

La fissuration des pièces massives et le calcul des pièces soumises à un retrait gêné

Francis Barré - Géodynamique et Structure

La fissuration des pièces massives et le calcul des pièces soumises à un retrait gêné

Le Projet National CEOS fr

Particularité des pièces massives

Les déformations thermiques ou de retrait

Les différents bridages

Le ferrailage minimum

Conclusions

Le projet National CEOS fr

Un des thèmes: chargement Thermo-Hydro-Mécanique:

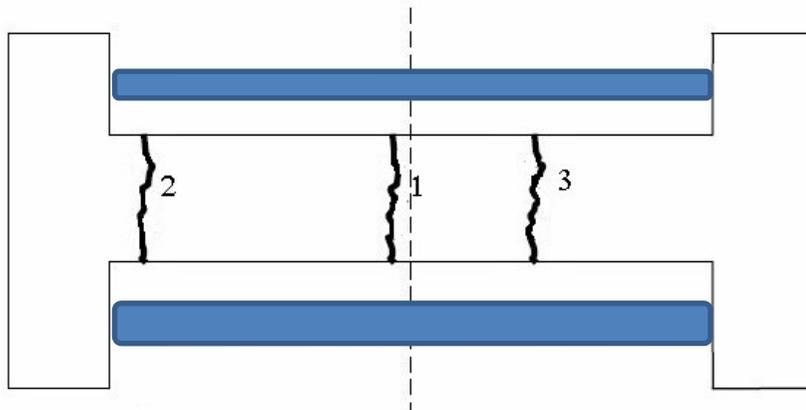
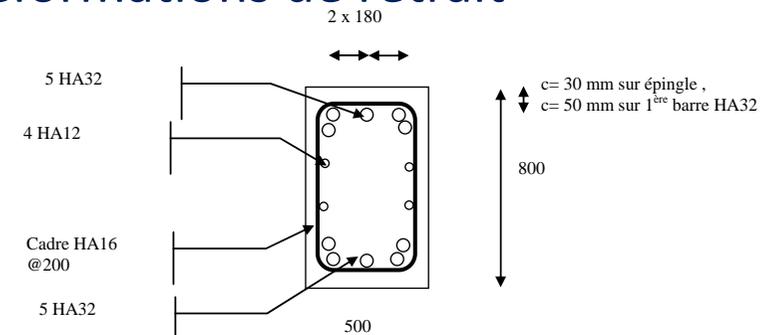
- **3 essais de fissuration de tirant en retrait gêné sur 28 jours.**
- compilation de mesures sur ouvrages des déformations de retrait

Largeur : 500 mm, hauteur : 800 mm et longueur libre 5,10 m.

Butons: 2 tubes ϕ 323,9 e = 55 mm de 5,70 m de long

Matériaux : C50/60 composé de ciment CEM I 52.5N

(400 kg/m³) et 185 l/m³ d'eau



Le projet National CEOS fr

Un des thèmes: chargement Thermo-Hydro-Mécanique:

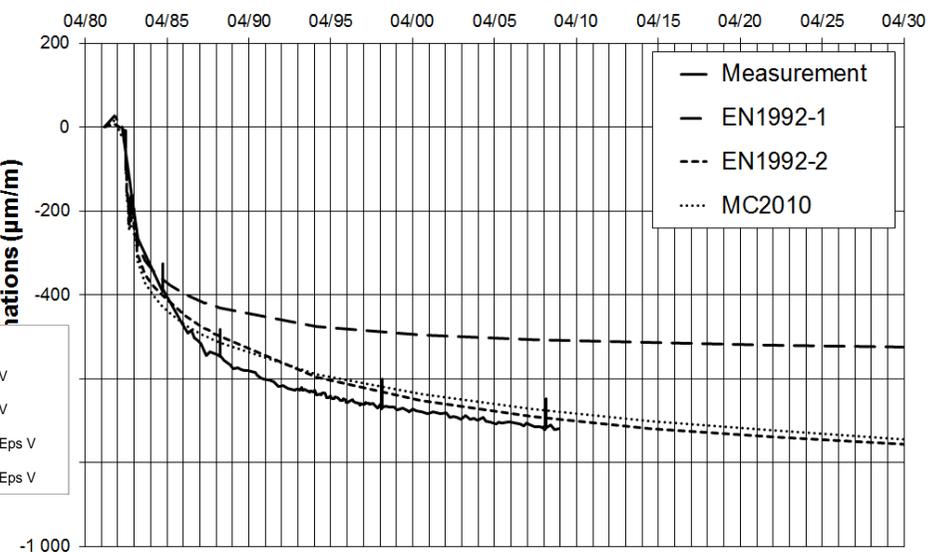
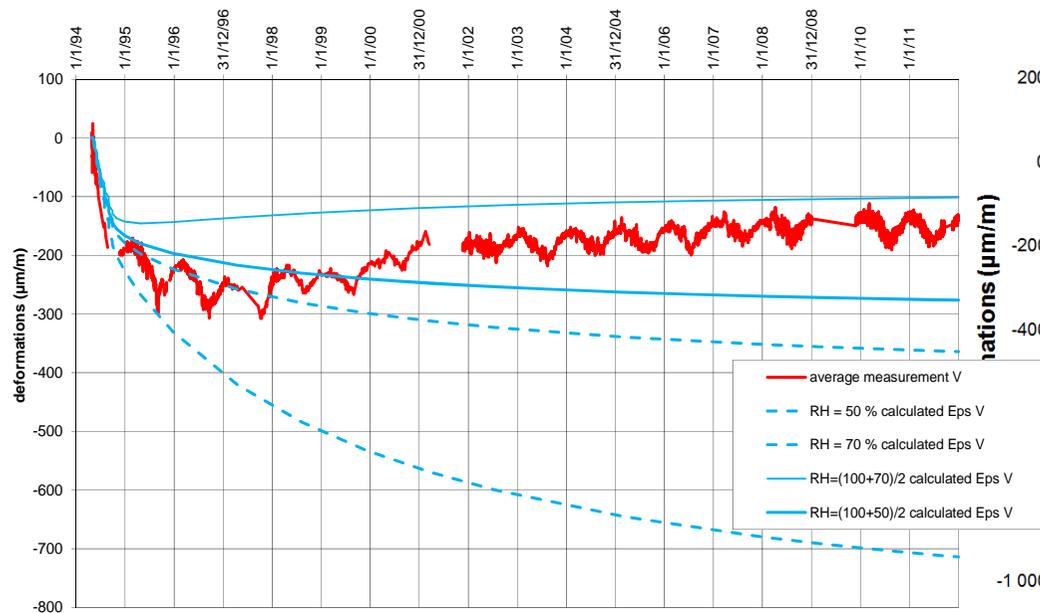
- essais de fissuration de tirant en retrait gêné sur 28 jours.
- **compilation de mesures sur ouvrages des déformations de retrait**
choix parmi les lois entre

-EN1992-1-1

- EN1992-2

- Code modèle Fib 2010

Cooling tower - comparison between calculated and measured deformations
EN1992-2 - without silica-fume - EN1992-2 + AN3



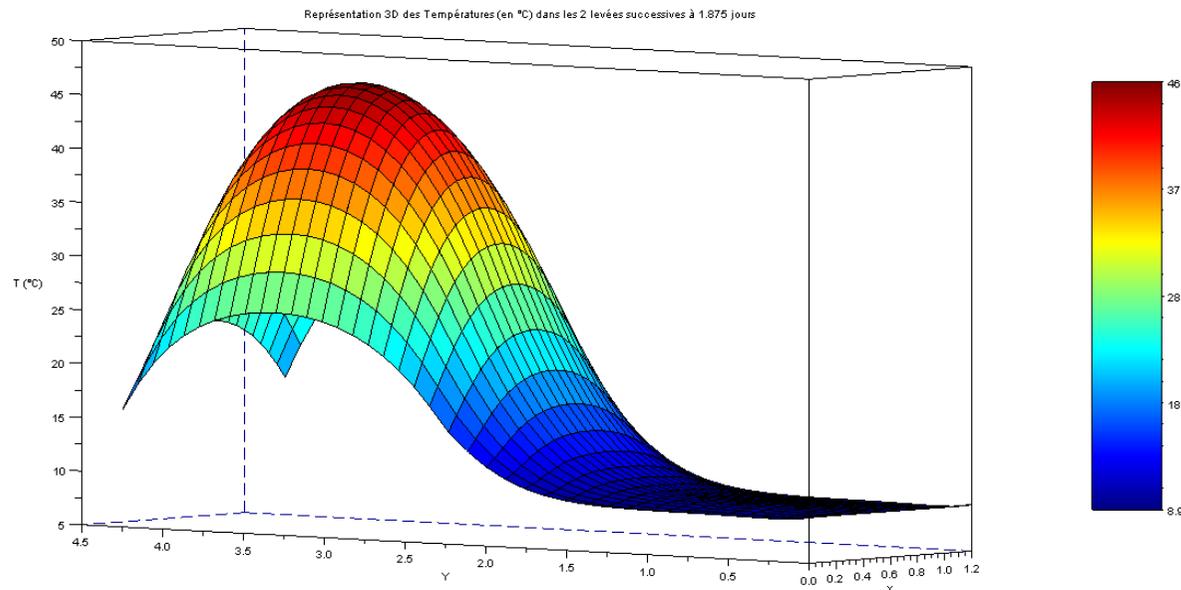
La particularité des pièces massives

Les **déformations imposées** ne sont presque **jamais uniformes**:

- A court terme:
 - Température au bétonnage
 - Retrait endogène

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



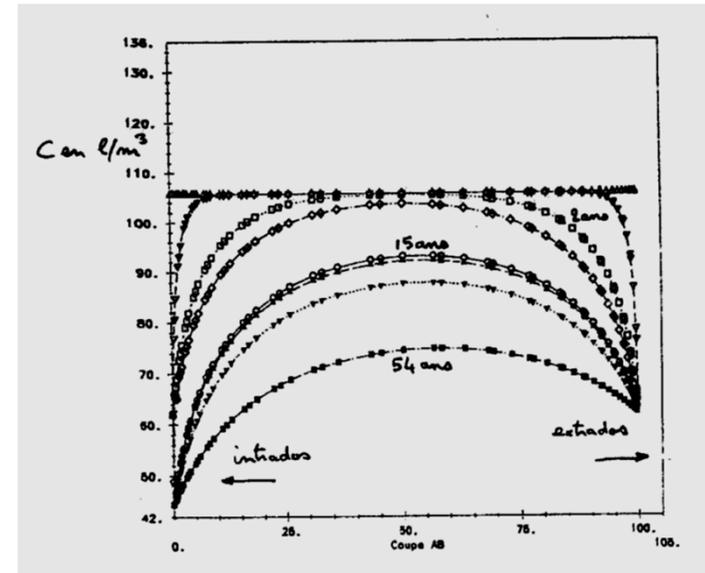
La particularité des pièces massives

Les **déformations imposées** ne sont presque **jamais uniformes**:

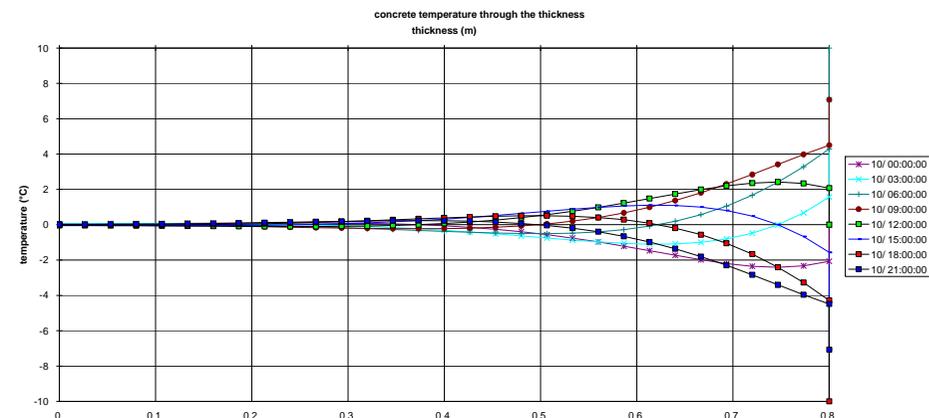
- A plus long terme:
 - Retrait de dessiccation
 - Effet thermique

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)



La particularité des pièces massives

Tous les **phénomènes physiques** sont beaucoup **plus lents**:

- Diffusion de la température
- Séchage du béton



Proportionnels à h^2

Conséquences sur les températures au bétonnage:

- élévation de température proche des conditions adiabatiques (dès $h \approx 2\text{m}$)
- Durée de la cure plus longue

Les conséquences sur les contraintes: Autocontraintes

- fissuration non traversante à court terme après bétonnage ou après décoffrage (différence de température entre cœur et parement)
- Fissuration traversante à 10 à 30 jours (différence de température entre deux levées)
- Majoration contrainte de parement et fissuration plus précoce sous effet mécanique (contrainte mécanique faible)

Les déformations thermique ou de retrait

Les déformations gênées à considérer

- Vérification aux états-limites de service quasi-permanent
- Pas de vérification en ELU a priori
- Étude à court terme après bétonnage:
 - Retrait thermique (due à l'hydratation du béton)
 - Phase d'échauffement
 - Phase de refroidissement
 - Retrait endogène
- Étude à long terme
 - Retrait de dessiccation,
 - Fluage a priori faible sauf pièces massives précontraintes
 - Actions thermiques (conditions climatiques et d'exploitation)
- **Eviter cumul court terme + long terme**

Les déformations thermiques ou de retrait

Température au bétonnage:

Température maximale: si $h \geq 2,00\text{m}$ cœur du béton \approx conditions adiabatiques

Facteurs importants:

- Température du béton frais T_{init}
- Dosage d en ciment
- Chaleur d'hydratation du ciment Q .

$$T_{\max} \approx T_{init} + \frac{d \cdot Q}{\rho C}$$

si $h < 2 \text{ m}$ pourcentage de $d Q / (\rho C)$

Différences de température:

Cinétique de refroidissement beaucoup plus lente:

Cure et décoffrage (isolation) plus long: lorsque la température à cœur à suffisamment baissée.

Facteurs importants:

- durée de cure et de maintien du coffrage
- coefficients d'échange.

$$h_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{e}{\lambda}}$$

h coefficient d'échange extérieur (de l'ordre de $16 \text{ W/m}^2/\text{°K}$ avec vent modéré),

e épaisseur du coffrage

λ conductivité du coffrage:
 45 $\text{W/m}/\text{°K}$ pour l'acier,
 2,5 $\text{W/m}/\text{°K}$ pour le béton,
 0,15 $\text{W/m}/\text{°K}$ pour le bois

Les déformations thermiques ou de retrait

Température au bétonnage:

Critères:

Différence de température – cœur- parement ≤ 20 °C,

Pour limiter la fissuration de parement après échauffement maximal.

Température maximale - cœur du béton ≤ 65 °C

Pour éviter fissuration au refroidissement et réaction sulfatique interne

Différence de température - entre deux éléments voisins

(levée coulée et levée précédente) ≤ 20 °C

Pour limiter la fissuration traversante

Retrait endogène:

Valeur faible 60 à 120 $\mu\text{m}/\text{m}$ (f_{ck} de 35 à 60 MPa) mais évolution rapide 50 % en 12 jours

Équivalent de 6 à 12 °C en plus pour l'étude du refroidissement

Les déformations thermiques ou de retrait

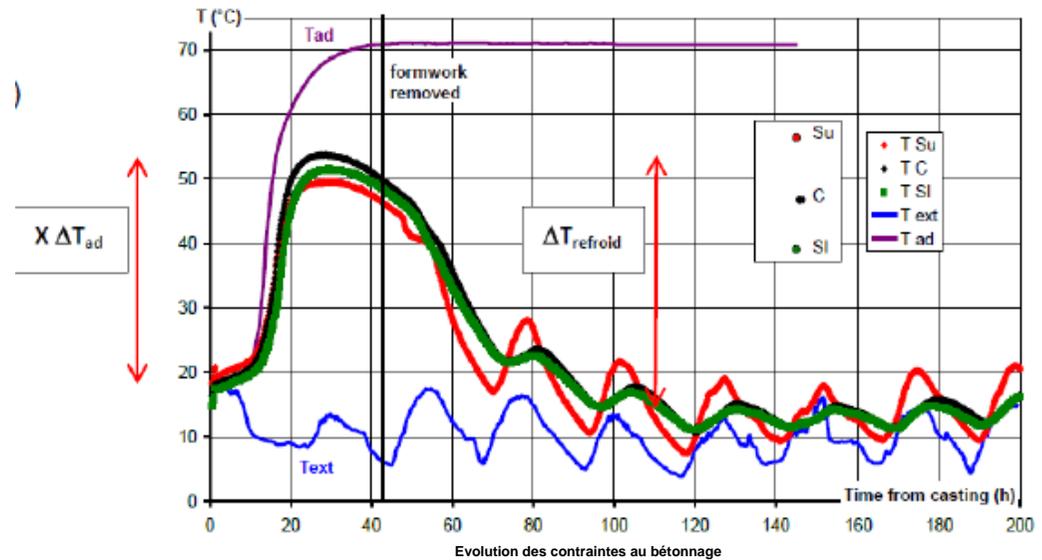
Température au bétonnage:

Exemples:

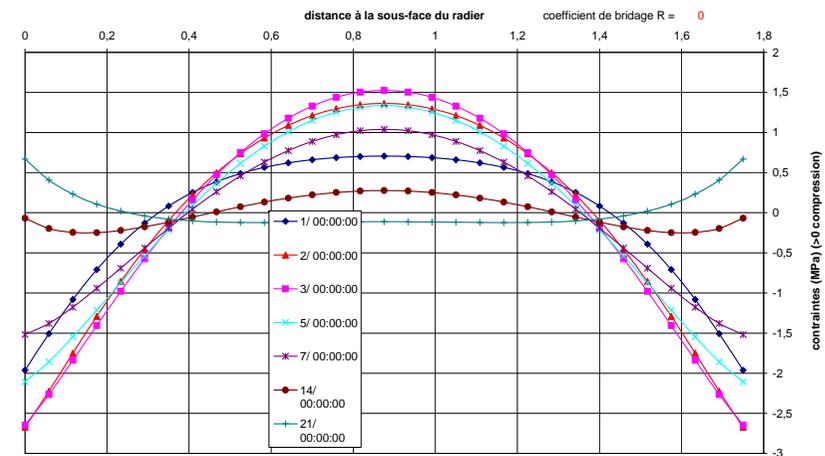
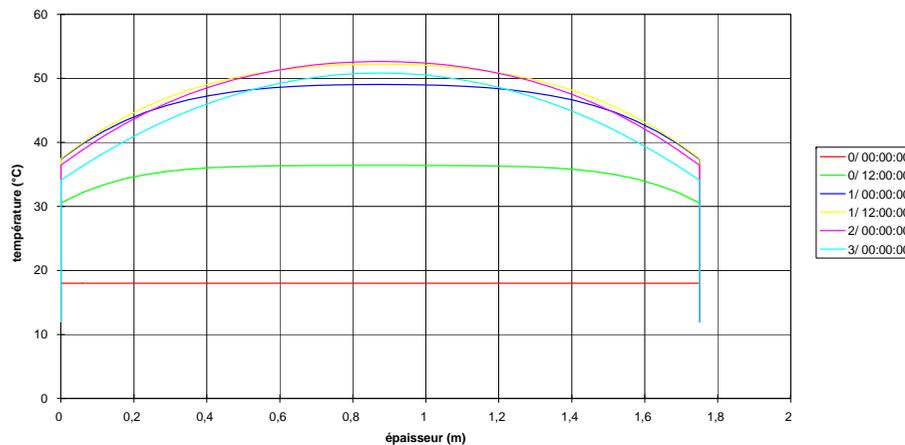
Essai CEOSfr $\approx 70\%$ de ΔT_{adia}

Radier BR Flamanville 3: $h=1,75\text{m}$

- Dosage = 375 kg/m³
- $Q = 270 \text{ kJ/kg}$
- $dQ_{\infty} / (\rho C) = 40,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{ini}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{adiab}} = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\approx 90\%$ de ΔT_{adia}



température dans le béton



Les déformations thermiques ou de retrait

Température au bétonnage: conséquence sur la fissuration

Exemples:

Essai CEOSfr: fissuration	RG8bis	à 70 heures	$\rho_{s \text{ traction}} = 2 \%$	$w = 0,11 \text{ mm}$
	RG9	à 200 h	$\rho_{s \text{ traction}} = 0,6 \%$	$w = 0,13 \text{ mm}$

1^{er} plot Radier BR Flamanville 3: 1,75 m sur 4200 m³

Fissuration à 2 ou 3 jours à $\approx 3 \text{ MPa}$

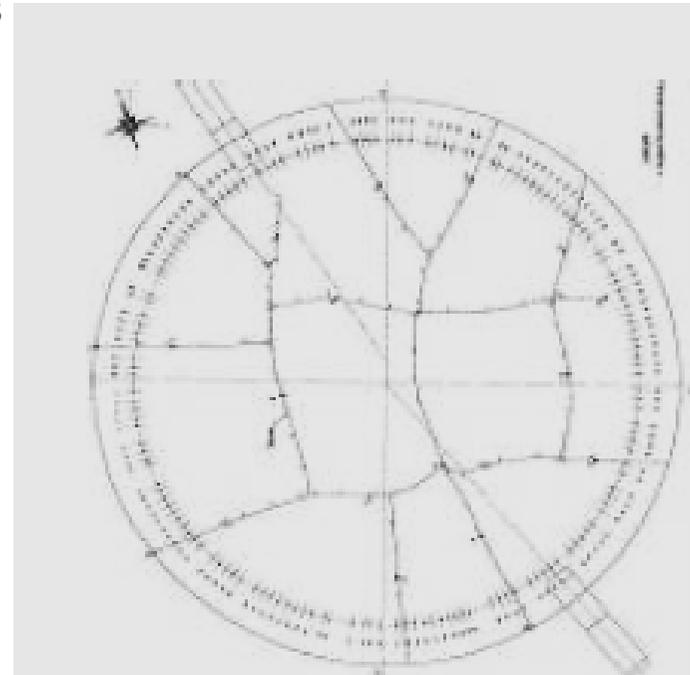
Pas de ferrailage supérieur

$\rho_{s \text{ traction}} = 0 !!!$ $w = 3 \text{ mm} !!!$

Ferrailage nécessaire:

3 MPa sur 0,35 m de profondeur

As min = $0,5 \times 0,35 \times 3 / 500 = 11 \text{ cm}^2/\text{m}$



Les déformations thermiques ou de retrait

Retrait de dessiccation du béton : dépend:

- f_{ck} : Classe de béton (compacité)
- RH Humidité relative de l'environnement
- h_0 Épaisseur (cinétique)

Varie de 0 à plus de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ équivalent de 0 °C à 50 °C !!!

Remarques:

- Cinétique EN1992-1-1 trop rapide
- Asymptote EN1992-2 trop forte pour des bétons sans fumée de silice

Pour pièces massives: % de dessiccation à 100 ans

Si $h = 2,00\text{m}$; 30 % (EN1992-2) 45 % code modèle 2010

Si $h = 1,20\text{m}$; 50 % 70 %

Exemple: Teneur en eau du béton d'une enceinte centrale nucléaire $h_0 = 1,20\text{ m}$

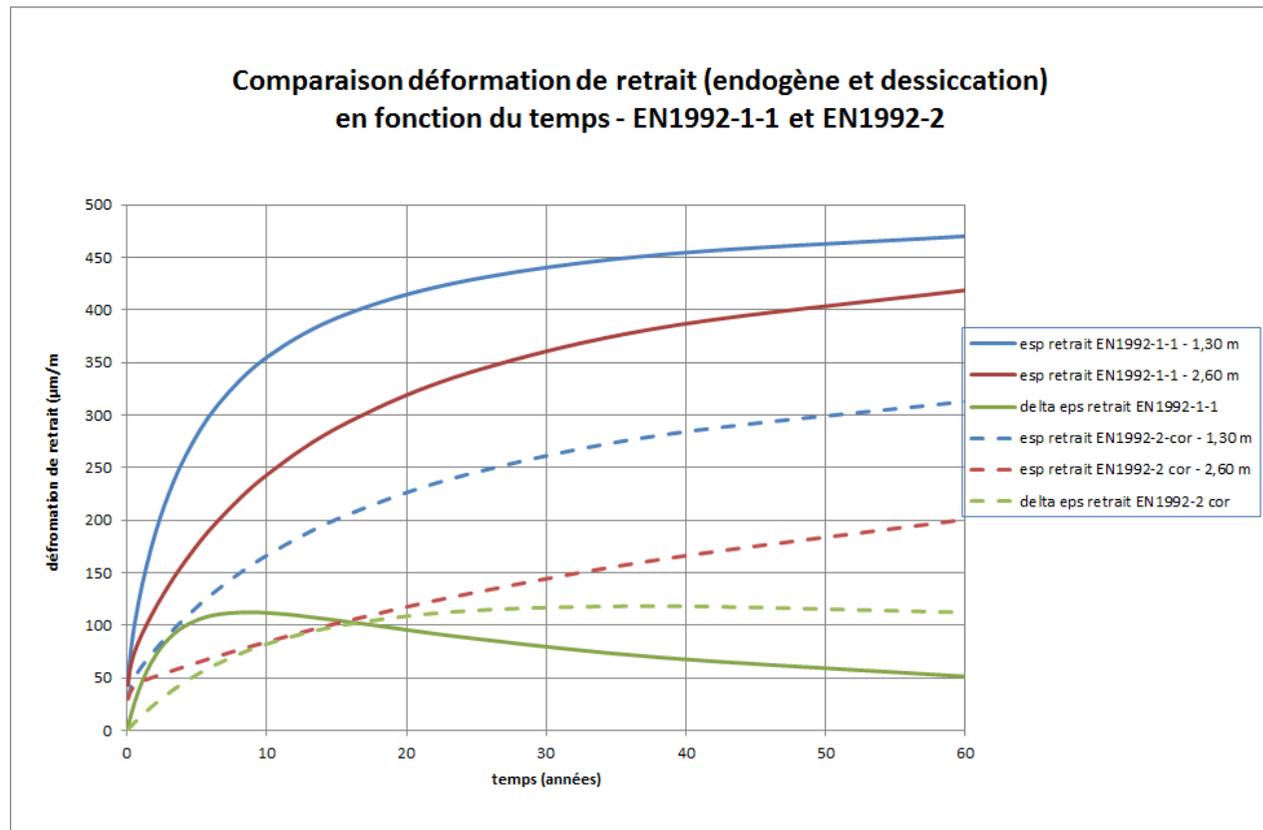
- 180 l/m^3 au bétonnage
- 120 l/m^3 après prise du béton
- 60 l/m^3 à 50 ans

Attention aux différences d'épaisseur retrait différentiel entre éléments de structure

Les déformations thermiques ou de retrait

Attention aux différences d'épaisseur retrait différentiel entre éléments de structure
Exemple: voile de 1,30 m et voile de 2,60 m

$f_c =$	35 MPa
$R_h =$	50 %
$t_0 =$	28 jours
t_{final}	60 ans
E	34 GPa



Les déformations thermiques ou de retrait

Fluage

2 composantes:

Fluage Propre:

- anisotrope
- proportionnel aux déformations initiales

Fluage de dessiccation:

- isotrope
- proportionnel à la somme des contraintes principales

Attention:

Si contrainte verticale:

déformation horizontale due au fluage de dessiccation

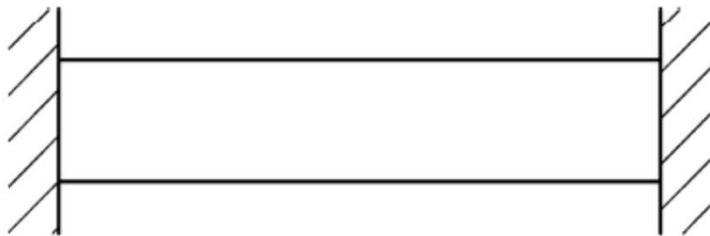
Température:

Cycle Journalier: effet sur 300 mm

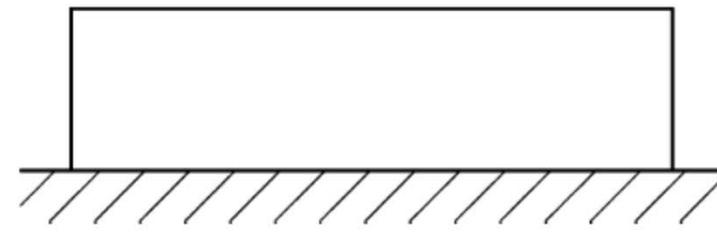
Cycle annuel: effet sur 6 à 7 m - proche du régime permanent pour pièces moins épaisses

Les différents types de bridage

distinction entre **bridage aux extrémités** et **bridage le long d'un bord**

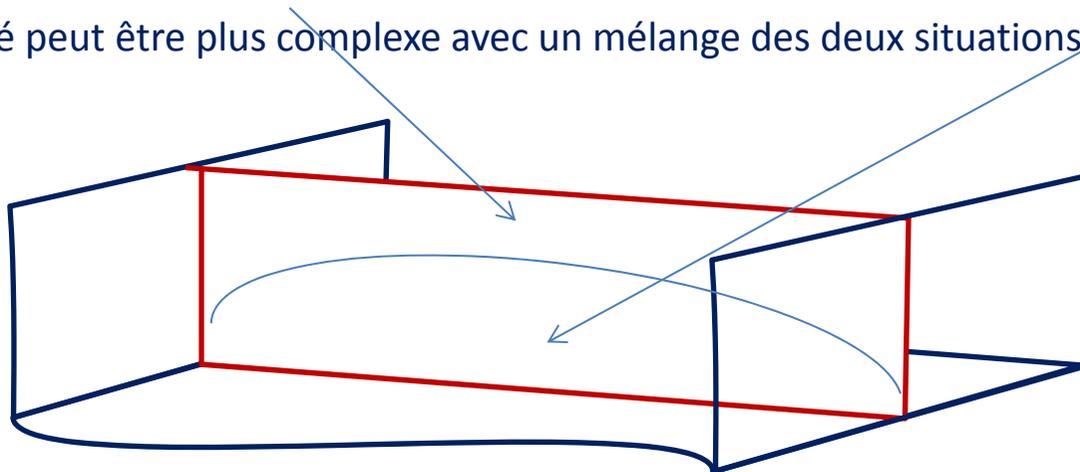


(a) Bridage d'un élément à ses extrémités



(b) Bridage le long d'un bord

La réalité peut être plus complexe avec un mélange des deux situations:



Les différents types de bridage

bridage aux extrémités

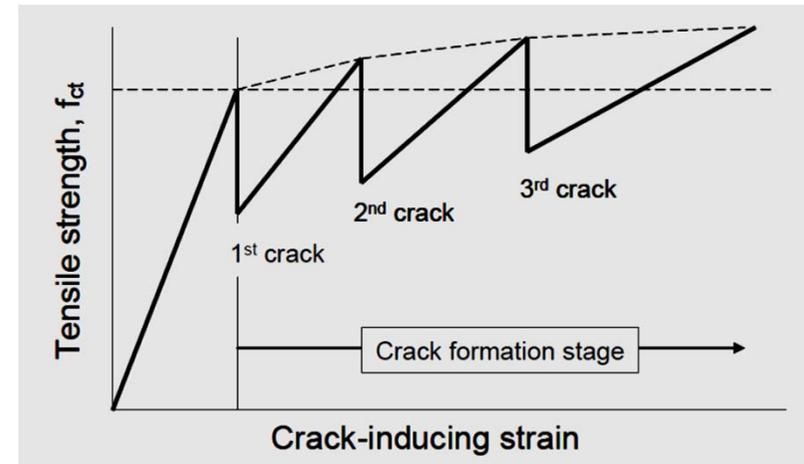
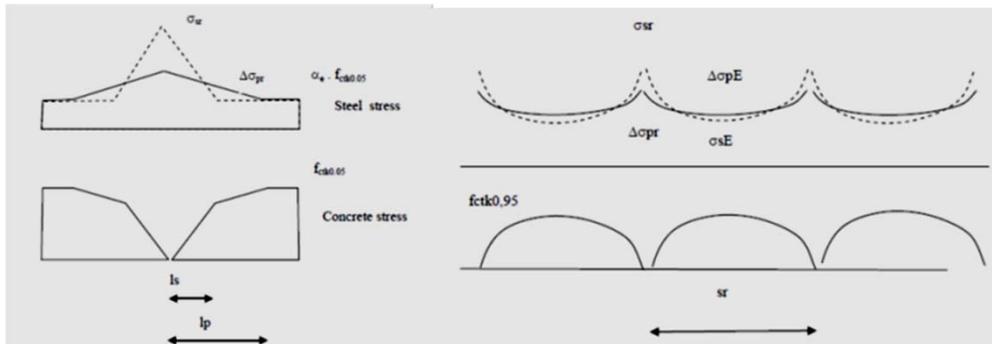
Processus de fissuration

- Augmentation de la déformation imposée - Formation d'une première fissure
- Réduction de raideur – Réduction des contraintes
- Augmentation de la déformation imposée – formation d'une nouvelle fissure
- Réduction de raideur,

Fissuration stabilisée à partir d'une certaine déformation imposée ($\approx 1000\mu\text{m}/\text{m}$)

Formation de fissures

fissuration stabilisée



La fissuration stabilisée sous déformation imposée est rarement atteinte

$1000 \mu\text{m}/\text{m} \approx 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ !!!}$

Les différents type de bridages

Selon l'EN1992-3 § 7.3.5 « Maîtrise de la fissuration due à des déformations imposées gênées »

« L'Annexe Informative L fournit une méthode simplifiée, qui peut être utilisée à défaut d'un calcul plus rigoureux, pour l'évaluation des contraintes et des déformations dans des éléments en béton soumis à des déformations »

- Déformation réelle: $\varepsilon_{az} = (1 - R_{ax})\varepsilon_{free}$ ε_{free} déformation imposée libre
 - Contrainte dans le béton: $\sigma_z = E_{c,eff} (\varepsilon_{free} - \varepsilon_{az}) = E_{c,eff} \cdot R_{ax} \cdot \varepsilon_{free}$
 - Ceci suppose un bridage total pour les gradients ($R_m = 1$) et un bridage partiel R_{ax} pour la déformation moyenne dans le sens axial
- Il y a tout intérêt à **éviter de passer par un calcul des contraintes dans les aciers** après fissuration du béton **sauf si cumul mécanique et thermique**
 - Mais d'utiliser l'annexe M ou autres documents pour le calcul d'ouverture de fissures à partir des déformations bridées, cela évite une **estimation délicate de la raideur du béton tendu**

Les différents types de bridage

bridage aux extrémités: calcul d'ouverture de fissures selon EN1992-3 (silos réservoirs)
modifié avec CIRIA

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \text{ et } (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0,5 \cdot \alpha_e \cdot k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \frac{(1+1/\alpha_e \cdot \rho)}{E_s}$$

$$\text{ou } (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} - \frac{0,5 \cdot \alpha_e \cdot f_{ct,eff}}{E_s}$$

Suppose une fissuration systématique pour w_k

- ce n'est pas le cas
- longueur de transfert l_s dans le cas de formation de fissure

$$l_s = (\sigma_{sr} - \alpha_e \cdot f_{ctk0.05}) \cdot \frac{\phi_s}{4\tau_{bs,k}} \approx \sigma_{sr} \cdot \frac{\phi_s}{4\tau_{bs,k}}$$

Suppose

- fissuration pour déformation bridée $> \alpha_e f_{ct,eff} / E_s$
- déformation résiduelle après fissuration de $0,5 \alpha_e f_{ct,eff} / E_s$
- R_{ax} dépend de l'âge de la fissuration relaxation des contraintes plus fortes à court terme

Les différents types de bridage

Bridage sur un bord

Coefficient de bridage axial – R_{ax}

Exemple de coefficient de bridage élastique selon CIRIA C660

H hauteur du voile

L longueur du voile

Processus de fissuration

Augmentation de la déformation imposée -

Formation d'une première fissure au milieu sur toute la hauteur si L est grand

Formation de 2 nouvelles fissures entre les bords et la 1^{ère} fissure,

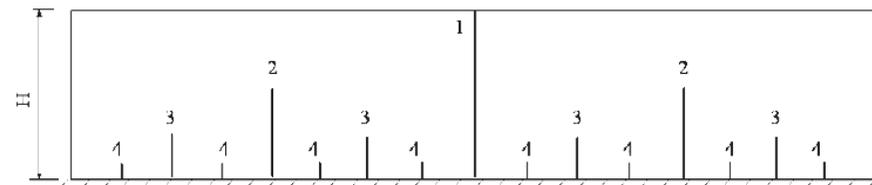
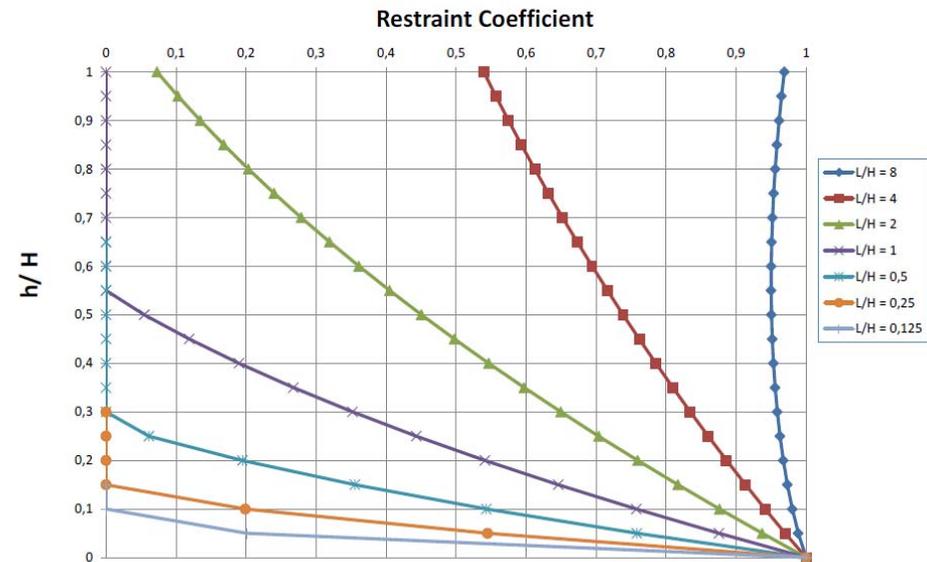
Plus les fissures se forment et moins elles se propagent sur la hauteur.

L'ouverture des fissures est variable sur la hauteur

Fissures plus ouvertes en haut (non systématiques)

Fissures mieux réparties en bas

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



Les différents types de bridage

bridage le long d'un bord: calcul d'ouverture de fissures selon EN1992-3 (silos réservoirs) ou CIRIA

Coefficient de bridage EN1992-3 $R_{ax} \approx 0,5$ (inclus fluage)

Coefficient de bridage CIRIA R_{ax}

- élastique selon H/L
- relaxation des contraintes: $K_1 = 0,65$ à adapter selon fluage
- coefficient de réduction selon raideur de la base

$$R_j = \frac{1}{1 + \frac{A_n E_n}{A_o E_o}}$$

Avec A_n et E_n : Section et Module du nouveau béton
 A_o et E_o : Section et Module du vieux béton

Ouverture de fissures: $w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ et $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} - \frac{0,5 \cdot \alpha_e \cdot f_{ct,eff}}{E_s}$

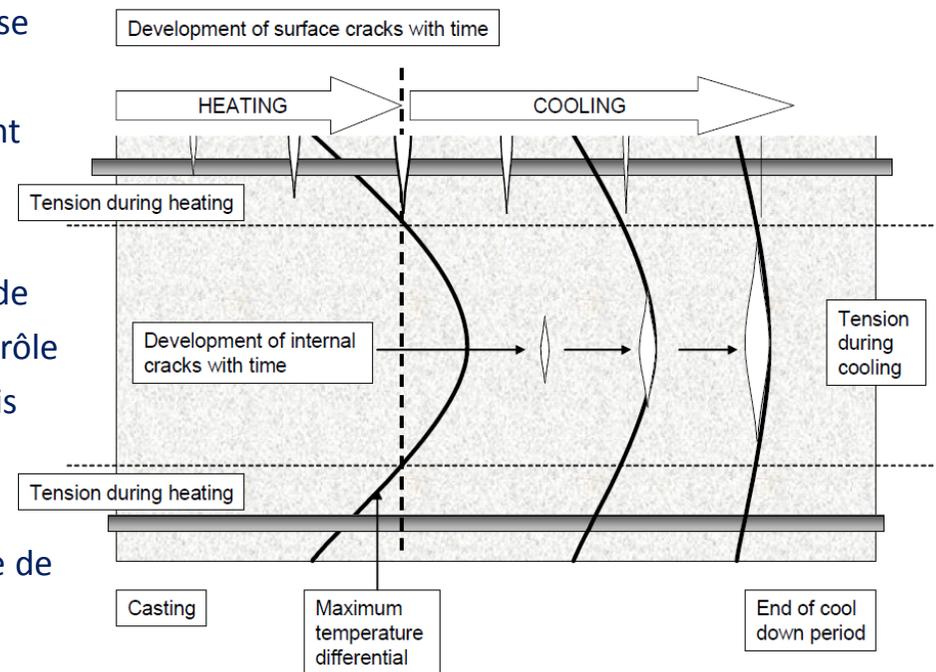
Les différents types de bridage

3^{ème} type de bridage: **Bridage interne:**

- essentiellement pour les pièces épaisses
- les déformations imposées ne sont jamais uniformes
- Pris en compte dans EN1992-1-1 par le coefficient k selon épaisseur de 1 (pour 300 mm) à 0,65 (pour 800 mm).

Exemple du retrait thermique au bétonnage:

- Fissuration éventuelle sur le parement pendant la phase d'augmentation de la température
- Fissuration à cœur pendant la phase de refroidissement avec une ouverture plus grande si bridage externe
- Le retour d'expérience du projet CEOSfr est que l'état de contrainte de compression pendant l'échauffement a un rôle non négligeable pour limiter la fissuration et doit être pris en compte
- Le retour d'expérience du projet CEOSfr montre que la fissuration peut commencer à un niveau de contrainte de traction très faible par rapport à la valeur caractéristique



Le ferrailage minimal

EN1992-1-1:

Avec $\sigma_s = f_{yk}$

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

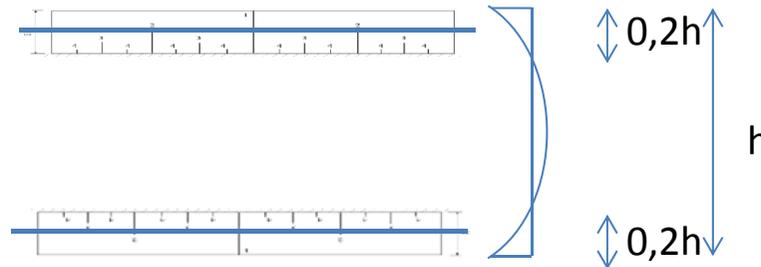
- A_c surface béton tendue
- k_c répartition des contraintes (1 traction; 0,4 flexion; 0,5 fissure à l'échauffement)
- k effet des contraintes non uniformes, mais limité) 0,65 pour $h = 800$ mm

Nécessité d'analyser la situation provoquant la fissuration:

- État de contrainte
- Bridage dominant (aux extrémité, sur un bord, bridage interne)

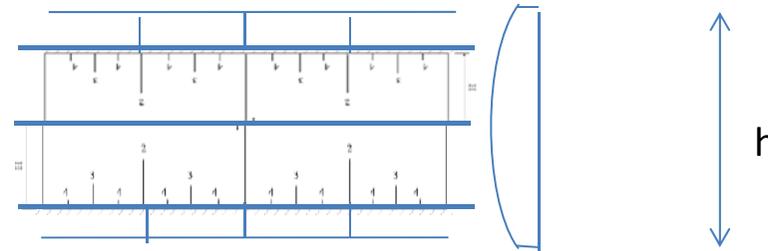
Le ferrailage minimal

Fissuration à court terme à l'échauffement: 2 à 3 jours (bridage interne)
Ferrailage de parement



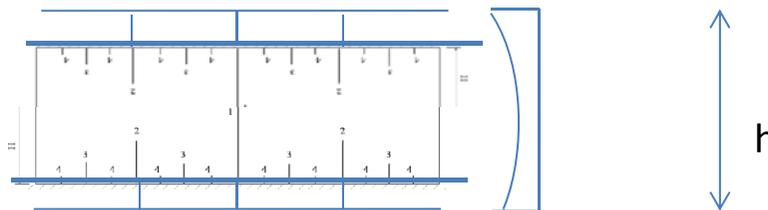
$$A_{smin} = \frac{0,5 \cdot 0,2 \cdot h \cdot f_{cteff}}{f_{yk}}$$

Fissuration à court terme au refroidissement: 10 à 30 jours selon épaisseur
Ferrailage de parement + ferrailage interne



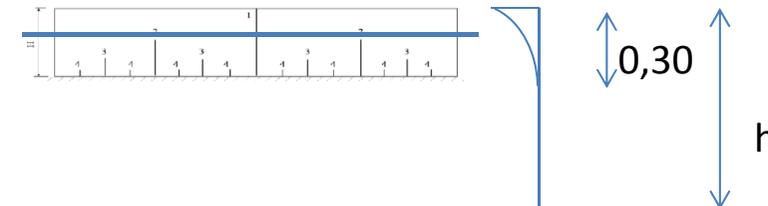
$$A_{smin} = \frac{0,65 \cdot 0,5 \cdot h \cdot f_{cteff}}{f_{yk}}$$

Fissuration à long terme retrait de dessiccation
Ferrailage de parement



$$A_{smin} = \frac{0,65 \cdot 0,5 \cdot h \cdot f_{cteff}}{f_{yk}}$$

Fissuration thermique climatique journalier
Ferrailage de parement



$$A_{smin} = \frac{0,5 \cdot 0,3 \cdot f_{cteff}}{f_{yk}}$$

Conclusions

Bien identifier:

- ε imposée ou $\alpha_c \Delta T$
- Bridages principaux
- Modes de fissuration
- Ferrailage minimal sur la zone tendue A_{ct}

Eviter

- Règle forfaitaire (ferrailage proportionnel à h)
- Calcul des contraintes si c'est possible

Calcul approximatif: chaque paramètre est connu à 30 % près

- f_{ct}
- α_c
- E_{cm}
- Fluage
- ε imposé

Merci pour votre attention

Le projet National CEOS fr



COMPORTEMENT ET EVALUATION DES OUVRAGES SPECIAUX
« Behaviour and Assessment of special R.C. works –
cracking & shrinkage » - www.ceosfr.org



- CEOS.fr, a French National Research Programme (2008-2011) :
 - Budget 8M€, 40 members :
 - *Companies* : EDF, Vinci, Eiffage, Bouygues, Areva, Solétanche-Bachy, Italcementi, Iosis, Setec, Co&B, Arcadis, Oxand, Nece, Advitam, Sites, Chryso, Rincent, Saipem, PX-Dam,...
 - *Lab. & Institutions* : LCPC, CSTB, CEA, IRSN, ANDRA, ATHIL, CERIB, CEBTP, LERM, CETU,...
 - *Universities* : ENS Cachan (LMT), INP Grenoble (3S-R), Insa Toulouse (LMDC), EC Nantes (GEM), U. Pau (Lasagec), Polytech' Lille (LML),...
- Aims :
 - at dealing with the control of cracking (a major concern for durability and sustainability), in particular for special works (specific use, specific shape and size, specific requirements for loading or durability...)
- Subjects :
 - Cracking under monotonic loadings
 - Behaviour under coupling loadings (THM)
 - Cracking under cyclic and seismic loadings
- Approaches :
 - Experiments on large specimens
 - Numerical modelling
 - Elaborated by engineers-practitioners
- International connection :
 - International benchmark (inscription until 15/06/10)
 - European network under construction



Les documents utiles pour traiter du retrait gêné

- **EN1992-3: silos et réservoirs**

- § 7.3.4: contrainte limite ou espacement limite - courbes au lieu de tableaux
- § 7.3.5: « Maîtrise de la fissuration due à des déformations imposées gênées »
- Annexe K: effet de la température et de l'humidité sur les caractéristiques du béton (de -25 à 200 °C) au-delà de 200 °C – voir EN1992-1-2 comportement au feu
- Annexe L: contraintes et déformations sous l'effet de déformations imposées gênées – coefficient de bridage
- Annexe M: ouverture de fissures sous l'effet de déformations imposées gênées – bridage

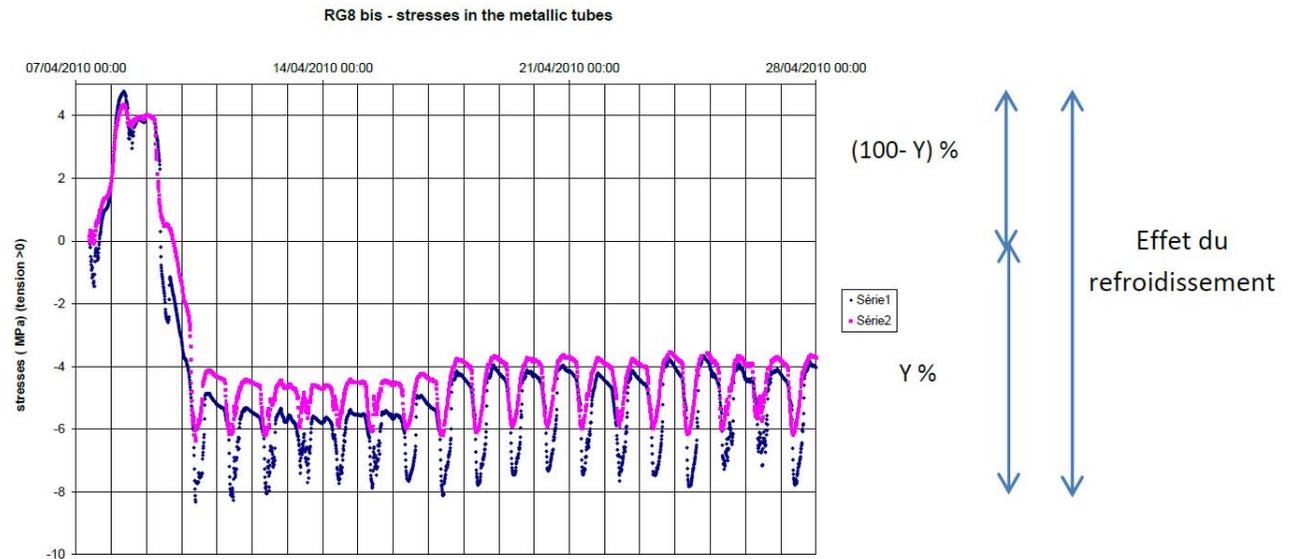
- **Autres documents d'origine étrangère:**

- ACI 207 « Mass concrete » et ACI 207-2R « Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete »
- CIRIA C660: « Early-age thermal crack control in concrete »
- GP-115-2011: « Guide de conception pour le contrôle de la fissuration des éléments lourds et des murs porteurs en béton armé due au retrait empêché »
- JCI guidelines: « for crack control of mass concrete »

Les différents types de bridage

3^{ème} type de bridage: **Bridage interne:**

- Compression pendant l'échauffement



La quantité Y est de l'ordre de 60 %.

- Fissuration à une traction très faible par rapport à la résistance $\sigma_c \approx 1,8 \text{ MPa}$