



CEOS.fr

Recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration

A-Introduction

B-Effet d'échelle probabiliste

Jean-François Coste

18/11/2015



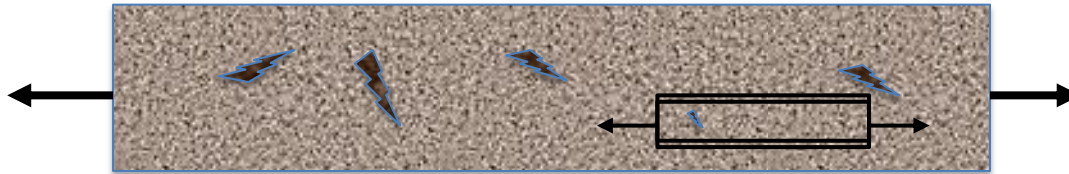
Ministère
de l'Écologie,
du Développement
durable
et de l'Énergie



- ▶ Les recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration ont pour objet de compléter les règles de l'EC-2 et du code modèle *fib* MC2010 pour les ouvrages spéciaux.
- ▶ Elles s'appuient sur :
 - les résultats des essais et simulations de CEOS.fr
 - les retours d'expérience sur ouvrages ou maquettes
 - les résultats d'autres essais effectués en laboratoire
- ▶ Elles sont exposées selon 10 chapitres à la suite de l'Introduction:
 - chaque chapitre est complété par des exemples d'application
 - Une table rappelle les principales notations spécifiques à chaque chapitre
 - la bibliographie liste les références citées dans chacun des chapitres
- ▶ La version en anglais en cours de traduction aura un chapitre complémentaire présentant le PN CEOS.fr

- ▶ Avant propos (P. LABBÉ)
- ▶ Principales notations
- 1- Introduction (D. CHAUVEL – J-F. COSTE)
- 2- Effets d'hydratation du béton au jeune âge et effet d'échelle (C. ROSPARS – J-F. COSTE – A.SELLIER)
- 3- Fissuration des tirants (S. ERLICHER – PH. BISCH)
- 4- Fissurations des poutres sous chargement mécanique en flexion (J. CORTADE)
- 5- Fissurations des voiles (PH. BISCH)
- 6- Ferrailage minimum des pièces épaisses (F. BARRÉ)
- 7- Lois de retrait, fluage et autres propriétés du béton (F. BARRÉ)
- 8- Fissuration des poutres et voiles sous déformations imposées (F. BARRÉ – J-M. TORRENTI)
- 9- Effets de la combinaison des différents phénomènes (J-M. TORRENTI - F. TOUTLEMONDE)
- 10- Modélisation numérique, approche méthodologique (A. SELLIER)
- 11- Recommandations sur l'utilisation des mesures sur démonstrateur et sur ouvrage (C. ROSPARS - J-PH. DUBOIS)

- ▶ On observe que la résistance à la traction pour la première fissuration dans le cas de pièces de grandes dimensions mises en traction, est plus faible que la valeur de la contrainte limite de traction moyenne mesurée sur éprouvette de traction directe.
- ▶ Cette réduction est la conséquence d'un phénomène connu sous le nom **d'effet d'échelle probabiliste**.

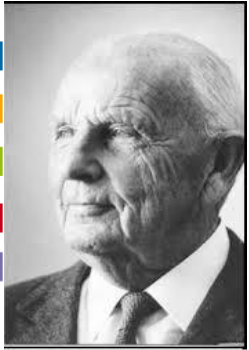


- ▶ En effet, cet effet d'échelle résulte de la plus grande **probabilité** de rencontrer une faible résistance dans un grand volume de béton tendu par rapport à une ou même quelques éprouvettes de petites dimensions qui ne sont pas assez représentatives de toutes les occurrences des points de plus faible résistance.

- ▶ L'effet d'échelle a été étudié expérimentalement par Rossi et al (1994) sur des micro-bétons, Bazant (2000),... puis précisé dans la méthode numérique WL2 (Sellier 2013) et appliqué pour l'interprétation des essais sur les tirants de Mivelaz (1996) dans le cadre du PN CEOS.fr en liaison avec le projet MEFISTO de l'ANR.

- ▶ Les résultats expérimentaux mettent 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 avec l'augmentation du volume pour un même nombre d'échantillons,
 - L'augmentation de l'effet d'échelle lorsque la contrainte de compression du béton f_{cm} décroît,
 - Peu ou pas d'influence sur le module du béton.

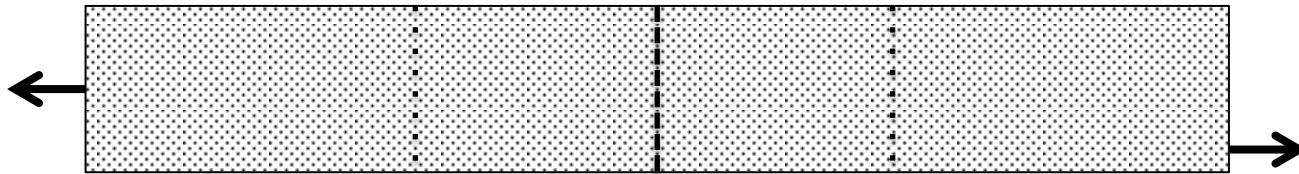
B - EFFET D'ÉCHELLE PROBABILISTE : MODÉLISATION (1)



Walodi Weibull 1887-1979
Photo by Sam C. Saunders

▶ L'effet d'échelle probabiliste est a été modélisé pour les matériaux fragiles par Weibull (1951) à partir de la **théorie du maillon faible** qui suppose que l'endommagement local suffit à provoquer la première fissuration.

Dans le cas du béton armé, le modèle ne s'applique que pour les blocs homogènes entre fissures.



▶ Ce modèle a du être adapté dans le cadre de CEOS.fr pour tenir compte :

- Du caractère tridimensionnel des structures de génie civil et de leur grande taille par rapport au plus gros granulats qui ne permet pas de les assimiler à une série de maillons
- De la résistance à la traction qui ne devient pas nulle lorsque la taille de l'élément augmente indéfiniment, ce qui conduit à définir un volume maximum pour l'élément considéré

B - EFFET D'ÉCHELLE PROBABILISTE : MODÉLISATION (2)

CEOS.fr

Formules de ROSSI

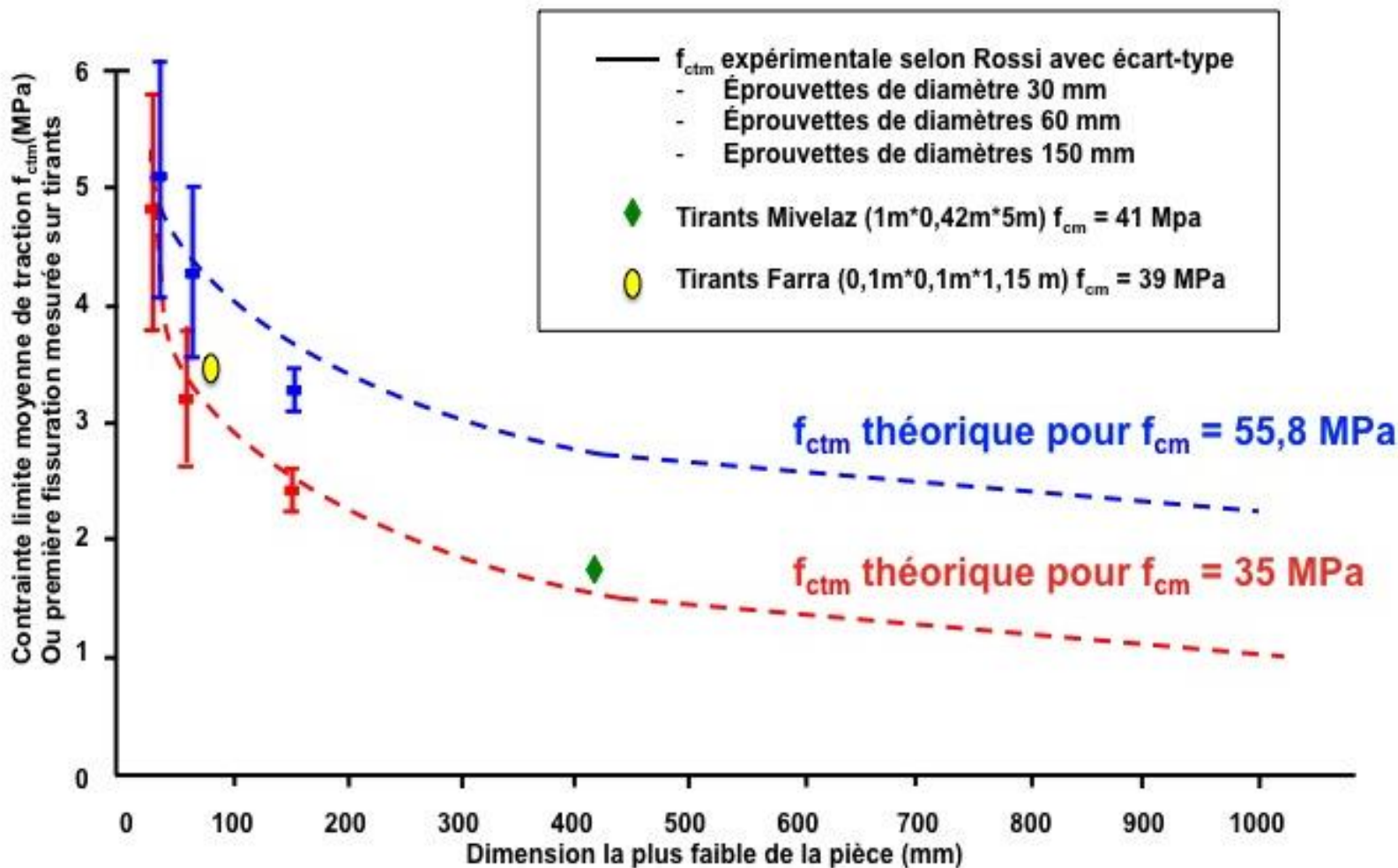
$$f_{ctm} = a(V_s/V_a)^{-b}$$

$$a = 6,5$$

$$b = 0,25 - 3,6 \times 10^{-3} f_{cm} + 1,3 \times 10^{-5} f_{cm}^2$$

V_s est le volume total du tirant

V_a est le volume du plus gros granulat du béton



- ▶ Le modèle adapté à partir des expériences de Rossi et des simulations de CEOS.fr (Alain Sellier – Laurie Buffo-Lacarrière) permet de calculer le rapport entre les **résistances moyennes à la traction** de la pièce de volume V_{eq} et de l'éprouvette de volume V_{ref} :

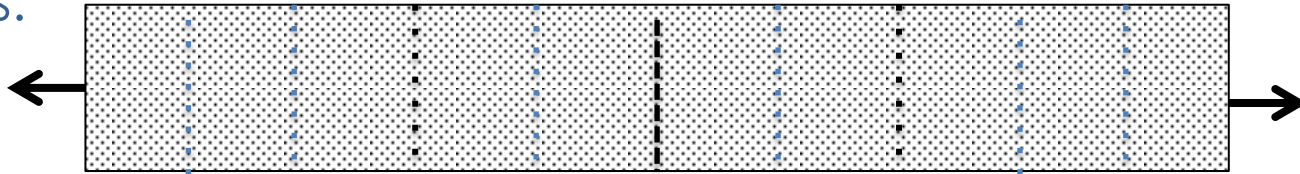
$$\frac{f_{ctm}^{V_{eq}}}{f_{ctm}^{V_{ref}}} = \hat{e} \frac{V_{ref}^{\hat{e}} \hat{u}^{1/k}}{V_{eq}^{\hat{e}} \hat{u}}$$

- ▶ où k est l'exposant de Weibull :

$$k = \left\{ 0,25 - 3,6 \cdot 10^{-3} f_{cm} + 1,3 \cdot 10^{-5} f_{cm}^2 \right\}^{-1}$$

- ▶ V_{eq} , volume équivalent de béton sollicité en traction et **limité à 2 m³**
- ▶ k est constant quel que soit le volume considéré pour un béton de résistance à la compression donné
- ▶ k diminue lorsque f_{cm} croît : l'effet d'échelle diminue lorsque la résistance à la compression augmente

- ▶ L'effet d'échelle probabiliste est particulièrement manifeste lors de l'apparition de la **première fissure** lorsque le volume de béton tendu est grand. Ensuite, il décroît au fur et à mesure que les fissures se rapprochent. Il se cumule avec d'autres effets.



- ▶ Pour les éléments massifs en BA, la probabilité d'observer une première fissure pour une valeur $f_{ct,inf}$ inférieure à $f_{ctk,005}$ est plus élevée que dans une pièce de dimension standard.
- ▶ Pour évaluer $f_{ct,inf}$, à partir de la valeur moyenne f_{ctm} , il est nécessaire de connaître la dispersion autour de cette valeur.
- ▶ Partant de la constatation expérimentale que l'écart type diminue en même temps que f_{ctm} , on peut admettre que :
Coefficient de variation = écart-type/ f_{ctm} \approx constante

Pour une poutre RL en flexion, pour une première fissure

$l = 6,00 \text{ m}$

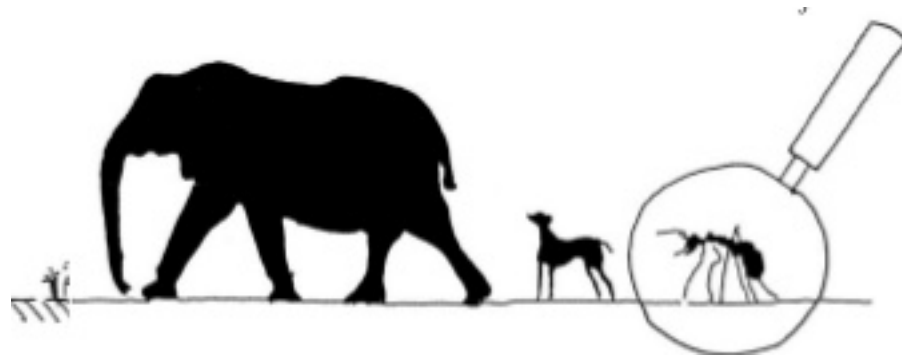
$b = 1,60 \text{ m}$

$h = 0,80 \text{ m}$

Contrainte MPa	$h_{\text{eff}} = 30 \text{ cm}$				
f_{ck}	30	40	50	60	80
f_{cm}	38	48	58	68	88
f_{ctm}	2,9	3,5	4,1	4,4	4,8
k	7,6	9,3	11,8	15,3	29,5
$f_{\text{ctm, scale}}$	1,5	2	2,7	3,3	4,2
$f_{\text{ctm, scale}}/f_{\text{ctm}}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$f_{\text{ct}0,05, \text{scale}}$	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9

- ▶ L'effet d'échelle probabiliste intervient pour expliquer, particulièrement au jeune âge, la fissuration sous les effets THM des pièces épaisses soumises au retrait et fluage.
- ▶ En pratique on déterminera $f_{ctm, scale}$ pour calculer :
 - **le ferrailage minimum** dans le cas de pièces épaisses dont la fissuration n'atteint pas la fissuration stabilisée : voir le chapitre 6 §6-1 *Ferrailage des tirants en béton armé*
 - **L'ouverture des fissures** pour les pièces épaisses n'ayant pas atteint la fissuration stabilisée : voir les chapitres 8 -§ 8.3.1 *Calcul approché du bridage* et 9- §9.1 *Estimation de l'ouverture des fissures*
 - **L'ouverture des fissures** pour les pièces épaisses ayant atteint la fissuration stabilisée mais dont l'espacement entre fissures restent restent significativement plus grands que la dimension moyenne de l'éprouvette
- ▶ On calculera $f_{ct0,05, scale}$ pour déterminer l'apparition de la première fissure : voir le chapitre 3 *Fissuration des tirants §3.6 Exemple* et le chapitre 4 *fissuration des poutres sous chargement mécanique § 4.2.3 Calcul par interpolation entre l'état non fissuré et l'état stabilisé.*

► EFFET D'ÉCHELLE NON PROBABILISTE



MERCI DE VOTRE ATTENTION