



Recommandation pour la maîtrise de la fissuration - Thermo-Hydro-Mécanique

Jean-Michel TORRENTI – IFSTTAR



18/11/2015



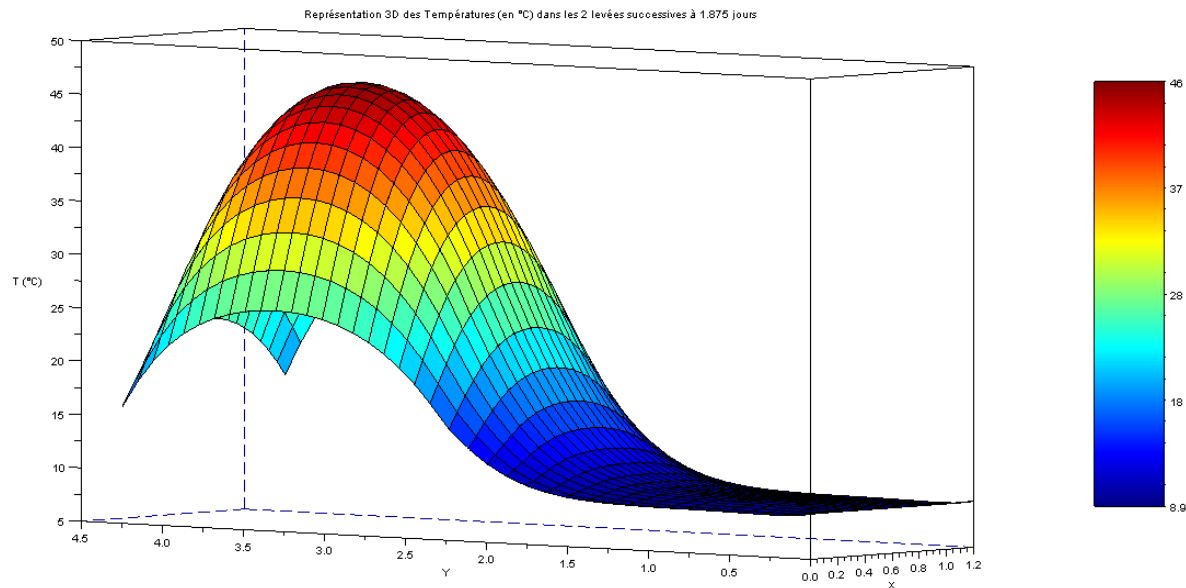
- ▶ Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)
 - Hydratation à jeune âge
 - Séchage du béton à long terme
- ▶ Lois de retrait et de fluage du béton (Chapitre 7)
 - Lois du code modèle 2010 avec des modifications
 - Retrait de dessiccation
 - Fluage avec état de contraintes tri-axial
 - Coefficients correcteurs et Procédures d'identification
- ▶ Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)
 - Ouverture de fissures
 - Bridages externes
 - Estimation des raideurs du béton fissuré
- ▶ Combinaison des différents phénomènes (Chap 9)
 - Structures avec exigences sur l'étanchéité
 - Structures avec exigences sur la durabilité

- Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)
 - Au jeune âge, **les déformations imposées** ne sont presque **jamais uniformes** :

Exemple d'une levée d'un voile de 1,20 m d'épaisseur

Température atteinte à 2 jours environ après bétonnage

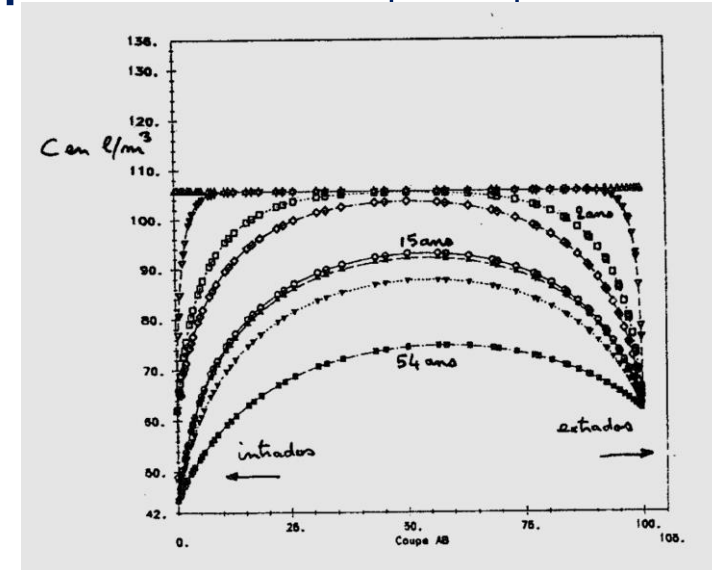
- Différence de température entre levées et diffusion vers la levée inférieure
- Gradient entre cœur et parement



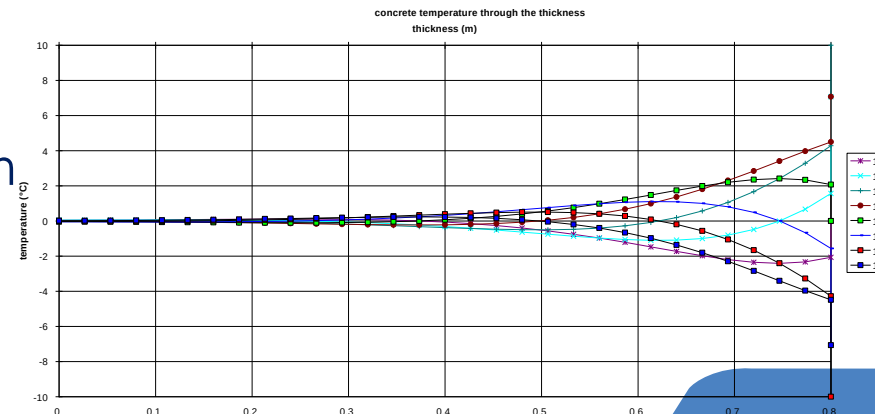
- Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)
 - A plus long terme, les **déformations imposées** ne sont presque **jamais uniformes**:
 - Retrait de dessiccation
 - Effet thermique

Exemple

Evolution de la teneur en eau dans le temps
pour une paroi de 1,20 m d'épaisseur
Retrait de dessiccation non uniforme

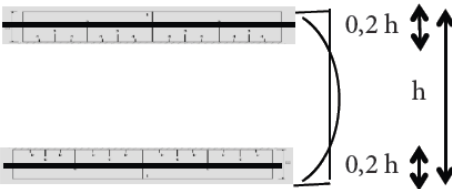


Température non uniforme sous l'effet
climatique journalier – voile de 800 mm
(environ 300 mm de propagation)



► Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)

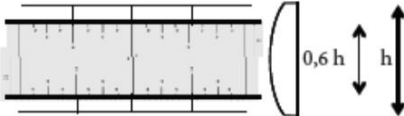
- Hydratation au jeune âge
 - Pièces épaisses $h \geq 400$ mm

Épaisseur h_t de la couche pour la contrainte maximum	Situation	Ferrailage minimum et valeur de h_t
Lorsque la fissuration limitée à la surface du béton, résulte de la différence de température entre le cœur et la surface, l'aire de la partie tendue du béton peut être évaluée à $A_c = 0.20 h \cdot 1 \text{ m}^2$ avec un diagramme des contraintes de traction assimilé à un double triangle	Echauffement ou décoffrage 	$A_{s \min} = \frac{0,5 \cdot 0,2h \cdot 1 \cdot f_{ctm, scale}}{f_{yk}}$ $f_{ctm, scale}$ est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur h_t à la contrainte maximale : (*) $h_t = 0,2 h / 3$

≈ 3 jours après bétonnage

► Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)

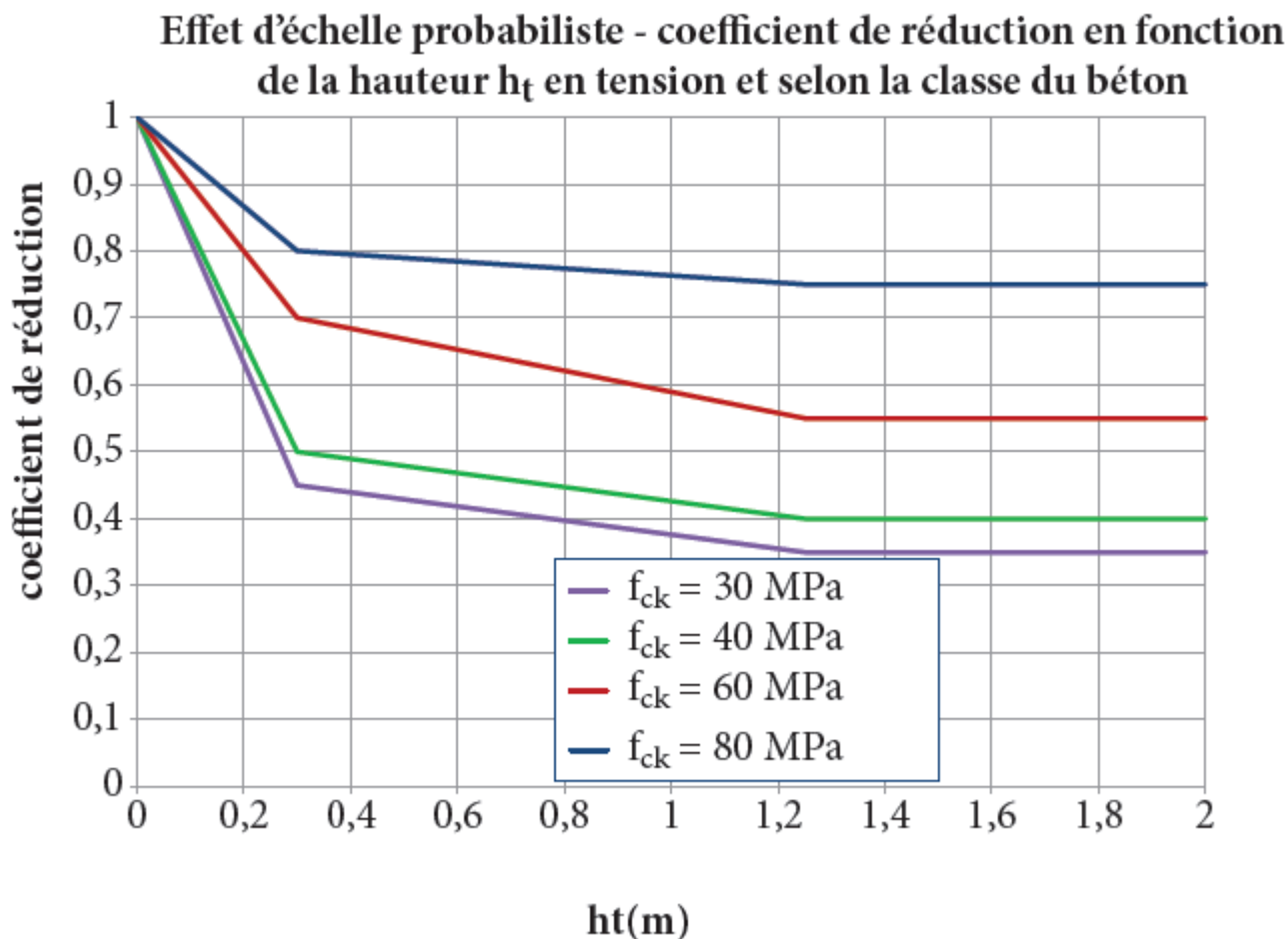
► Hydratation au jeune âge

Epaisseur h_t de la couche pour la contrainte maximum	Situation	Ferrailage minimum et valeur de h_t
Lorsque la fissuration résulte du refroidissement global de l'élément ou est due au séchage avec bridage, l'aire de la partie tendue peut être évaluée à $A_c = 0.5 h \cdot 1 \text{ m}^2$ avec un diagramme de traction quasi uniforme	Phase de refroidissement avec bridage externe aux extrémités (end restraint) à l'exclusion d'un bridage sur les bords (edge restraint) 	$A_{smin} = \frac{k \cdot 0,5h \cdot 1 \cdot f_{ctm, scale}}{f_{yk}}$ $f_{ctm, scale}$ est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur h_t à la contrainte maximale : (**) $h_t = 0,6 h$
Lorsque la fissuration est due au cycle journalier de température, la hauteur h_t est égale à 0,30 m et l'aire de la partie tendue peut être évaluée à $A_c = 0.30 \cdot 1 \text{ m}^2$ Avec un diagramme des contraintes de traction assimilé à un triangle	Cycle journalier de température 	$A_{smin} = \frac{0,50 \cdot 0,30 \cdot 1 \cdot f_{ctm, scale}}{f_{yk}}$ $f_{ctm, scale}$ est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur h_t à la contrainte maximale : (***) $h_t = 0,3/3 = 0,1 \text{ m}$

≈ 10 à 30 jours après bétonnage

Après décoffrage ou cure

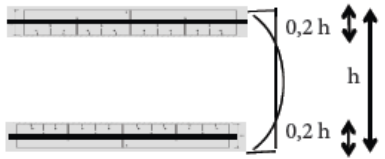
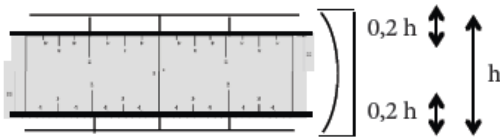
- Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)
 - Fissuration non stabilisée – effet d'échelle fort



► Ferrailage minimum des pièces épaisses (Chap 6)

■ Séchage à long terme

Tableau 6-3: ferrailage minimum à long terme (pour $h \geq 400$ mm)

Épaisseur h_t de la couche sous contrainte maximum	Situation	Ferrailage minimum par face
$f_{ctm, scale}$ est évaluée pour : $h_t = 0,2 h/3$	Séchage sans bridage externe 	$A_{smin} = \frac{k \cdot 0,2h \cdot 1 \cdot f_{ctm, scale}}{f_{yk}}$
$f_{ctm, scale}$ est évaluée pour $h_t = 0,2 h$	Séchage avec bridage externe aux extrémités (end restraint) à l'exclusion d'un bridage sur les bords (edge restraint) 	$A_{smin} = \frac{k \cdot 0,5h \cdot 1 \cdot f_{ctm, scale}}{f_{yk}}$

■ Cycle journalier de température

► Lois de retrait et de fluage du béton (Chapitre 7)

- Lois du code modèle 2010 :
 - **Nouveautés du Code modèle:**
 - distinction entre fluage propre et fluage de dessiccation depuis « final draft » (septembre 2011)
 - modification des formules de fluage dans la dernière publication (bulletins n° 65 and 66 en mars 2012)
 - Avantages:
 - Plus grand domaine de validité ($15 \leq f_{ck} \leq 130$ MPa)
 - Résultats proches de ceux de l'EN1992-2
 - Proposition d'évolution des paramètres avec la température de 20 °C à 80 °C (A confirmer)
 - Inconvénients:
 - Incertitude sur le fluage de dessiccation avec une cinétique très différente de celle du retrait de dessiccation.
 - Valeurs de dessiccation trop fortes à haute humidité et discontinuité (entre RH = 90 to 99 %)
 - Améliorations
 - Proposition d'adaptation pour éviter la discontinuité et réduire les déformations à haute humidité

- Lois de retrait et de fluage du béton (Chapitre 7)
 - Proposition d'adaptation du Code modèle 2010 pour éviter la discontinuité et réduire les déformations à haute humidité

$$\beta_{RH} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^3 \right] \text{ pour } 40 \leq RH \leq RH_{eq}$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^2 \right] \text{ pour } RH \geq RH_{eq}$$

Avec $RH_{eq} = 72 \exp [0,046 (f_{cm} - 8)] + 75$

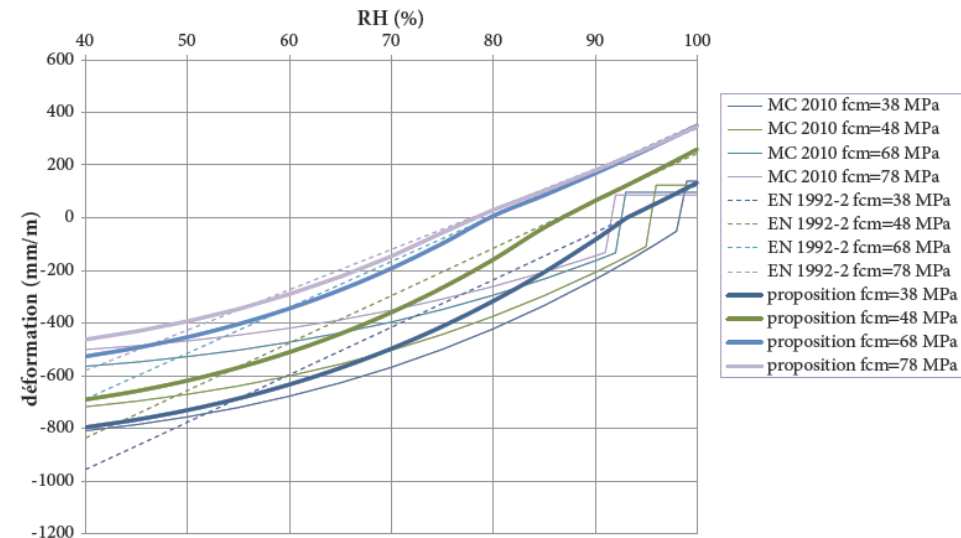


Figure 7-2 Retrait de dessiccation à long terme – proposition.

► Lois de retrait et de fluage du béton (Chapitre 7)

- Etat de contrainte tri-axial – adaptation des lois de fluage – modification du paramètre σ/E_c

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{ci} \cdot \beta_{bc1} \cdot \varphi_{0,bc} \cdot \beta_{bc}(t, t_0) + \frac{\sigma_{cm}}{E_{ci}} \cdot \beta_{dc1} \cdot \varphi_{0,dc} \cdot \beta_{dc}(t, t_0)$$

Avec $\sigma_{cm}/E_{ci} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/E_{ci}$

- Recommandation pour utiliser une identification expérimentale pour appliquer des coefficients correcteurs aux lois du code modèle 2010 : exemple du retrait

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \beta_{ca1} \varepsilon_{cas}(t) + \beta_{cd1} \varepsilon_{cds}(t, t_s)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2 \beta_{ca2} \sqrt{t}) \quad \beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{\beta_{cd2} \cdot 0.035 \cdot h^2 + (t - t_s)} \right)^{0.5}$$

- Lois de retrait et de fluage du béton (Chapitre 7)
 - Recommandation pour utiliser une identification expérimentale pour appliquer des coefficients correcteurs aux lois du code modèle 2010 : exemple du fluage

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{ci} \cdot \beta_{bc1} \cdot \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_{0,adj}) + \frac{\sigma_{cm}}{E_{ci}} \cdot \beta_{dc1} \cdot \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_{0,adj}) \cdot \beta_{dc}(t, t_0)$$

$$\beta_{bc}(t, t_0) = \ln \left[\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right]$$

$$t_{0,adj} = \beta_{bc2} \cdot t_{0,T} \cdot \left[\frac{9}{1 + t_{0,T}^{1.2}} + 1 \right]^\alpha$$

Fluage propre logarithmique
Âge du chargement $t_{0,adj}$

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left[\frac{t - t_0}{\beta_{dc2} \cdot \beta_h + t - t_0} \right]^{\gamma(t_0)}$$

fluage de dessiccation

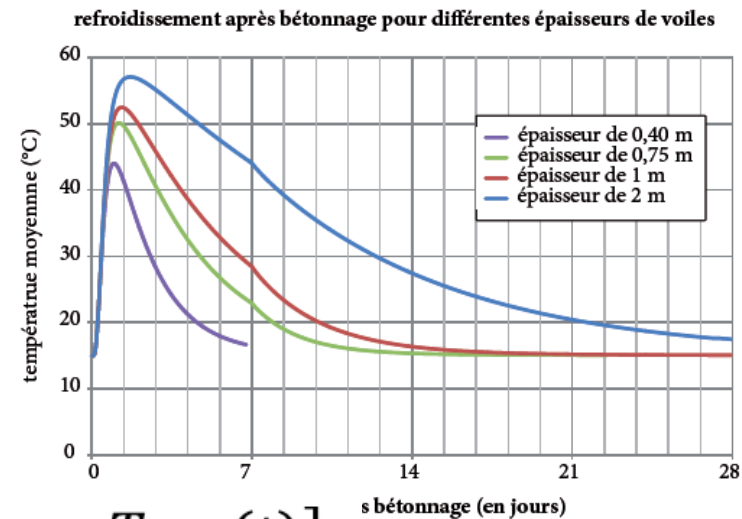
► Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)

- Ouverture de fissures en cas de retrait gêné
 - Retrait à jeune âge = retrait endogène + retrait thermique
 - La période à considérer pour le jeune âge dépend de la taille des pièces

$h_0 \leq 150 \text{ mm}, t_{ea} = 28 \text{ days}$

$h_0 \geq 500 \text{ mm}, t_{ea} = 90 \text{ days}$

- Déformation imposée



$$\epsilon_{cs} = 0,5 \epsilon_{ca}(t) + \alpha[0,6(T_{max} - T_{ini}) + T_{ini} - T_{min}(t)]$$

- Ouverture de fissures:

$$l_{s,max} = c + \frac{1}{4} \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms} \rho_{s,ef}} \frac{\phi}{1.8} = c + \frac{1}{4} \frac{1}{1.8} \frac{\phi}{\rho_{s,ef}}$$

$$w_k = 2l_{s,max}(\epsilon_{cs})$$

► Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)

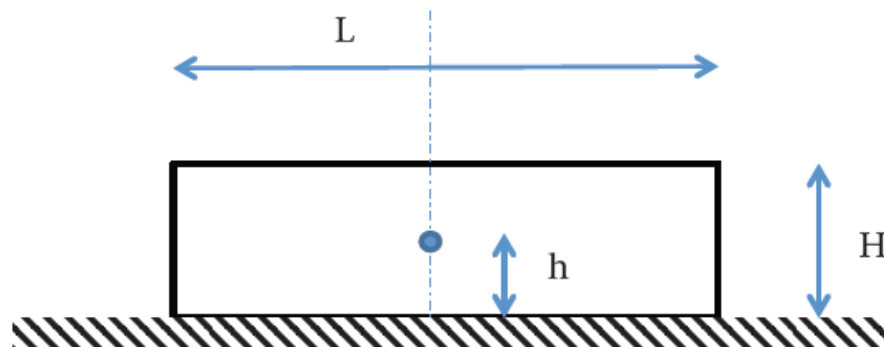
■ Bridages externes

- Bridage d'un élément à ses extrémités – cf EC2-3

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} - \epsilon_{cs} = 0,5 k_c k \frac{f_{ctm}}{\rho} (1 + \alpha_e \rho) / E_s$$

Mais f_{ctm} avec effet d'échelle car fissuration non stabilisée

- Bridage d'un voile sur le bord inférieur



► Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)

Bridage sur un bord

Exemple de coefficient de **bridage élastique R** selon CIRIA C660

Plus les fissures se forment et moins elles se propagent sur la hauteur.

L'ouverture des fissures est variable sur la hauteur

Fissures plus ouvertes en haut (non systématiques)

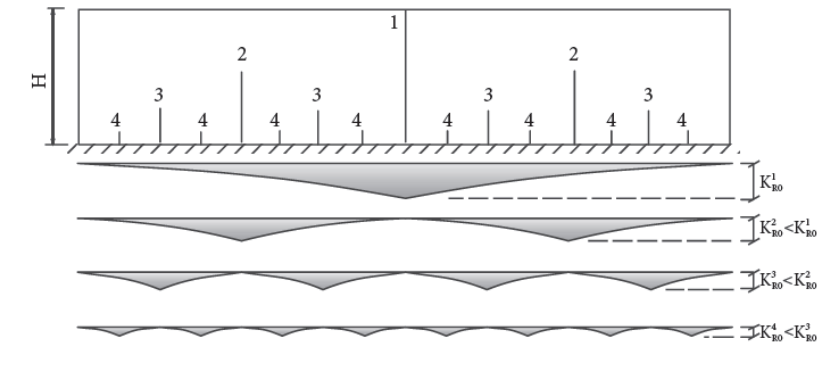
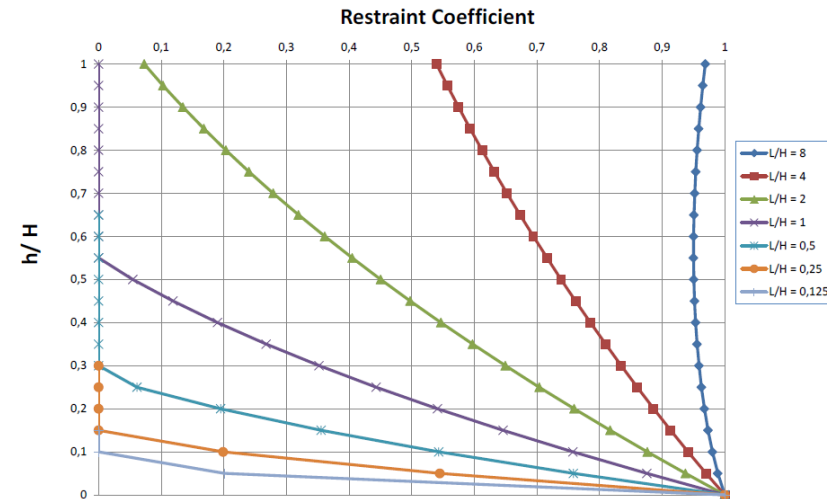
Fissures mieux réparties en bas

Si la distance entre fissures à la base diminue, le cisaillement diminue et le bridage diminue :

$$K_{R0}^i = \frac{1}{1 + 1,05 \frac{A_n E_n}{L_i B E_0}}$$

$$R_{bridage} = R \cdot K_{R0}^i$$

Edge restraint - Revised values of the ACI 207 by Emborg 2003 cf CIRIA Appendix 5



- ▶ Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)
 - Estimation des raideurs du béton fissuré
 - À n'utiliser qu'en cas de cumul déformations imposées + effort mécanique
 - Sinon calcul d'ouverture de fissures à partir des déformations gênées.
 - Principe du calcul
 - Sous déformations imposées (variation de déformation uniforme ou gradient de déformation) création d'un effort normal ou d'un moment de flexion.
 - Sous l'effet de la fissuration, les efforts ou moments dus aux déformations sont réduits, par rapport à un calcul élastique
 - La réduction dépend du pourcentage d'acier et de la contrainte dans les aciers.
 - Méthode simplifiée – réduction forfaitaire des efforts élastiques
 - Par 0,6 en ELS quasi-permanent ou fréquent
 - Par 0,5 en ELS caractéristique ou ELU fondamental
 - Par 0,35 en ELU accidentel

- Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)
 - Estimation des raideurs du béton fissuré
 - Méthode détaillée – exemple pour un gradient thermique

La courbe moment – courbure est tracée avec la théorie de fissuration (avec participation du béton entre fissures).

Avant fissuration, sous la courbure imposée: $\alpha_c \cdot \frac{\Delta\theta}{h}$, la raideur est $E_c I_0$ (I_0 inertie non fissurée)

A un point de la courbe moment-courbure, correspond un état de contrainte acier et béton.

La pente sécante de la courbe donne la raideur $E_c I_{fiss}$

Le coefficient de réduction est $k = I_{fiss} / I_0$

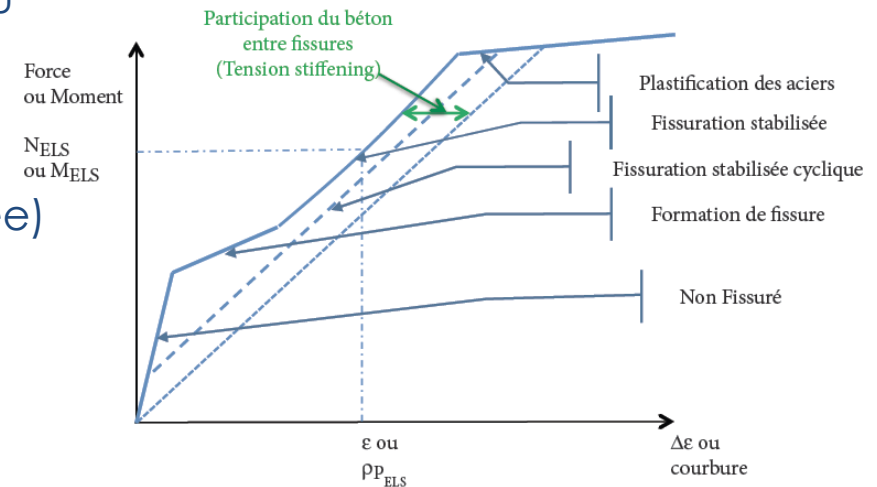


Figure 8-6 : Diagramme effort-déformation ; ρ_{ELS} est la valeur de la courbure correspondant au moment M_{ELS}

► Fissuration sous déformations imposées (Chapitre 8)

- Estimation des raideurs du béton fissuré
 - Méthode détaillée – Même principe pour une déformation uniforme imposée

La courbe effort – déformation est tracée avec la théorie de fissuration (avec participation du béton entre fissures).

Avant fissuration, sous la déformation imposée : ϵ_c , la raideur est $E_c S_0$ (I_0 section non fissurée)

A un point de la courbe effort -déformation, correspond un état de contrainte acier et béton.

La pente sécante de la courbe donne la raideur $E_c S_{fiss}$

Le coefficient de réduction est $k = I_{fiss} / I_0$

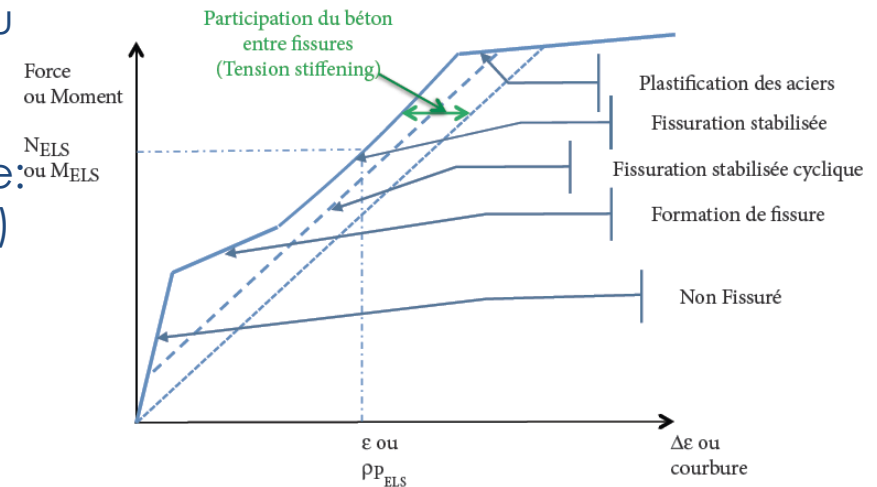


Figure 8-6 : Diagramme effort-déformation ; ρ_{ELS} est la valeur de la courbure correspondant au moment M_{ELS}

► Combinaison des différents phénomènes (Chap 9)

- Structures avec exigences sur l'étanchéité
 - Règles générales: cumul des ouvertures de fissures:
 - Au jeune âge (thermiques, hydriques et/ou mécaniques)
 - En service (thermiques et mécaniques)
 - Selon scénario vis-à-vis de l'étanchéité (effet thermique, mécanique ou hydrique).
 - Exception: non cumul court terme – long terme si:
 - Fermeture permanente des fissures traversantes par une précontrainte,
 - Flexion permanente refermant la fissuration sur un parement
 - Exception: non prise en compte de la dessiccation si une face reste en milieu humide
 - Hypothèses: fissuration traversante non stabilisée se referme si:
 - Section totalement comprimée (compression moyenne 1 MPa)
 - Section fléchie (compression partie comprimée de 4 MPa).

- ▶ Combinaison des différents phénomènes (Chap 9)
 - Structures avec uniquement des exigences sur la durabilité
 - Règles générales: pas de cumul des ouvertures de fissures:
 - A priori: enveloppe de 3 situations:
 - À court terme après bétonnage (de 3 jours à 1 semaine) retrait thermique et endogène, poids propre et décoffrage, ...)
 - Durant la construction et jusqu'à la mise en service (retrait thermique, endogène et hydrique, + effets mécaniques ou thermiques pendant l'exécution,
 - En service et jusqu'en fin de vie de l'ouvrage (retrait de dessiccation, poids propre et charges permanentes + thermique, hydrique et mécanique selon les situations de service étudiées.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION