

---

# Fissuration des structures massives due au retrait gêné du béton : résultats du projet national CEOS.fr

Torrenti Jean Michel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris Est, Ifsttar, mail : [jean-michel.torrenti@ifsttar.fr](mailto:jean-michel.torrenti@ifsttar.fr), pour le PN CEOS.fr

---

*RÉSUMÉ.* Pendant le projet national CEOS.fr, plusieurs expériences ont été conduites sur des structures massives en béton armé afin d'étudier la fissuration sous retrait gêné de ces structures. Trois poutres en forme de I ayant une section centrale de 0,8m par 0,5m et dont le retrait était gêné ont été testées. Des exemples de l'évolution de la température, des déformations et des forces sont donnés. Une analyse du processus de fissuration a montré que les fissures apparaissent pour une contrainte plus faible que la résistance en traction. A partir des mesures de déformations, les forces et contraintes dans le béton et dans les armatures peuvent être déduites. Des modélisations permettent aussi d'avoir l'état de contraintes dans les sections au très jeune âge, avant la première fissuration. Une analyse des essais permet de proposer un scénario réaliste du comportement. Enfin, des recommandations quant à l'évolution des codes dans le cas des structures massives sont proposées concernant notamment l'effet d'échelle probabiliste, les pourcentages minimaux d'armatures et l'effet combiné de la fissuration au jeune âge et en service.

*ABSTRACT.* Within the CEOS.fr national research project, several experiments on massive concrete structures were conducted to improve the knowledge on the cracking phenomenon when deformations at early age are restrained. Three I-shaped restrained shrinkage testing bodies, with a central part which has a cross-section of 0.80 mx0.50 m were tested. Examples of the evolution of temperature, strains and forces are given. A first analysis of the cracking process shows that the cracks could appear for stresses below the tensile strength. With mainly strain information, global strain and local strain in concrete and on rebars, the force and then the stresses in concrete and rebars could be deduced. From numerical simulation and more simple elastic approach, state in each beam section could be obtained, and thus concordance between all the measures established. Various hypotheses were analysed to explain strain measured and the corresponding forces in each component (concrete, rebars and struts) during specific period of early age. A particular attention was paid on the early age before the occurrence of the first crack. A realistic scenario is then proposed to explain the measurements. These hypotheses are done using a complementary numerical modelling and measurement analysis. Finally, proposals for the evolution of codes in the case of massive structures concerning the probabilistic size effect, the minimum reinforcement and the combined effects of loads and imposed deformations on cracking are considered.

*MOTS-CLÉS :* béton armé, jeune âge, fissuration, retrait gêné.

*KEY WORDS :* reinforced concrete, early age, cracking, restrained shrinkage.

---

## 1. Introduction

La maîtrise de la fissuration du béton armé et du béton précontraint est indispensable pour garantir la fiabilité et la durabilité des structures ainsi que certaines propriétés telles que l'étanchéité à l'eau ou à l'air. L'Eurocode 2 et plus récemment le code modèle MC2010 prennent en compte la durabilité des structures et contiennent des règles de calcul pour estimer et limiter la fissuration en fonction des caractéristiques du béton, de ses armatures et des classes d'exposition de l'ouvrage. Cependant ces règles sont en général prévues pour des ouvrages usuels. Elles ne rendent pas suffisamment compte du comportement d'ouvrages comportant des structures massives en béton armé ou précontraint ou répondant à des exigences de service particulières (étanchéité, durée de vie, etc.) ou encore soumis à des chargements exigeant une protection élevée contre les aléas naturels ou agressions extérieures par exemple. Pour ces ouvrages, les effets Thermo-Hydro-Mécaniques (THM), les effets d'échelle et structuraux induisent des comportements à la fissuration spécifiques.

C'est pour étudier la spécificité des structures massives vis-à-vis de la fissuration que le projet CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux vis-à-vis de la fissuration et du retrait) a été lancé. Ce projet s'est déroulé de 2010 à 2014 et a regroupé 41 partenaires français (laboratoires, institutions de recherche, bureaux d'études, entreprises de construction, industriels, maître d'ouvrages et maître d'œuvre). Il a été financé par ces partenaires et par le Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie. Il a donné lieu notamment à des essais en grandeur réelle sur des blocs massifs.

Ces essais ont été réalisés sur des maquettes instrumentées de types blocs prismatiques à l'échelle 1 et 1/3 et de voiles à l'échelle 1/3, afin de répondre aux trois thématiques suivantes : fissuration sous chargement statique monotone, comportement Thermo-Hydro-Mécanique (THM) des ouvrages en béton et fissuration sous chargement cyclique. Chacun des essais sur blocs prismatiques (RG : blocs en retrait gêné et RL : blocs en retrait libre), voiles 1/3 et blocs parallélépipédiques RL à l'échelle 1/3 ont permis de fournir des données pour améliorer les modèles prédictifs de fissuration et alimenter les codes de calculs par éléments finis [DEM 10].

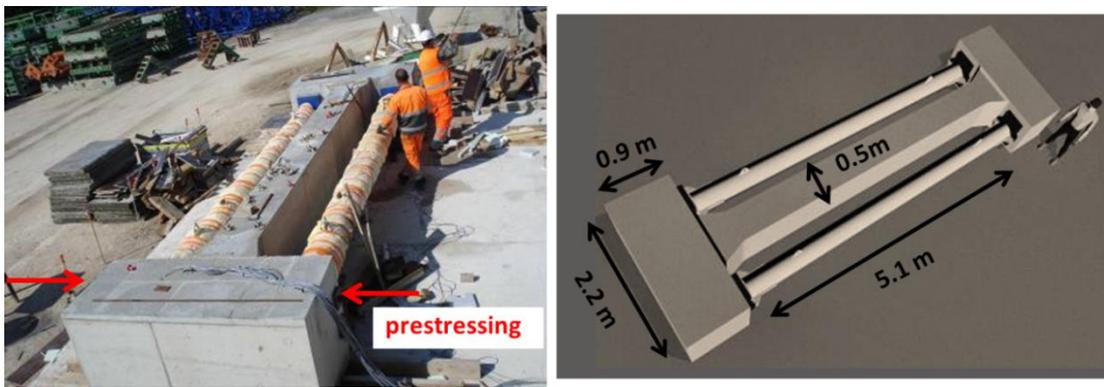
Cet article présente la partie expérimentale concernant le THM et une synthèse des résultats obtenus. Pour une analyse plus complète voir la référence [BUF 15]. Dans une seconde partie, les propositions d'évolution des codes concernant l'effet d'échelle probabiliste, le pourcentage minimum d'armatures et la combinaison des effets des charges de service et du retrait gêné sur la fissuration seront présentées.

## 2. Programme expérimental

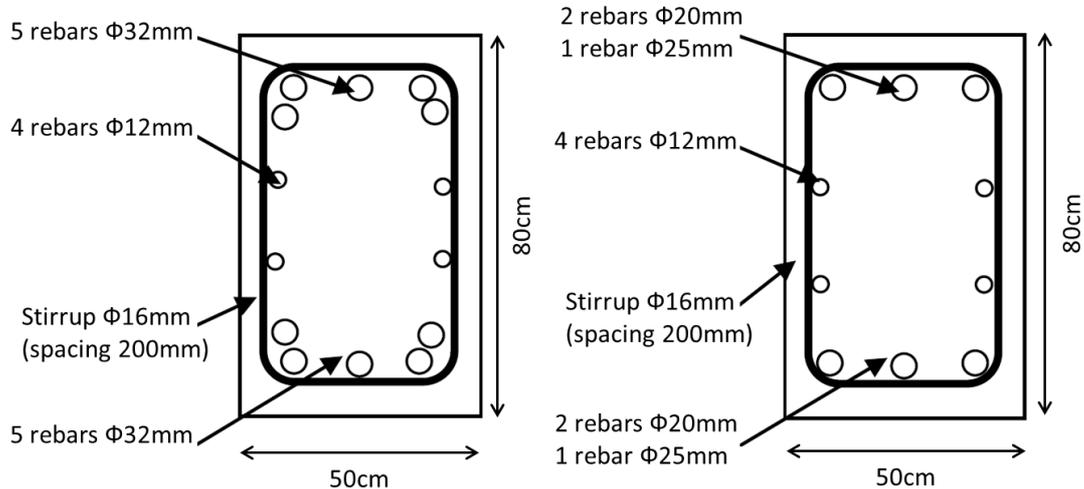
### 2.1 Géométrie et ferrailage de la structure testée

Les structures de retrait gêné sont des poutres armées massives en I, composées d'une section centrale (5.1 m de long, 50 cm de large et 80 cm de haut) et de deux têtes massives (90 cm de long, 2.2 m de large et 90 cm de haut) - figure 1. Deux tirants métalliques largement dimensionnés (diamètre 32.4 cm et épaisseur 5.5 cm) étaient placés latéralement entre les deux têtes afin de limiter les déformations du béton. Les tirants étaient équipés de cordes vibrantes afin de mesurer les forces générées et de déduire l'exact niveau de gêne des déformations. Trois corps d'essai ont été testés : RG8, la poutre de référence avec un pourcentage d'armatures égal à 2% ; RG9, avec un ferrailage réduit à 0.56% et RG10, avec un ferrailage de 2% et un enrobage supérieur (50 mm au lieu de 30mm pour les 2 autres poutres). La Figure 2 montre le ferrailage de la section centrale des poutres. Toutes les poutres étaient fortement instrumentées, à la fois extérieurement et de manière interne avec des sondes de température, des extensomètres à corde vibrante, des capteurs de déplacement longue base à fibre optique et des auges de déformations sur les armatures (pour une complète description de l'instrumentation se reporter à [BUF 15]).

Les structures étaient placées à l'extérieur et les conditions environnementales ont été enregistrées sur place depuis l'instant du coulage du béton. Les caractéristiques thermiques des coffrages et les variations de la température extérieure, l'humidité relative, la vitesse du vent et la radiation solaire des trois essais sont disponibles pour la communauté à partir de la base de données Cheops (<https://cheops.necs.fr>) qui comprend aussi l'ensemble des résultats des essais.



**Figure 1.** Géométrie des poutres RG.



**Figure 2.** Ferrailage des sections centrales : sur la gauche RG8 et RG10, sur la droite RG9

## 2.2 Le béton

La composition du béton utilisé lors des expérimentations du projet CEOS.fr comprenait du ciment CEM I 52.5 N et deux fractions granulaires (0/4 and 4/20). Le rapport eau/ciment ( $e/c$ ) était égal à 0.46 et la teneur en ciment était de  $400 \text{ kg/m}^3$ . Un superplastifiant de type polycarboxylate a été utilisé avec un dosage égal à 1.35% de la teneur en ciment.

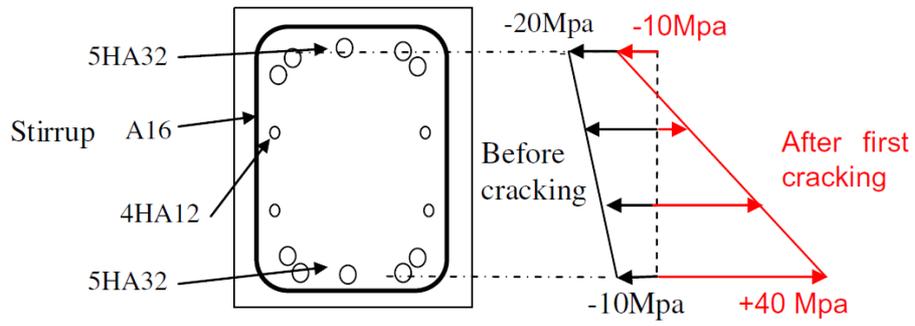
Les propriétés du béton ont été largement caractérisées : évolution des résistances en compression et traction, du module d'Young, de l'énergie de fissuration  $G_f$ . L'évolution du degré d'hydratation a été aussi mesurée afin de pouvoir exprimer l'évolution des paramètres mécaniques en fonction de ce paramètre. Enfin, d'autres tests ont été pratiqués : retrait et fluage, dégagement de chaleur adiabatique... L'ensemble des résultats de ces essais est disponible dans la base de données Cheops.

## 3. Analyse des résultats - contraintes au jeune âge

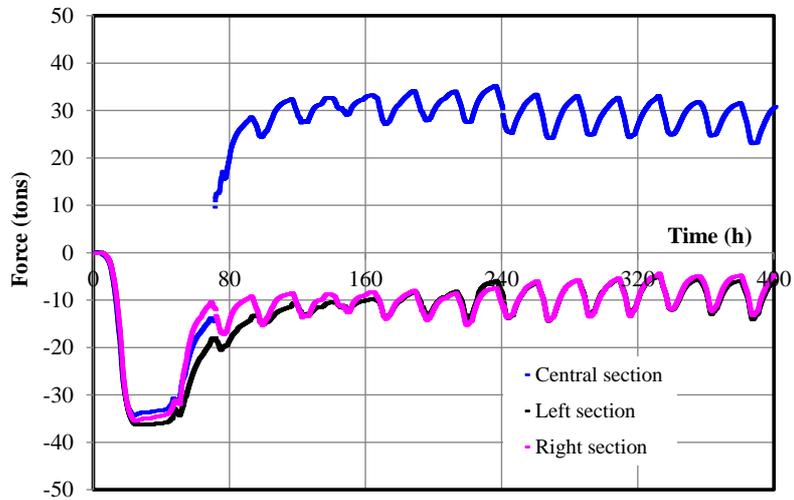
### 3.1 Constatations expérimentales

Le comportement du ferrailage longitudinal de la poutre RG8 est analysé dans ce paragraphe. Trois sections de cette poutre étaient instrumentées avec des jauges résistives collées sur les armatures  $\text{Ø}32 \text{ mm}$  hautes et basses : la section centrale et deux autres sections situées symétriquement à 80 cm du milieu de la poutre. Les jauges mesuraient la déformation mécanique, qui peut être directement utilisée pour estimer les contraintes longitudinales dans les armatures hautes et basses à partir d'une relation élastique classique. Un profil typique des contraintes déduites de la mesure des déformations des armatures obtenues en prenant  $E_s=210 \text{ GPa}$ , est illustré à la Figure 3. Le gradient de contrainte de 10MPa entre les armatures hautes et basses est dû au poids propre de la poutre. A partir des contraintes, la force reprise par le ferrailage peut être calculée (figure 4).

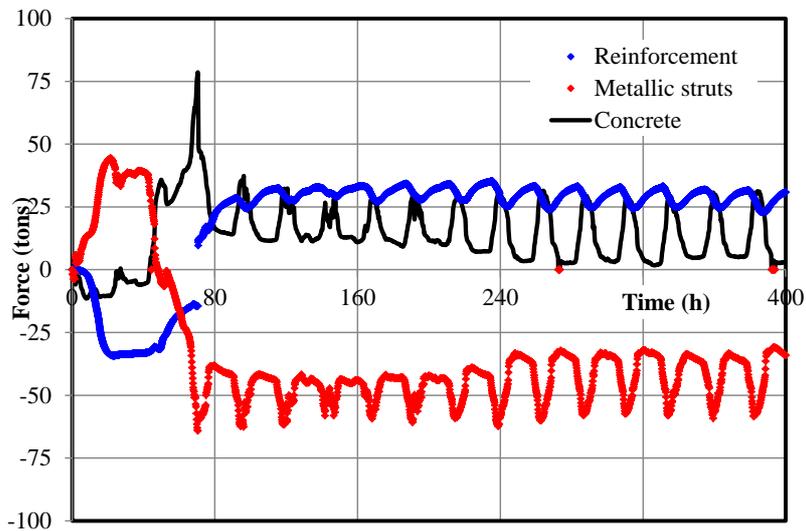
Comme la force dans les butons est également connue, la force totale dans la section de béton peut être déduite (figure 5).



**Figure 3.** Contraintes dans le ferrailage de la section centrale de la poutre RG8 72h après le coulage, juste avant et après la première fissuration (les contraintes de traction sont prises positives)



**Figure 4.** Force reprise par le ferrailage longitudinal en fonction du temps (poutre RG8)



**Figure 5.** Force reprise par le ferrailage longitudinal, les butons et le béton en fonction du temps (poutre RG8 – section centrale)

### 3.2 Analyse des résultats

La force reprise par le béton juste avant fissuration équilibre la force de compression dans les butons (-61 tonnes) et celle dans le ferrailage (-14 tonnes). Elle correspond à une contrainte de traction de +1.9 MPa dans le béton. Cette valeur de 1.9MPa est plus faible que la résistance en traction moyenne mesurée à partir d'essais de fendage, qui était proche de 4MPa pour le degré d'hydratation atteint après 72h. La différence peut être expliquée par plusieurs causes :

- Le profil non homogène des contraintes sur la hauteur de la section centrale, dû comme expliqué auparavant au poids propre de la poutre. Celui-ci induit une contrainte de +5MPa dans la partie basse du ferrailage ce qui correspond à +0.8MPa de traction dans la fibre inférieure de béton de la poutre ;
- Un effet d'échelle probabiliste [ROS 94] [SEL 14] : comparé au volume de l'éprouvette utilisée pour l'essai de fendage la fissuration dans la structure réelle concerne un volume beaucoup plus grand. La probabilité de rencontrer un défaut étant plus grande lorsque le volume augmente, cela se traduit par une réduction probabiliste de la résistance en traction (cf. 4.1) ;
- Une autre cause de l'hétérogénéité des contraintes peut être aussi l'existence d'un gradient de température lors de l'hydratation qui n'est pas homogène dans la section ce qui conduit à l'existence de contraintes auto-équilibrées ;
- Un endommagement dû au couplage avec le fluage peut aussi être invoqué : sous l'effet de charges soutenues l'endommagement évolue et une fissuration peut survenir pour des valeurs plus faibles que la résistance en traction [BRI 11], [TOR 11] ;
- Enfin, on ne peut totalement écarter l'influence de la grande quantité de capteurs et fils associés présents dans la section centrale qui, certainement, perturbent le profil de contraintes et peuvent accélérer le processus de fissuration.

### 4. Analyse des résultats - contraintes au jeune âge

Les recommandations du projet CEOS concernent plusieurs sujets comme le calcul de l'ouverture des fissures à l'ELS, la fissuration des voiles, le retrait et fluage des structures massives et des considérations sur le béton au jeune âge [CEO 15]. Ici, trois points concernant le jeune âge sont présentés : l'effet d'échelle, le ferrailage minimum au jeune âge et la combinaison des effets de fissuration dus à un retrait gêné et à des charges permanentes.

#### 4.1 Effet d'échelle probabiliste

L'hétérogénéité du béton ainsi que son comportement non-linéaire post-pic au-delà de sa contrainte limite de traction initiale entraîne systématiquement une diminution de la résistance à la fissuration lorsque le volume chargé est important. La première fissuration est généralement reliée à la contrainte limite en traction, établie par des essais sur éprouvette normalisée ou non, mais de petits volumes. L'effet d'échelle se traduit donc par une modification de la résistance à la traction dans l'élément de grande taille (pour sa première fissuration) par rapport à la valeur de la contrainte limite de traction moyenne mesurée sur éprouvette.

Cette modification est une réduction si le volume tendu considéré est supérieur au volume tendu dans l'éprouvette. Ce phénomène bien connu comme l'effet d'échelle de Weibull basée sur la théorie du maillon le plus faible [SEL 14]. Il a été mis en évidence et quantifié notamment par Rossi [ROS 94] qui a mis en évidence la baisse de la contrainte moyenne de traction du béton ( $f_{ctm}$ ) en fonction du volume considéré, la diminution de l'écart type obtenu sur les mesures de cette contrainte de traction avec l'augmentation du volume pour un même nombre d'échantillons, et le fait que plus la résistance du béton est faible, plus l'effet d'échelle est important.

Pour les éléments courants, l'effet d'échelle est implicitement pris en compte dans l'EC2 et le MC2010, notamment en ce qui concerne la valeur caractéristique  $f_{ctk,0,05}$  qui garantit qu'au plus 5% des valeurs rencontrées sont inférieures à  $f_{ctk,0,05}$ . Pour les éléments de volume important (pièces massives), la probabilité d'observer l'apparition de la première fissure pour une valeur  $f_{ct,inf}$  inférieure à  $f_{ctk,0,05}$  est plus élevée car le volume de béton concerné est plus important et l'effet d'échelle se manifeste davantage.

Pour un volume donné  $V_{eq}$ , la résistance en traction peut être estimée à partir de la résistance mesurée lors d'un essai de fendage sur une éprouvette cylindrique 11x22cm :

$$f_{ctm}^{V_{eq}} = f_{ctm}^{V_{ref}} \left( \frac{V_{ref}}{V_{eq}} \right)^{1/k} \quad [1]$$

où  $k$  est le paramètre de Weibull et  $V_{ref}$  le volume de référence concerné par la traction lors d'un essai de fendage, ici estimé égal à  $V_{ref} = 300\text{cm}^3$ . Le volume  $V_{eq}$  correspond au volume en traction défini par la relation suivante (dans laquelle chaque dimension est limitée à 1,25 m) :

$$V_{eq} = r \min(1,25; l) \min(1,25; b) \min(1,25; h_{ceff}) \quad [2]$$

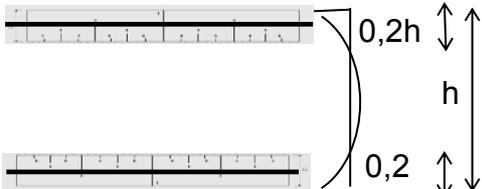
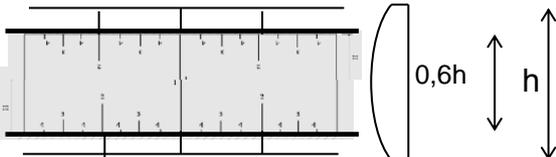
où  $l$ ,  $b$ , and  $h_{ceff}$  sont respectivement la longueur, la largeur et la hauteur effective du volume en traction,  $r$  est un coefficient de réduction prenant en compte le caractère non-homogène du champ de contrainte avant la première fissuration ( $r = 1$  pour une traction axiale et  $r = 1/(1+k)$  dans le cas d'une flexion pure,  $k$  étant l'exposant de Weibull).

Dans le cas des poutres RG, les dimensions étaient les suivantes :  $l = 5,1\text{m}$   $b = 0,5\text{m}$  et  $h_{ceff} = 0,8\text{m}$  d'où  $V_{eq} = 1,25 \times 0,5 \times 0,8 = 0,5$  et avec  $k=11$  et and  $f_{ctm}^{V_{ref}} = 4\text{MPa}$  pour le degré d'hydratation correspondant à l'âge de première fissuration lors du test RG8 [BUF 15] alors  $f_{ctm}^{V_{eq}} = 4 \times (310^{-3}/0,5)^{1/11} = 2,5 \text{ MPa}$ . On voit donc que l'effet d'échelle probabiliste permet d'expliquer pourquoi la première fissuration apparaît pour une contrainte beaucoup plus faible que la résistance en traction mesurée sur éprouvette de laboratoire.

#### 4.2. Ferrailage minimum au jeune âge

Au jeune âge, le ferrailage minimum doit contrôler les ouvertures de fissures dues aux gradients de température ou au retrait gêné. Différents cas doivent être considérés. Le tableau 1 donne les sections de béton tendu, le profil des contraintes et le ferrailage minimum pour chaque cas considéré en prenant en compte l'effet d'échelle. Le premier cas correspond à un gradient de température à environ 3 jours après le coulage. Dans ce cas la résistance à 3 jours doit être calculée en prenant en compte l'effet d'échelle mais dans ce cas la couche fortement tendue est peu épaisse. Le deuxième cas correspond à un instant plus long de 10 à 20 jours, donc une résistance plus grande en traction, mais ici l'effet d'échelle peut être important car une grande partie de la surface est fortement tendue. Le dernier cas peut se produire après décoffrage ou arrêt de la cure. Dans ce cas l'effet d'échelle est faible. Les principes ci-dessous doivent être adaptés dans le cas de pièces d'épaisseur variable. Dans ce cas, la zone tendue doit être estimée en étudiant l'hydratation dans le temps pour chacune des épaisseurs ou en étudiant la géométrie globale de la pièce. On notera enfin, que la prise en compte de l'effet d'échelle conduit dans ce cas à une quantité d'armatures plus faible.

Tableau 1. Ferrailage minimum – cas du jeune âge.

Epaisseur $h_t$ de la couche pour la contrainte maximum	Situation	Ferrailage minimum et valeur de $h_t$
<p>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</p> $A_c = 0.20 h \cdot 1 \text{ m}^2$ <p>avec un diagramme des contraintes de traction assimilé à un double triangle</p>	<p>Phase d'échauffement ou décoffrage</p> 	$A_{smin} = \frac{0,5 \cdot 0,2h \cdot 1 \cdot f_{ctm}^{V_{eq}}}{f_{yk}}$ <p><math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur <math>h_t</math> à la contrainte maximale:            (*) <math>h_t = 0,2 h / 3</math></p>
<p>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</p> $A_c = 0.5 h \cdot 1 \text{ m}^2$ <p>avec un diagramme de traction quasi uniforme.</p>	<p>Phase de refroidissement avec bridage externe aux extrémités à l'exclusion d'un bridage sur les bords</p> 	$A_{smin} = \frac{k \cdot 0,5h \cdot 1 \cdot f_{ctm}^{V_{eq}}}{f_{yk}}$ <p><math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur <math>h_t</math> à la contrainte maximale:            (**) <math>h_t = 0,6 h</math></p>

<p>Lorsque la fissuration est due au cycle journalier de température, la hauteur <math>h_t</math> est égale à 0,30 m et l'aire de la partie tendue peut être évaluée à</p> $A_c = 0,30 \cdot 1\text{m}^2$ <p>avec un diagramme des contraintes de traction assimilé à un triangle.</p>		$A_{smin} = \frac{0,50 \cdot 0,30 \cdot 1 \cdot f_{ctm}^{V_{eq}}}{f_{yk}}$ <p><math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> est évalué pour une épaisseur de la couche de hauteur <math>h_t</math> à la contrainte maximale: (***) <math>h_t = 0,3/3 = 0,1\text{m}</math></p>
<p>(*) Dans le premier cas, la zone tendue a une épaisseur de 0,2 h, cela suppose une variation parabolique dans l'épaisseur de la paroi et une contrainte moyenne nulle. Il est supposé que la zone la plus tendue permettant de calculer <math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> correspond à 1/3 de la zone tendue.</p> <p>(**) Dans le 2<sup>ème</sup> cas, il est supposé que la section la plus tendue permettant de calculer <math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> correspond à <math>h_t = 0,6 h</math>. Le ferrailage pour chaque face est la moitié du ferrailage total, ce qui explique le coefficient 0,5.</p> <p>(***) Dans le 3<sup>ème</sup> cas, la zone tendue s'étend sur une hauteur de 0,30 m (propagation de la température en cycle journalier) et la zone la plus tendue permettant de calculer <math>f_{ctm}^{V_{eq}}</math> correspond à 1/3 de la zone tendue.</p>		

### 4.3. Combining effects due to imposed deformations and deformations under working loading

Quand il y a un risqué de fissuration au jeune âge en plus de la fissuration en service sous charges permanents, une méthodologie dépendant des fonctions demandées à la structure considérée est proposée. Notamment, il est proposé de distinguer:

- les cas où la limitation de l'ouverture des fissures traduit directement une exigence fonctionnelle d'étanchéité (par référence notamment à l'Eurocode 2 partie 3 où les ouvertures maximales se situent entre 0,05 et 0,2 mm)
- les cas où la vérification de l'ouverture des fissures à l'ELS vise essentiellement une limitation du taux de travail des armatures, la durabilité de l'ouvrage, l'aspect et l'absence de modification par une fissuration excessive du fonctionnement continu des parties d'ouvrages (par référence notamment à l'Eurocode 2 parties 1 et 2 où les ouvertures maximales sont fixées en fonction de la nature de l'environnement décrit par les classes d'exposition).

#### 4.3.1. Cas des structures avec exigence sur l'étanchéité

Dans le cas des ouvrages pour lesquels la vérification de la limitation de l'ouverture des fissures traduit une exigence fonctionnelle d'étanchéité, on peut considérer que les effets irréversibles d'ouverture des fissures sont cumulatifs. Il faut donc cumuler :

- l'ouverture des fissures qui a pu se produire au jeune âge sous les effets thermiques, hydriques et mécaniques éventuellement cumulés au cours de ce qui est à considérer comme la période d'exécution de l'ouvrage,
- l'ouverture de fissures supplémentaires qui a pu être causée par les sollicitations thermiques et mécaniques quasi-permanentes en service,
- le cas échéant, l'ouverture de fissures supplémentaire associée au scénario de vérification de l'étanchéité (valeurs d'actions mécaniques et / ou thermiques et hydriques caractéristiques voire accidentelles le cas échéant, le cahier des charges se prononçant normalement sur les coefficients de combinaison et la valeur de ces actions).

Les recommandations CEOS précisent les cas où le cumul n'est pas total.

#### 4.3.2. Cas des structures avec exigence de durabilité

Pour les cas, plus courants, où la vérification de l'ouverture des fissures à l'ELS vise essentiellement une limitation du taux de travail des armatures, la durabilité de l'ouvrage en fonction de l'environnement auquel il est soumis, l'aspect des parements, et l'absence de modification par une fissuration excessive du fonctionnement

continu des parties d'ouvrages, il semble en revanche justifié de réaliser plusieurs vérifications et d'en prendre l'enveloppe, sans considérer un cumul irréversible des effets de chaque situation. Cela sous-entend l'hypothèse, souvent fondée, qu'une fissuration initiale maîtrisée aura pu se produire, produisant un assouplissement relativement homogène de la structure et une certaine adaptation dont rendra compte un « module différé » du béton, sans remettre en cause le fonctionnement général de la structure et la capacité de reprise d'effort des armatures. Tel est par exemple actuellement le raisonnement sous-jacent à la vérification des tabliers de ponts mixtes [KRE 95]. Il reste nécessaire d'analyser les situations de projet pour ne pas omettre certaines actions permanentes. Et il ne semble pas que le type de bridage doive modifier la règle de cumul à adopter. Les recommandations CEOS précisent les cas de vérifications.

## 5. Conclusions

Le projet national CEOS.fr a permis la réalisation d'un large programme expérimental concernant le comportement de structures massives en béton. Concernant le risqué de fissuration au jeune âge lorsque le retrait est gêné, l'analyse des résultats expérimentaux a montré que la première fissure apparaît pour une contrainte de traction très inférieure à la résistance en traction mesurée en laboratoire. Considérant l'ensemble des sources possibles pour expliquer ce phénomène, un effet d'échelle probabiliste paraît une bonne explication.

Des recommandations pour la maîtrise de la fissuration dans les structures en béton armé ont été proposées par le projet CEOS.fr. Au jeune âge, il est proposé de prendre en compte l'effet d'échelle, particulièrement pour la détermination du ferrailage minimum. Concernant la combinaison des ouvertures de fissures au jeune âge et à l'ELS, une méthodologie dépendant de la fonctionnalité de la structure considérée est suggérée. Deux cas sont considérés : celui de structures où l'étanchéité à l'eau ou à l'air est requise et celui de structures où seule la durabilité est à considérer.

## 6. Remerciements

Les résultats présentés ici ont été obtenus dans le cadre du projet national CEOS.fr.

## 7. Bibliographie

- [BRI 11] BRIFFAUT, M., BENBOUDJEMA, F., TORRENTI, J. M., & NAHAS, G. (2011). Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures. *Engineering Structures*, 33, 1390–1401.
- [BUF 15] L. BUFFO-LACARRIERE, S. BARON, F. BARRE, D. CHAUVEL, A. DARQUENNES, J.-P. DUBOIS, J. GAYETE, F. GRONDIN, B. KOLANI, H. LANÇON, A. LOUKILI, G. MOREAU, C. ROSPARS, A. SELLIER & J.-M. TORRENTI (2015): Restrained shrinkage of massive reinforced concrete structures: results of the project CEOS.fr, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- [CEO 15] PROJET NATIONAL CEOS.FR, *Recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration*, Presses des Ponts, 2015.
- [DEM 10] DEMILECAMPS, L. (2010). Reliable shrinkage and crack design: CEOS.fr French national research program, experimental aspects. *Third International fib Congress* (pp. 4888–4902), Washington, DC, USA.
- [KRE 95] KRETZ, K., & al. (1995). *Ponts mixtes Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles*. Bagneux, France: Setra.
- [ROS 94] ROSSI, P., WU, X., LEMAOU, F., & BELLOC, A. (1994). Scale effect on concrete in tension, *Materials and Structures*, 27, 437–444.
- [SEL 14] SELLIER, A., & MILLARD, A. (2014). Weakest link and localisation WL2: A method to conciliate probabilistic and energetic scale effects in numerical models, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18, 1177–1191.
- [TOR 11] TORRENTI, J. M., DE LARRARD, T., & BENBOUDJEMA, F. (2011). *Tertiary creep: A coupling between creep and damage – Application to the case of radioactive waste disposal*. In G. Pijaudier Cabot and F. Dufour (Eds.), *Damage mechanics of cementitious materials and structures* (pp. 183–202). Gilles Pijaudier-Cabot et Frédéric Dufour, Wiley, ISBN 978-1-84821-340-1.