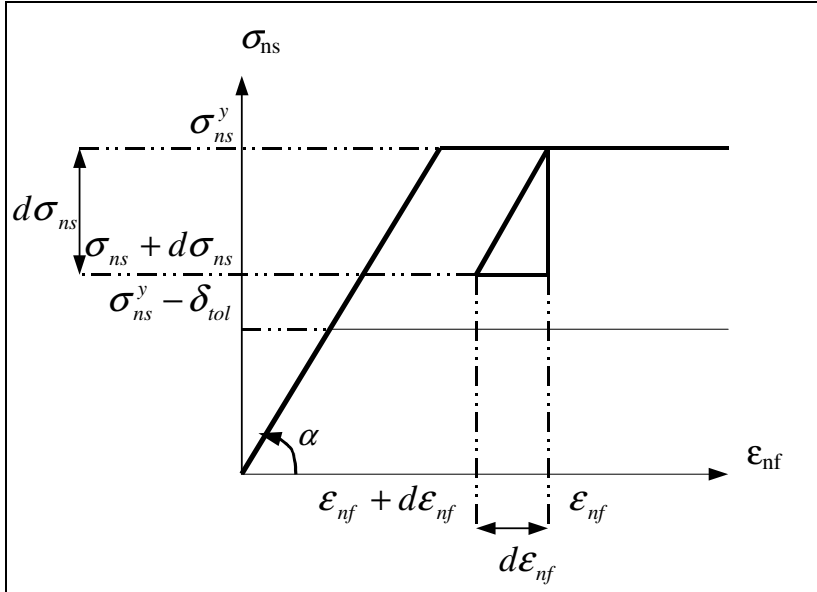


Figure 4.16. L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$

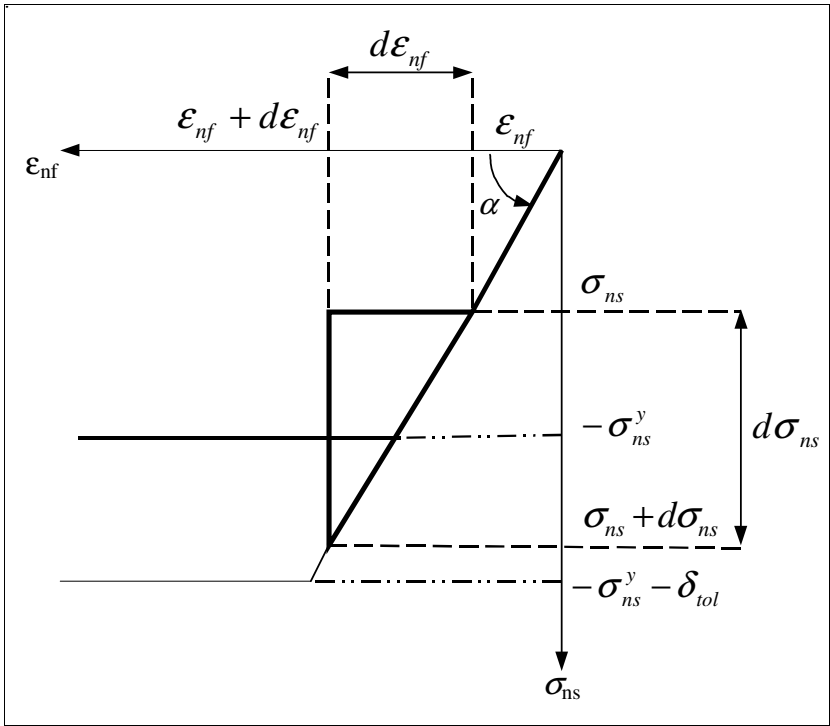
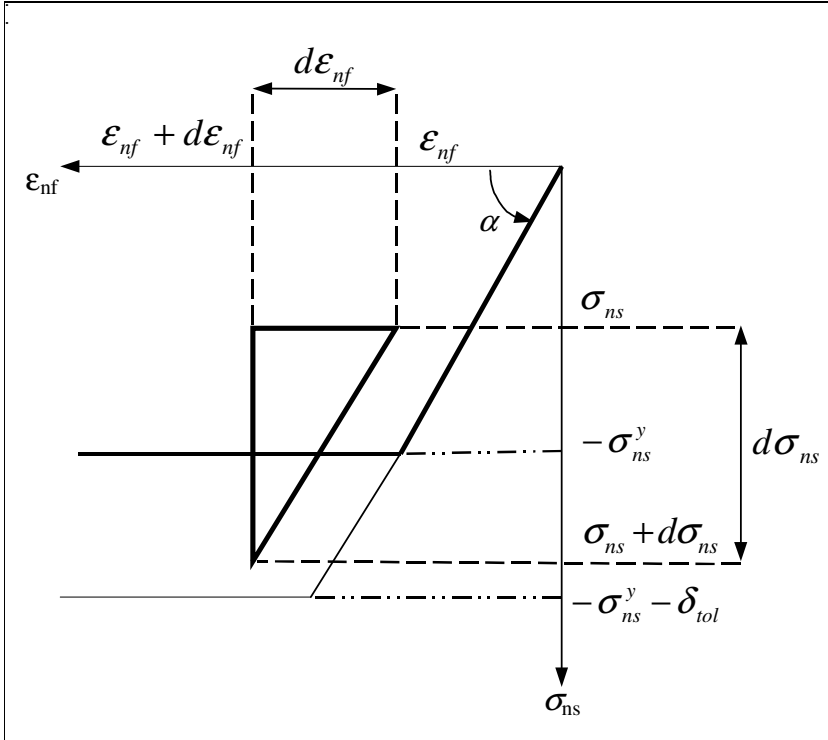
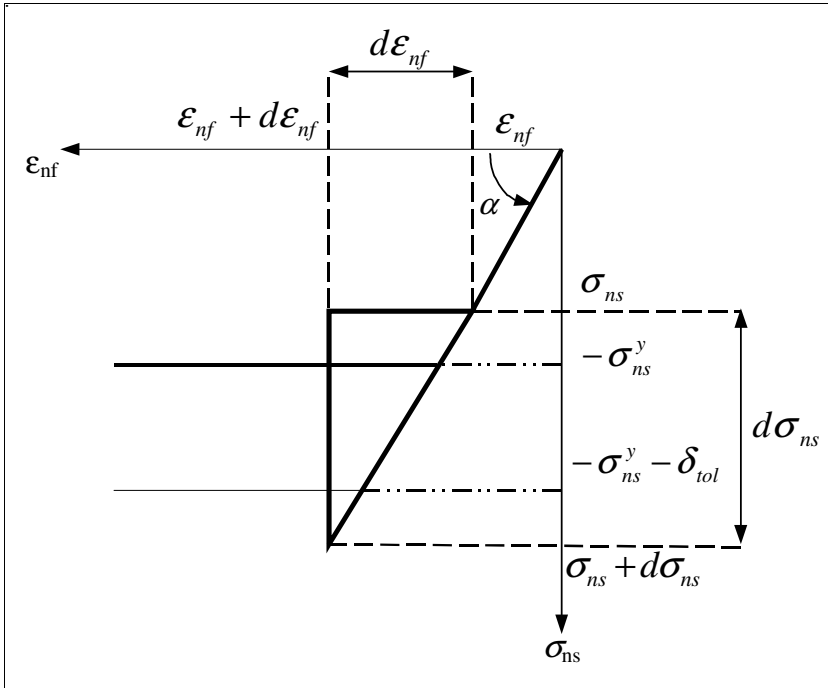


Figure 4.17. L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$



**Figure 4.18.** L'état final est à l'intérieur de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$



**Figure 4.19.** L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-\sigma_{ns}^y - \delta_{tol} - \sigma_{ns}}{d\sigma_{ns}} \quad \text{avec } d\sigma_{ns} = E_{ns} d\varepsilon_{nf}$$

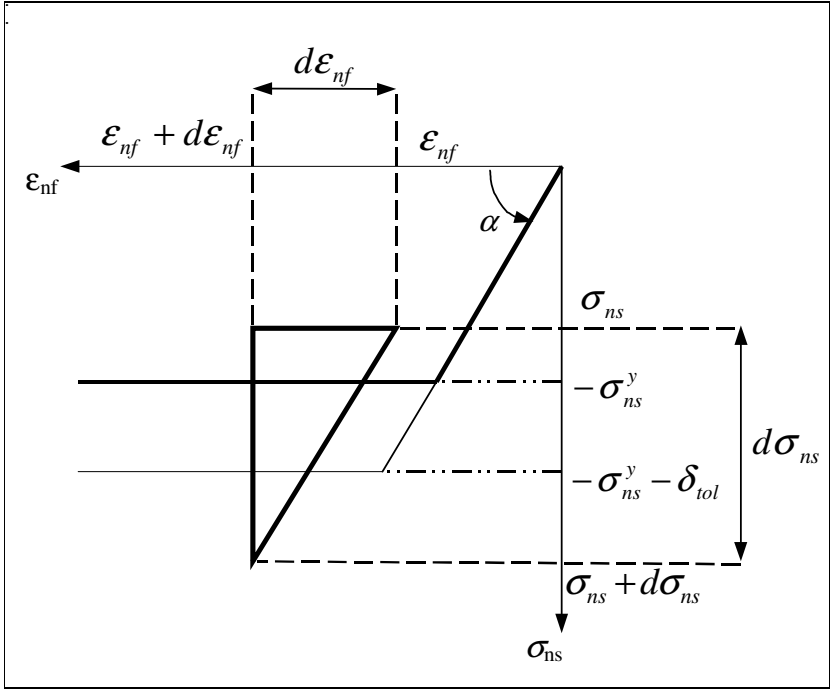


Figure 4.20. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-\sigma_{ns}^y - \delta_{tol} - \sigma_{ns}}{d\sigma_{ns}} \quad \text{avec } d\sigma_{ns} = E_{ns} d\epsilon_{nf}$$

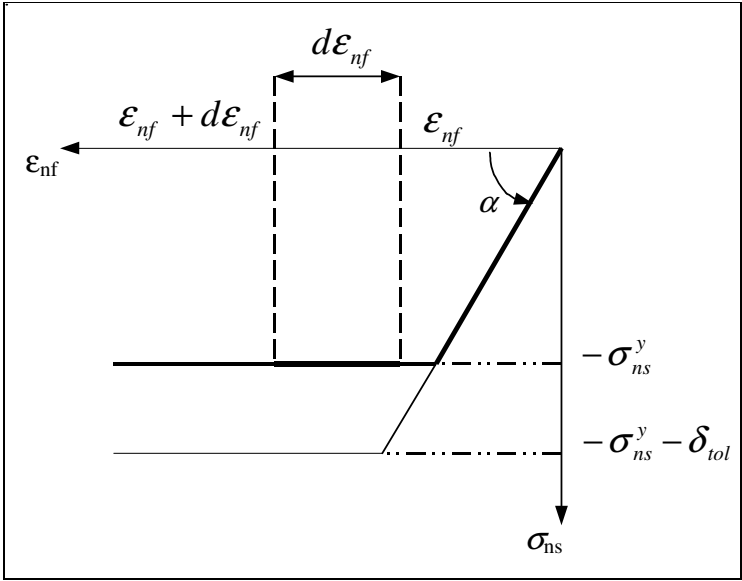


Figure 4.21. Incrément sans changement d'état

$$\lambda = 1.0$$

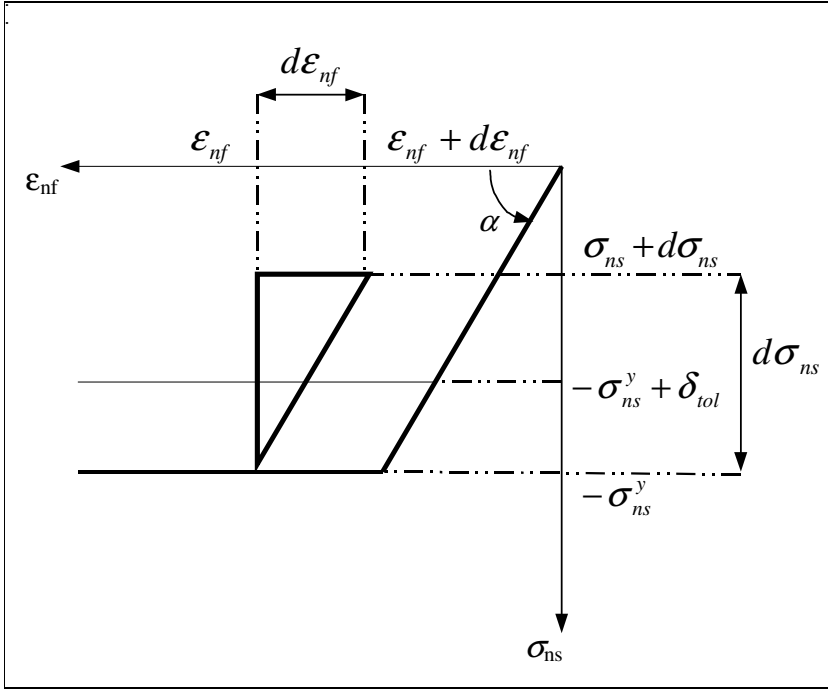


Figure 4.22. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{\delta_{tol}}{d\sigma_{ns}} = \frac{\delta_{tol}}{E_{ns} \cdot d\epsilon_{ns}}$$

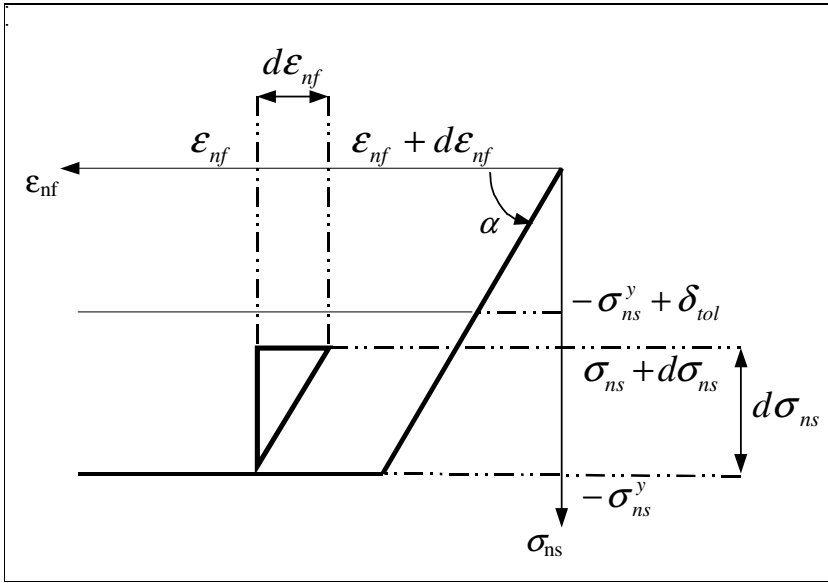


Figure 4.23. L'état final est à l'intérieur de la marge de précision

$$\lambda = 1.0$$

Une sous fibre quelconque de l'élément se trouve dans un état unique parmi les états que nous venons d'envisager, le facteur d'événement  $\lambda$  à retenir est celui correspondant à cet état. Ce calcul est organisé de manière à être répété pour toutes les sous fibres qui composent la structure, le bouclage se fera sur les sous fibres de la fibre, sur les fibres d'un segment, sur les segments d'un élément et en fin sur tous les éléments poutre de la structure. On retiendra la valeur minimum de tous les facteurs d'événement ainsi calculés, cette valeur est notée  $\lambda_{p\min}$

#### 4.8.3. CALCUL DU FACTEUR D'EVENEMENT TENANT COMPTE DE L'EFFET DE LA VITESSE DE DEFORMATION

Pendant un pas de temps  $\Delta t$  la fibre  $nf$  subit un incrément d'allongement  $\Delta \epsilon_{nf}$ , la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}_{pnf} = \frac{\Delta \epsilon_{nf}}{\Delta t}$  influence la loi de comportement de la fibre et par conséquent la loi de comportement de chaque sous fibre qui compose cette fibre, la limite élastique de la sous fibre est modifiée par l'effet de la vitesse de déformation. Si on désigne par  $\sigma_{ns}^y$  la limite élastique dynamique de la sous fibre d'après PERZYNA [P1]

$$\sigma_{ns}^{'y} = \sigma_{ns}^y \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_{pnf}}{\gamma} \right)^{1/\delta} \right] \quad (4.153)$$

Le calcul du facteur d'événement  $\lambda$  considérant l'effet de la vitesse de déformation utilise la même procédure explicitée ci dessus, il suffira de remplacer la limite élastique statique  $\sigma_{ns}^y$  par la limite élastique dynamique  $\sigma_{ns}^{'y}$  dans la loi de comportement de la sous fibre qui est donnée par l'expression (4.153)

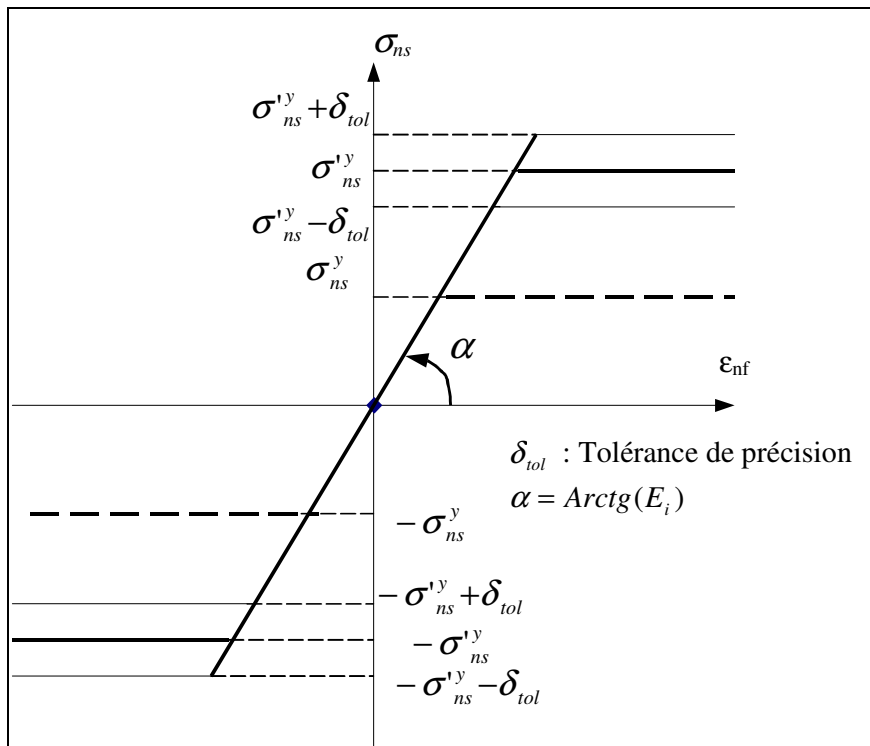


Figure 4.24. La loi de comportement de la sous fibre influencée par l'effet de la vitesse de déformation

#### 4.9. DECOMPOSITION DE LA LOI DU COMPORTEMENT DE L'ASSEMBLAGE EN SOUS LOIS ELEMENTAIRES

La loi constitutive moment rotation de l'assemblage est décomposé en sous lois élémentaires du type élasto-plastiques parfaites, cette technique suppose que l'assemblage poutre-poteau est remplacé par un ensemble de ressorts élémentaires qui agissent en parallèles. Cette décomposition est illustrée aux figures 4.25 et 4.26

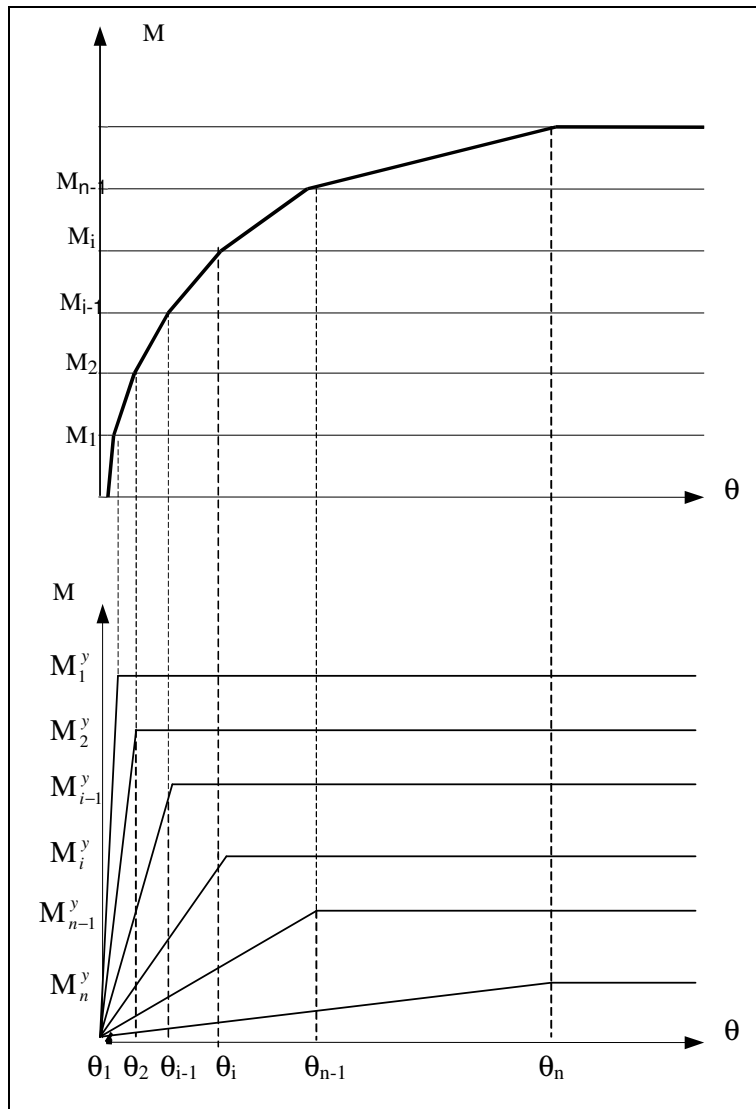


Figure 4.25. Décomposition de la loi de comportement de l'assemblage

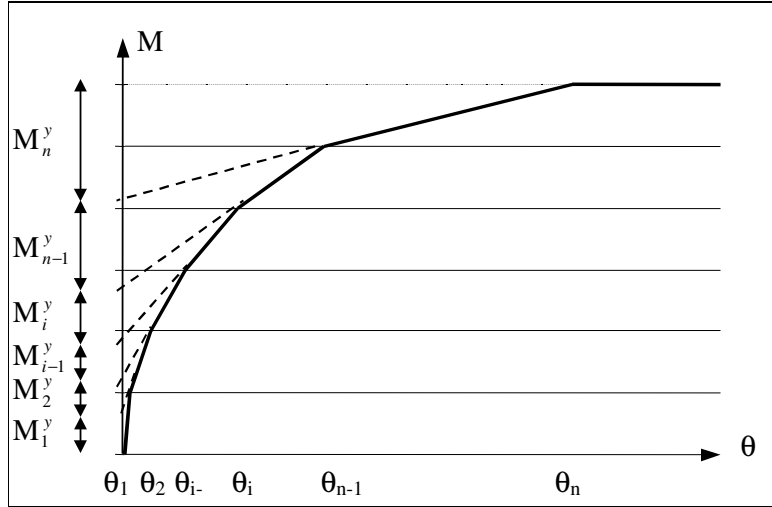


Figure 4.26. Cumul des moments plastiques dans l'assemblage

La loi de comportement de l'assemblage est approchée par un modèle multilinéaire, en suivant la même procédure que nous avons adoptée pour l'élément poutre au paragraphe 4.6. Les rigidités successives d'érouissage sont obtenues comme les rapports entre les incréments des moments aux incréments des rotations respectifs

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1^a = \frac{M_1}{\theta_1} \\ K_2^a = \frac{M_2 - M_1}{\theta_2 - \theta_1} \\ K_i^a = \frac{M_i - M_{i-1}}{\theta_i - \theta_{i-1}} \\ K_n^a = \frac{M_n - M_{n-1}}{\theta_n - \theta_{n-1}} \end{array} \right. \quad (4.154)$$

Si l'assemblage se trouve dans un état moment-rotation  $M - \theta$  tel que  $M_i < M < M_{i+1}$  et  $\theta_i < \theta < \theta_{i+1}$  selon le schéma de la figure 4.25 on peut écrire la relation entre  $M$  et  $\theta$

$$M = K_1^a \theta_1 + K_2^a (\theta_2 - \theta_1) + \dots + K_{i+1}^a (\theta - \theta_i) \quad (4.155)$$

La relation (4.155) peut se mettre sous la forme modifiée

$$M = (K_1^a - K_2^a) \theta_1 + (K_2^a - K_3^a) \theta_2 + \dots + (K_i^a - K_{i+1}^a) \theta_i + \dots + (K_{n-1}^a - K_n^a) \theta_{n-1} + K_n^a \theta \quad (4.156)$$

Si on pose

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 = K_1^a - K_2^a \\ K_2 = K_2^a - K_3^a \\ K_i = K_i^a - K_{i+1}^a \\ K_{n-1} = K_{n-1}^a - K_n^a \\ K_n = K_n^a \end{array} \right. \quad (4.157)$$

On trouve :

$$\begin{cases} M_1^y = (K_1^a - K_2^a)\theta_1 = K_1\theta_1 \\ M_2^y = (K_2^a - K_3^a)\theta_2 = K_2\theta_2 \\ M_i^y = (K_i^a - K_{i+1}^a)\theta_i = K_i\theta_i \\ M_{n-1}^y = (K_{n-1}^a - K_n^a)\theta_{n-1} = K_{n-1}\theta_{n-1} \\ M_n^y = K_n^a\theta_n = K_n\theta_n \end{cases} \quad (4.158)$$

La relation ( 4.155) justifie la décomposition de la loi de comportement de l'assemblage en sous lois élasto-plastiques parfaites de rigidité  $K_i$  et de moment plastique  $M_i^y$  les ressorts se trouvent dans le même état de déformation que l'assemblage qu'ils composent et le moment dans l'assemblage est égal à la somme des moments dans les ressorts

#### 4.10. EVALUATION DE L'ETAT INCREMENTAL DU A L'INCREMENT DE DEPLACEMENT

##### 4.10.1. CALCUL DES INCREMENTS DE ROTATION DANS LES NŒUDS DE L'ASSEMBLAGE

Entre les instants  $t$  et  $t + \Delta t$  l'état efforts déplacements généralisés de la structure passe de  $(F, U)$   $(F + \Delta F, U + \Delta U)$ , si  $j$  représente nœud origine et  $k$  nœud extrémité de l'assemblage. A l'aide d'une fonction spéciale on peut extraire du vecteur incrément déplacement  $\Delta U$  généralisé de la structure les incréments de rotation  $\Delta\theta_j$  et  $\Delta\theta_k$  respectivement des nœuds  $j$  et  $k$ , l'incrément de rotation  $d\theta$  dans l'assemblage est égal à l'incrément de rotation relative des nœuds  $j$  et  $k$ .

$$d\theta = \Delta(\theta_k - \theta_j) \quad (4.159)$$

##### 4.10.2. CALCUL DE L'INCREMENT DE ROTATION DANS LES RESSORTS ELEMENTAIRES

Les ressorts qui composent l'assemblage sont disposés en parallèles, ils possèdent même origine et même extrémité que l'assemblage lui-même, donc l'incrément de rotation dans le ressort reste égal à l'incrément de rotation dans l'assemblage.

##### 4.10.3. CALCUL DE L'INCREMENT DE MOMENT DANS LES RESSORTS ELEMENTAIRES

L'incrément de moment  $dM_i$  dans le ressort dû à l'incrément de rotation  $d\theta$  est donné par :

$$dM_i = K_i d\theta \quad (4.160)$$



#### 4.11. CALCUL DU FACTEUR MINIMUM $\lambda_{amin}$ DE L'ASSEMBLAGE

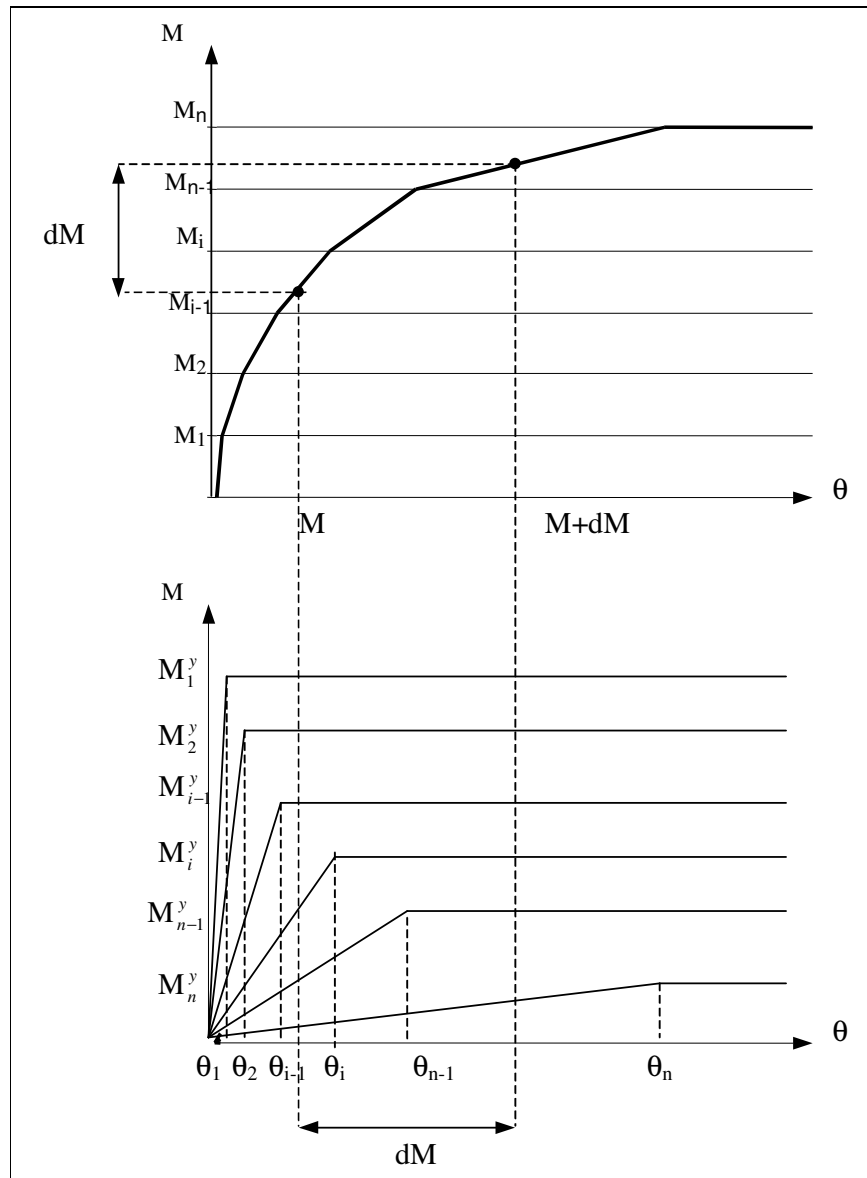
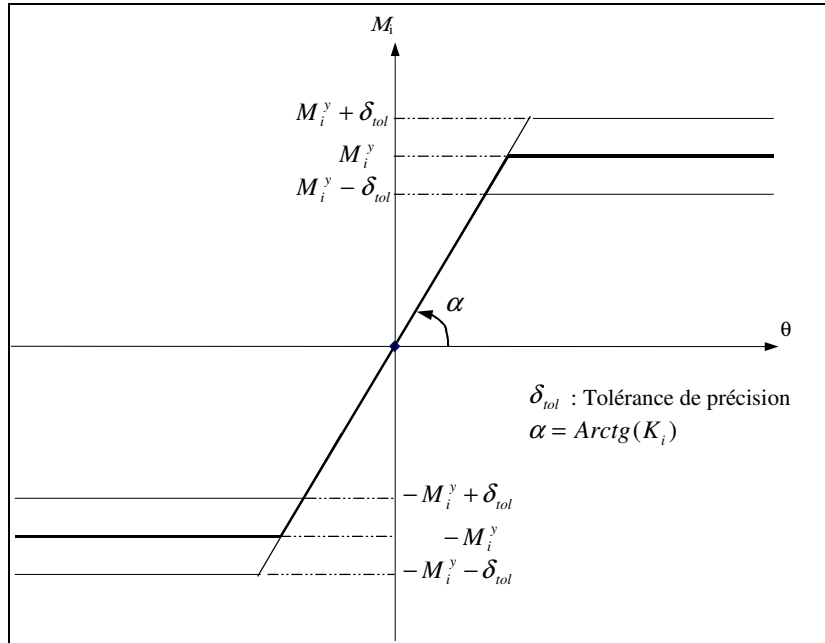


Figure 4.27. Loi de comportement avec spécification d'incrément de rotation.

##### 4.11.1. MARGE DE PRECISION

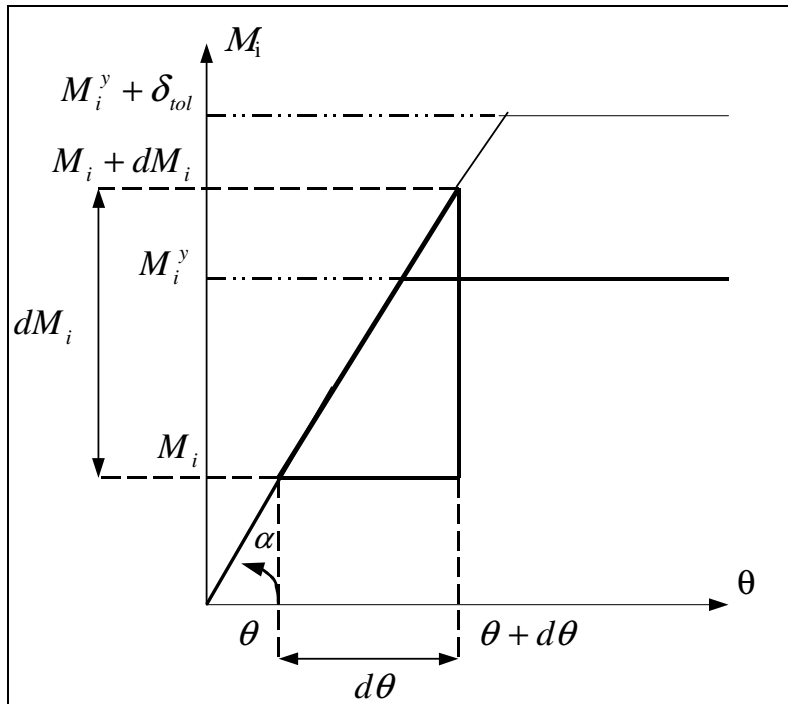
On affecte au moment plastique  $M_i^y$  une marge de précision notée  $\delta_{tol}$ . Dans une itération à l'intérieur d'un pas de temps,  $\delta_{tol}$  permet de réduire l'incrément de rotation dans l'assemblage de façon à ce que dans un ressort ; la valeur absolue du moment n'excède jamais  $M_i + \delta_{tol}$  quand le ressort passe de l'état élastique à l'état plastique et la valeur absolue de l'incrément du moment n'excède jamais  $\delta_{tol}$  quand le ressort passe de l'état plastique à l'état élastique selon les motifs représentés en figure 4.28



**Figure 4.28.** Loi de comportement du ressort élémentaire avec spécification d'une marge de précision  $\delta_{tol}$

#### 4.11.2. CALCUL DU FACTEUR D'EVENEMENT $\lambda$ DANS UN RESSORT

L'expression du facteur d'événement  $\lambda$  est donnée en fonction de l'état initiale du ressort, de l'incrément du moment  $dM_i$  et de la marge de précision  $\delta_{tol}$



**Figure 4.29.** L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  $\lambda = 1.0$





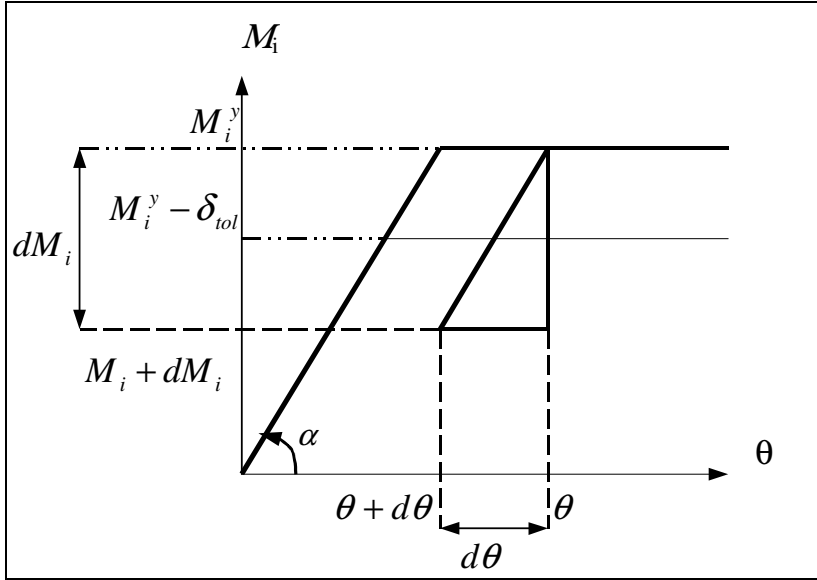


Figure 4.34. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-\delta_{tol}}{dM_i} \text{ avec } dM_i = K_i d\theta$$

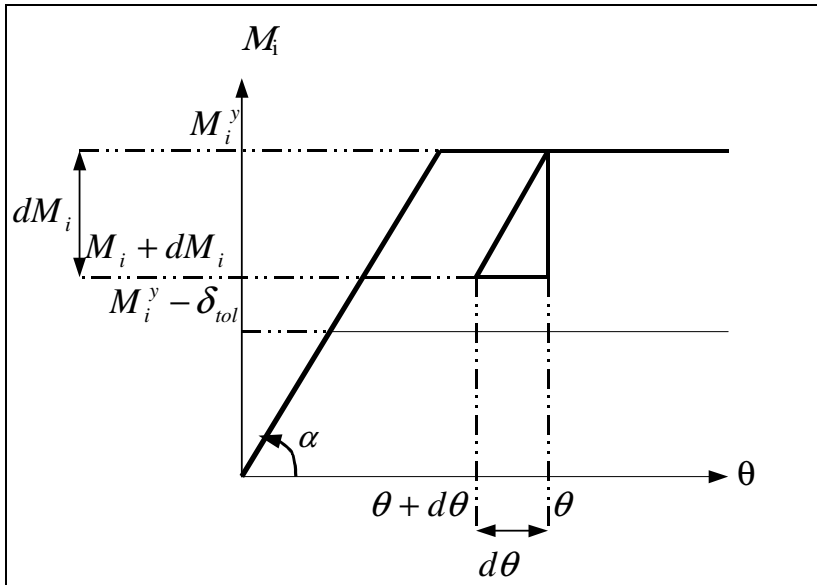
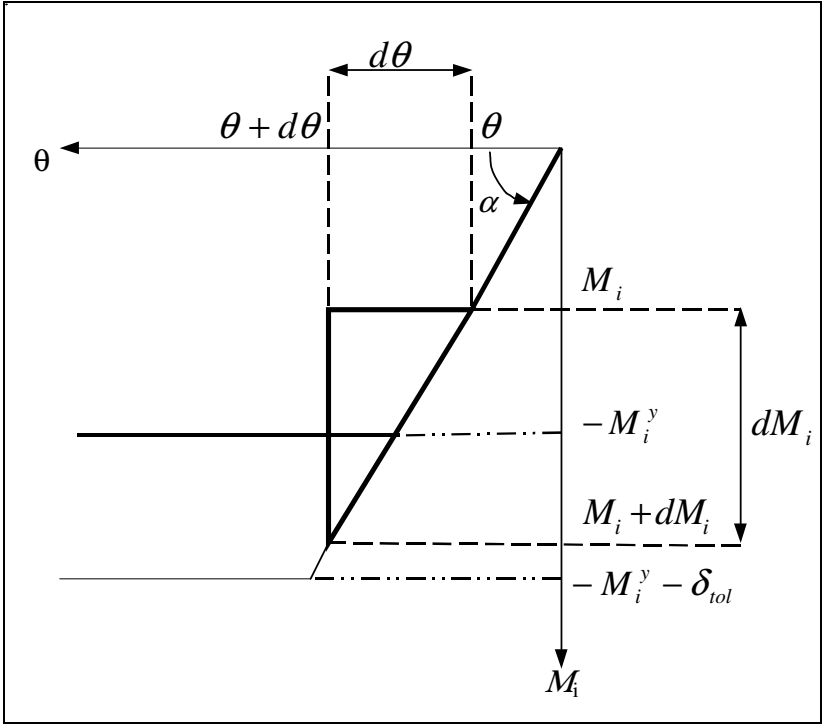
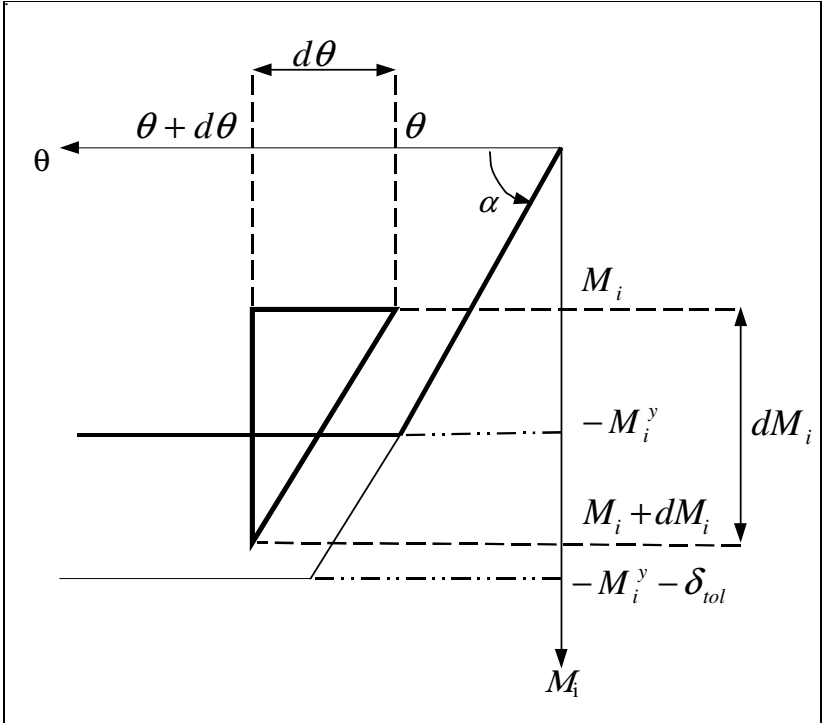


Figure 4.35. L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$



**Figure 4.36.** L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$



**Figure 4.37.** L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$

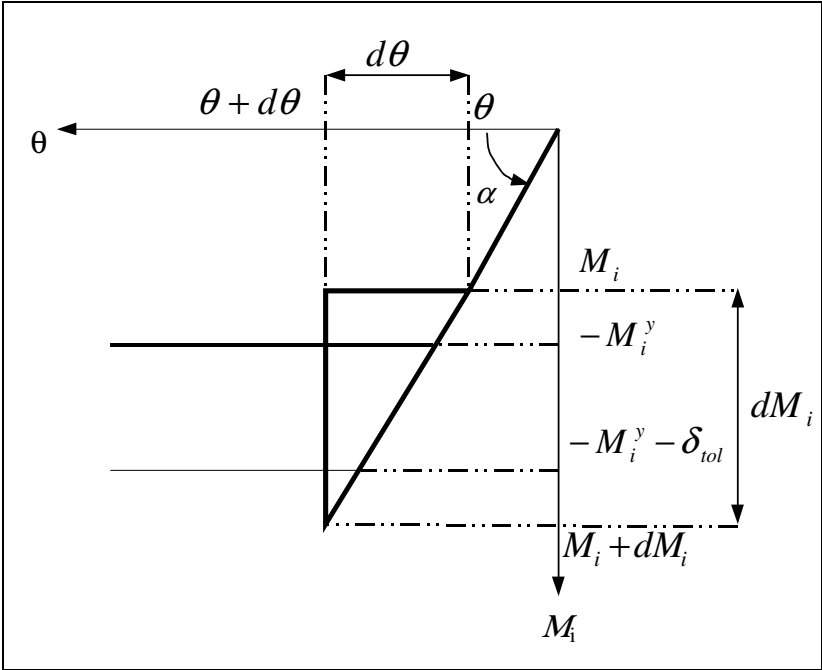


Figure 4.38. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-M_i^y - \delta_{tol} - M_i}{dM_i} \text{ avec } dM_i = K_i d\theta$$

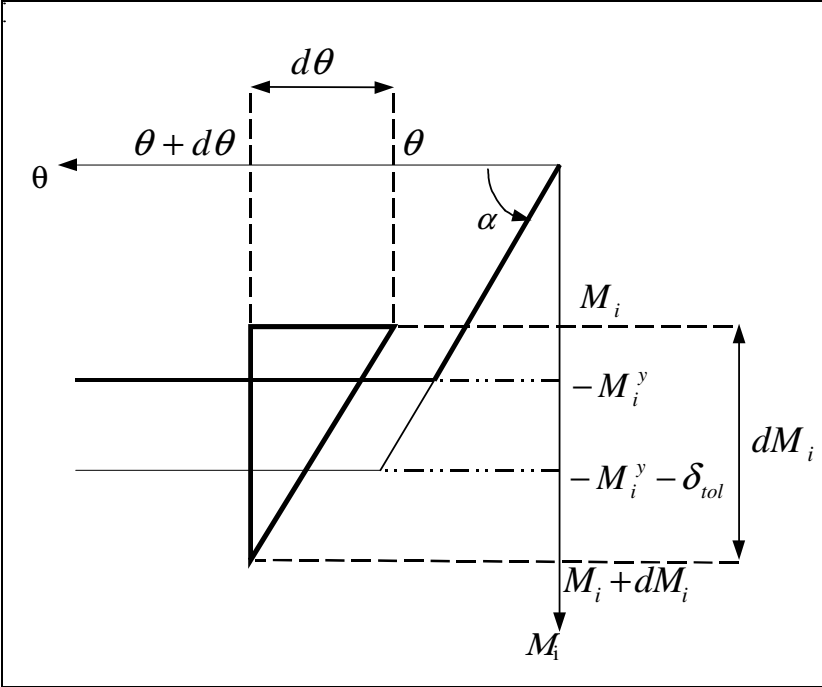
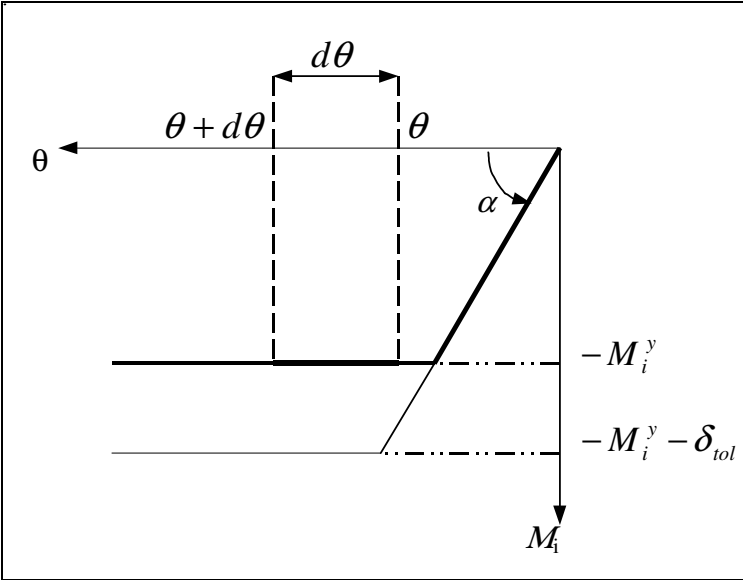
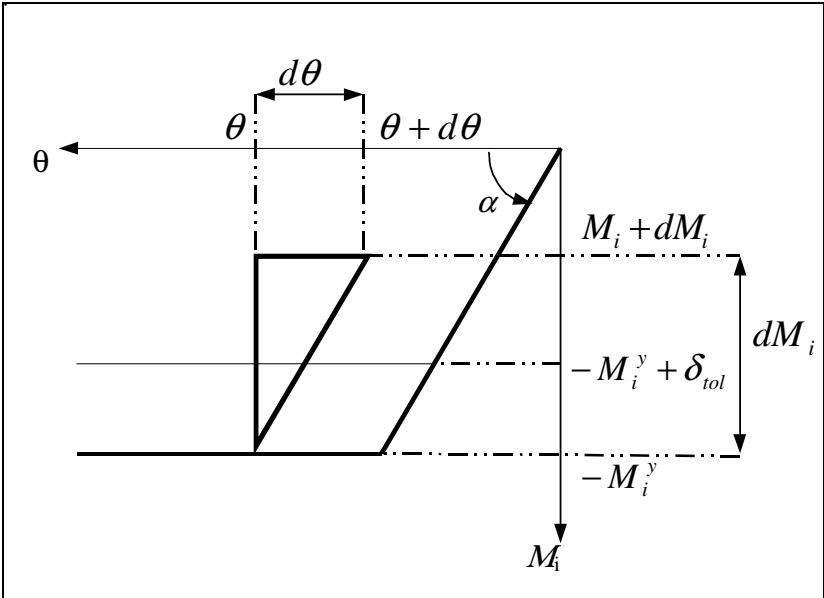


Figure 4.39. L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{-M_i^y - \delta_{tol} - M_i}{dM_i} \text{ avec } dM_i = K_i d\theta$$



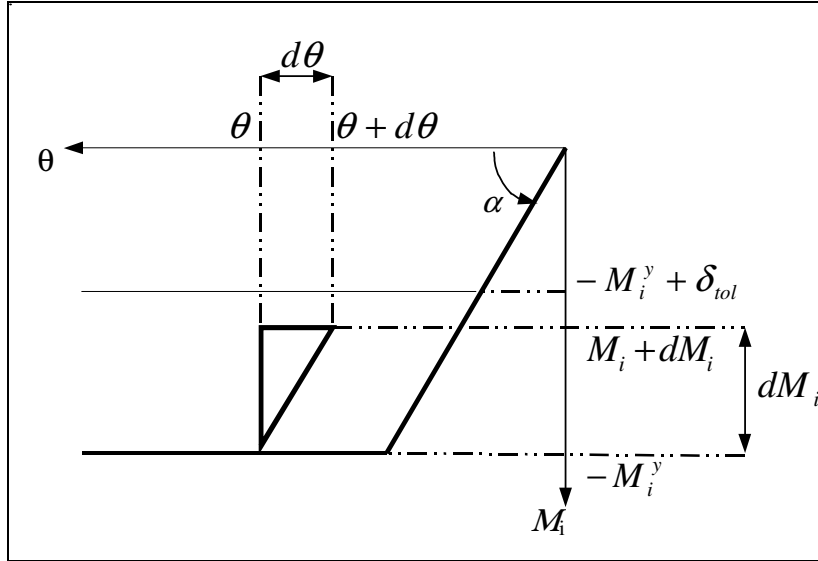
**Figure 4.40.** Incrément sans changement d'état  
 $\lambda = 1.0$



**Figure 4.41.** L'état final est à l'extérieur de la marge de précision

$$\lambda = \frac{\delta_{tol}}{dM_i} \text{ avec } dM_i = K_i d\theta$$





**Figure 4.42.** L'état final est à l'intérieure de la marge de précision  
 $\lambda = 1.0$

Un ressort élémentaire quelconque qui compose l'assemblage se trouve dans un état unique parmi les états que nous venons d'envisager, le facteur d'événement  $\lambda$  à retenir est celui correspondant à cet état. Ce calcul est répété pour tous les ressorts qui composent chacun des assemblages de la structure. On retiendra la valeur minimum de tous les facteurs d'événement ainsi calculés, cette valeur est notée  $\lambda_{p\min}$

#### 4.11.3. CALCUL DU FACTEUR D'EVENEMENT TENANT COMPTE DE L'EFFET DE LA VITESSE DE ROTATION

Pendant un pas de temps  $\Delta t$  le ressort  $i$  subit un incrément de rotation  $d\theta$ , la vitesse de rotation  $\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  influence la loi de comportement de l'assemblage et par conséquent la loi de comportement de chaque ressort qui compose cet assemblage, le moment plastique du ressort est modifié par l'effet de la vitesse de rotation. Si on désigne par  $M_i^y$  la limite élastique dynamique du ressort d'après la loi de PERZYNA [P1]

$$M_i^y = M_i^y \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\theta}}{\gamma} \right)^{1/\delta} \right] \quad (4.161)$$

Le calcul du facteur d'événement  $\lambda$  considérant l'effet de la vitesse de déformation utilise la même procédure explicitée au paragraphe 4.8, il suffira de remplacer le moment plastique statique  $M_i^y$  par le moment plastique dynamique  $M_i^y$  dans la loi de comportement du ressort.

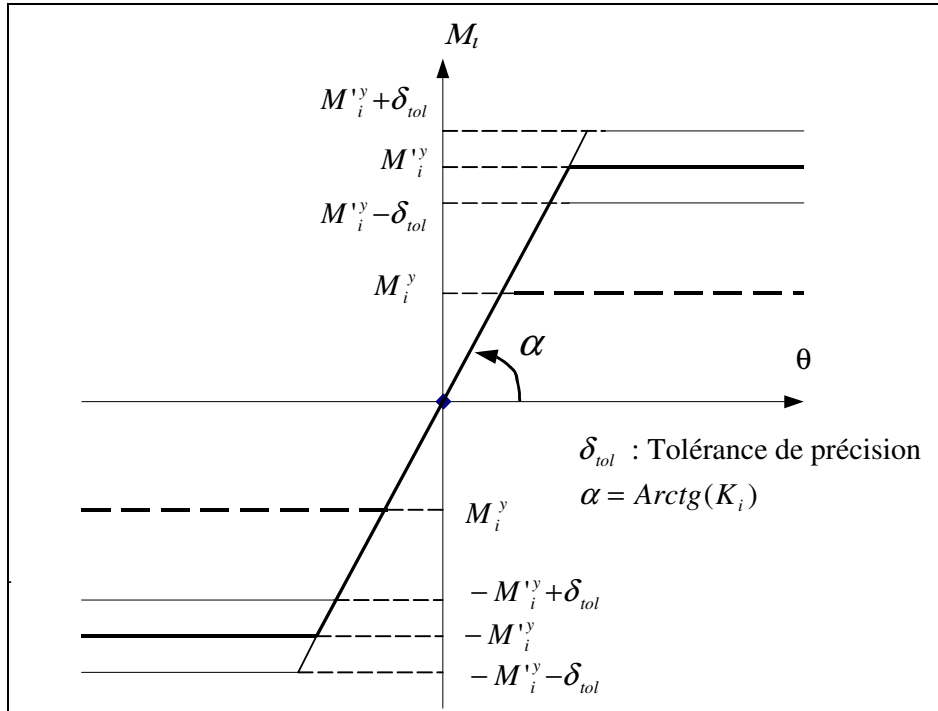


Figure 4.43. Effet de la vitesse de rotation sur le moment plastique du ressort

## 4.12. EVALUATION DU FACTEUR MINIMUM DE LA STRUCTURE

Le facteur minimum de la structure noté  $\lambda_{\min}$  est égal à la valeur minimum des deux facteurs de comportement  $\lambda_{p \min}$  et  $\lambda_{a \min}$  calculés respectivement pour les éléments poutres et les éléments assemblages qui constituent la structure.

$$\lambda_{\min} = \min(\lambda_{p \min}, \lambda_{a \min}) \quad (4.162)$$

## 4.13. DETERMINATION DE L'ETAT DE L'ELEMENT POUTRE

### 4.13.1. DETERMINATION DE L'ETAT DES SOUS FIBRES

Nous avons vu au paragraphe 4.5.1 que l'état de la structure est établi en considérant l'incrément réduit  $\lambda_{\min} \Delta U$ , l'état d'une sous fibre est évalué selon les motifs en figures 4.45 à 4.56, une sous fibre peut être dans un état unique parmi tous les états envisageables et qui sont représentés en figures ci dessous