

Evaluation du risque de fissuration due au retrait gêné des structures en béton

Jean Michel Torrenti¹

¹ Université Gustave Eiffel, département Matériaux et structures, France

RESUME L'annexe D du futur EC2 donne des recommandations pour estimer le risque de fissuration par retrait gêné des structures en béton. En effet, si les déformations sont gênées, il y a apparition de contraintes de traction dues aux retraits du béton et donc un risque de fissuration. Après une description de l'annexe D, les recommandations sont appliquées à un cas bien documenté : les murs du site de la centrale nucléaire de Civaux. L'estimation du risque de fissuration dans les cas présentés est en bon accord avec les constatations expérimentales.

Mots-clés béton, fissuration, jeune âge, retrait gêné

I. INTRODUCTION

L'annexe informative D du projet de prEN 1992-1-1 ver. 2021-01 du futur Eurocode 2 (EC2) donne une méthode d'évaluation de la fissuration au jeune âge et à long terme en cas de retrait gêné. Ici, nous ne considérons que le risque de fissuration au jeune âge. Après une présentation générale de l'annexe, celle-ci est appliquée au cas des murs de Civaux.

Le risque de fissuration $R_{cr}(t)$, qu'il convient de maintenir inférieur à 1, est évalué au moyen de la relation suivante : $R_{cr}(t) = \frac{\sigma_c(t)}{0,8 f_{ct,eff}(t)}$ [éq. 1]

où $\sigma_c(t)$ est la contrainte dans le béton et $f_{ct,eff}(t)$ est la résistance à la traction à l'instant t (une évaluation expérimentale ou la relation proposée dans l'annexe B de EC2 pourrait être utilisée). Le coefficient 0,8 correspond à un effet de chargement soutenu (couplage entre fluage et endommagement, voir par exemple (Torrenti, 2018)).

Dans le cas de retrait gêné, des contraintes de compression sont d'abord générées dans les structures massives en raison de l'élévation de la température, puis des contraintes de traction apparaissent lors du refroidissement. La figure 1 (reprise de l'annexe D du prEN 1992-1-1 ver. 2021-01) donne un exemple d'évolution de la contrainte. Pour évaluer le risque de fissuration, on a besoin de définir (cf. figure 2) T_{ci} la température du béton frais, $T_{c,max}$ la température maximale du béton due à la chaleur d'hydratation, T_0 la température de l'ouvrage empêchant le retrait (et correspondant à la température finale). Ces températures doivent être connues ou évaluées au moyen d'une modélisation de la réaction d'hydratation du ciment (voir par exemple (Azenha et al., 2021)) ou avec l'utilisation d'une méthode simplifiée (voir par exemple les directives françaises pour la prévention de la formation retardée d'ettringite (Beaufort et al., 2017)).

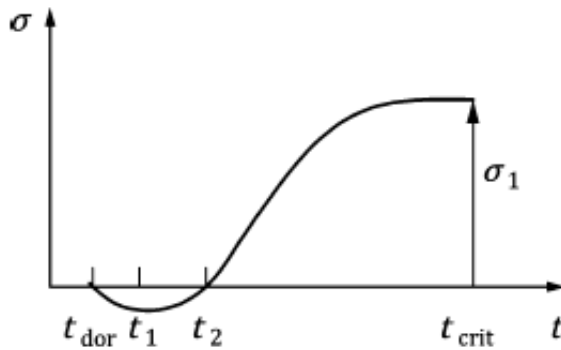


FIGURE 1. Evolution de la contrainte. t_2 est l'instant où la contrainte passe de compression à traction. La valeur par défaut est 1 jour.

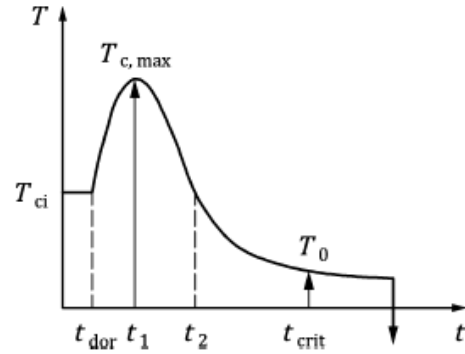


FIGURE 2. Histoire de température de l'élément structural considéré.

II. EVALUATION DES CONTRAINTES AU JEUNE AGE

Au jeune âge, la contrainte est générée par le refroidissement et par l'effet du retrait endogène depuis t_2 et par le fait que le retrait est en partie gêné (effet des conditions aux limites). Cet effet est considéré au moyen du facteur R_{ax} (« restraints factor »). Ce facteur est obtenu au moyen de l'équation suivante : $R_{ax} = 1 - \frac{\varepsilon_{restr}}{\varepsilon_{imp}}$ [éq. 2]

où ε_{restr} est la déformation compte tenu des conditions aux limites et ε_{imp} est la déformation imposée. Le rapport $\frac{\varepsilon_{restr}}{\varepsilon_{imp}}$ peut être estimé selon une analyse élastique linéaire, et peut tenir compte du phasage de construction, le cas échéant.

Pour le cas très courant d'un mur, une valeur simplifiée $R_{ax} = 0,5$ peut être adoptée. Dans le cas d'une structure ayant une géométrie plus complexe qu'un mur, un calcul élastique permet l'estimation de R_{ax} . La contrainte est obtenue au moyen de l'équation suivante :

$$\sigma_c(t_{crit}) = R_{ax,1} \frac{E_c(t_2)}{1 + \chi\varphi_{st}} \left(k_{temp} \alpha_T (T_{max} - T_0) + (\varepsilon_{cbs}(t_{crit}) - \varepsilon_{cbs}(t_2)) \right) \quad [\text{éq. 3}]$$

où $E_c(t_2)$ est le module d'élasticité du béton à l'instant t_2 , k_{temp} est un facteur prenant en compte la réduction de température de t_1 à t_2 (voir Figure 2) et peut être pris égal à 0,9 (si t_1 et t_2 ne sont pas connus), α_T est le coefficient de dilatation thermique du béton, ε_{cbs} est le retrait endogène du béton, $\chi\varphi_{st}$ rend compte de la relaxation par fluage à court terme qui est importante, malgré le temps court, en raison de la faible maturité du béton et la présence de chaleur d'hydratation. Sa valeur peut être estimée par défaut à 0,55.

III. APPLICATION AU CAS DES MURS DE CIVAUX

Durant la construction des enceintes des centrales nucléaires de Civaux, deux murs d'essai ont été réalisés afin de reproduire les conditions de retrait gêné lors des levées successives nécessaires à la réalisation des enceintes (Ithuralde et Costaz, 93). Un mur a été réalisé en béton ordinaire (B11) et l'autre en béton hautes performances (BHP). Les murs, épais de 1m20, hauts de 1m90 et long de 20m et coulés sur un radier rigide, étaient équipés de sondes de température afin de suivre

l'évolution de celle-ci. La formulation du béton hautes performances (cf. tableau 1) avait été étudiée par F. de Larrard de manière à diminuer le dégagement de chaleur et, en conséquence, les contraintes au jeune âge (Ithurralde et Costaz, 93).

TABLEAU 1. Composition des deux bétons testés

Béton	Gravier (kg/m ³)		Sable (kg/m ³)	Ciment CEMII (kg/m ³)	Filler calcaire (kg/m ³)	Fumée de silice (kg/m ³)	Plastifiant (l/m ³)	Eau (l/m ³)
	12.5/25	5/12.5						
B11	783	316	772	350	-	-	1	195
BHP	791	309	759	266	114	40	7.7	161

La figure 3 donne l'évolution des températures au centre des murs. On peut voir, même si les températures initiales sont différentes, que la formulation BHP permet bien de réduire la température maximale atteinte dans le mur. Le tableau 2 présente les valeurs utilisées pour appliquer l'équation 3. L'estimation du risque de fissuration donne une valeur du risque de fissuration R_{cr} supérieur à 1 dans les deux cas mais très largement pour le mur en béton B11. Et le mur B11 présentait effectivement 8 fissures verticales (1×40 μm+4×100 μm+2×200 μm+1×500 μm) alors que le mur BHP n'avait qu'une seule fissure, ouverte de 100μm (figure 4).

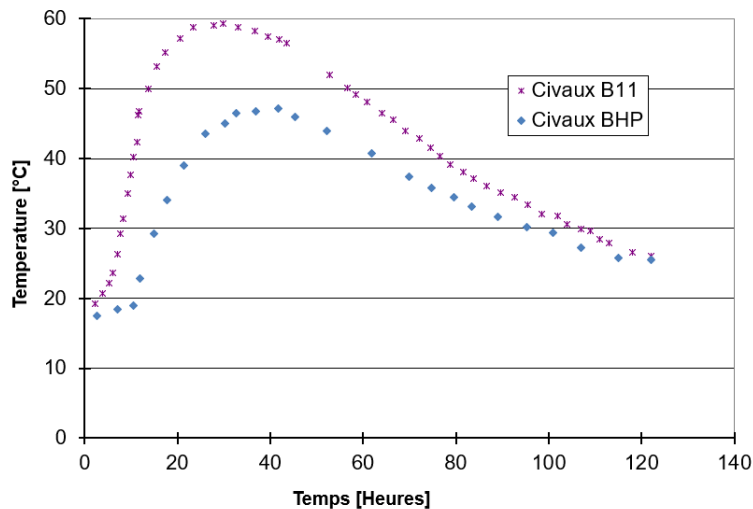


FIGURE 3. Evolution de la température de la sonde 3 située au milieu des murs

TABLEAU 2. Valeurs utilisées pour appliquer l'équation 3 – Il faut noter que les valeurs des modules d'Young à t_2 sont estimées à partir des valeurs finales des modules données dans la référence (Benboudjema et Torrenti, 2008) et que les résistances en traction sont celles de la même référence. Ces valeurs sont des estimations à partir de l'estimation de la maturité du béton à t_2 , ces mesures n'ayant pas été réalisées au jeune âge.

	B11	BHP		B11	BHP
t_2 (h)	120	120	$R_{ax,1}$	0,5	0,5

$E_c(t_2)$ (MPa)	30000	34000	$1 + \chi\phi_{st}$	1,55	1,55
T_{max} (°C)	59	46	T_0 (°C)	15	15
k_{temp}	0,9	0,9	σ_1 (MPa)	4,17E+00	3,22E+00
α_T (/°C)	1,00E-05	1,00E-05	$f_{ct,eff}(t_{crit})$ (MPa)	2,5	3,2
$\varepsilon_{cbs}(t_{crit}) - \varepsilon_{cbs}(t_2)$	3,50E-05	1,50E-05	Cracking risk R_{ax}	2,1	1,3

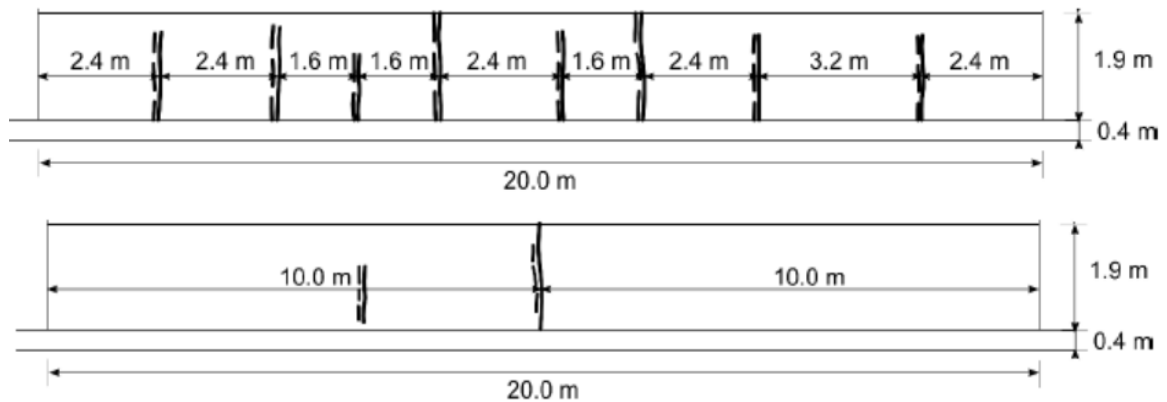


FIGURE 4. Relevé de fissuration des murs de Civaux (en haut le mur B11 et en bas le mur BHP)

IV. CONCLUSIONS

L'application de l'annexe D du futur EC2 permet d'estimer le risque de fissuration d'une structure en béton lorsque le retrait est gêné. Son application au cas du retrait gêné au jeune âge des murs de Civaux montre que les résultats sont en bon accord avec les constatations expérimentales. Ce résultat doit être confirmé sur d'autres structures comme celles testées lors du PN CEOS (Buffo-Lacarrière et al., 2016).

REFERENCES

- Benboudjema, F., & Torrenti, J. M. (2008). Early-age behaviour of concrete nuclear containments. *Nuclear engineering and design*, 238(10), 2495-2506.
- Buffo-Lacarrière, L., Baron, S., Barré, F., Chauvel, D., Darquennes, A., Dubois, J. P., ... & Torrenti, J. M. (2016). Restrained shrinkage of massive reinforced concrete structures: results of the project CEOS. *fr. European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(7), 785-808.
- Ithurralde, G. J. B., & Costaz, J. L. (1993). HPC for the Improvement of Tightness of Nuclear Reactor Containments in Case of Severe Accidents. *ACI Special Publication*, 140, 227-238.
- Torrenti, J. M. (2018). Basic creep of concrete-coupling between high stresses and elevated temperatures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(12), 1419-1428.