



Débat AFGC

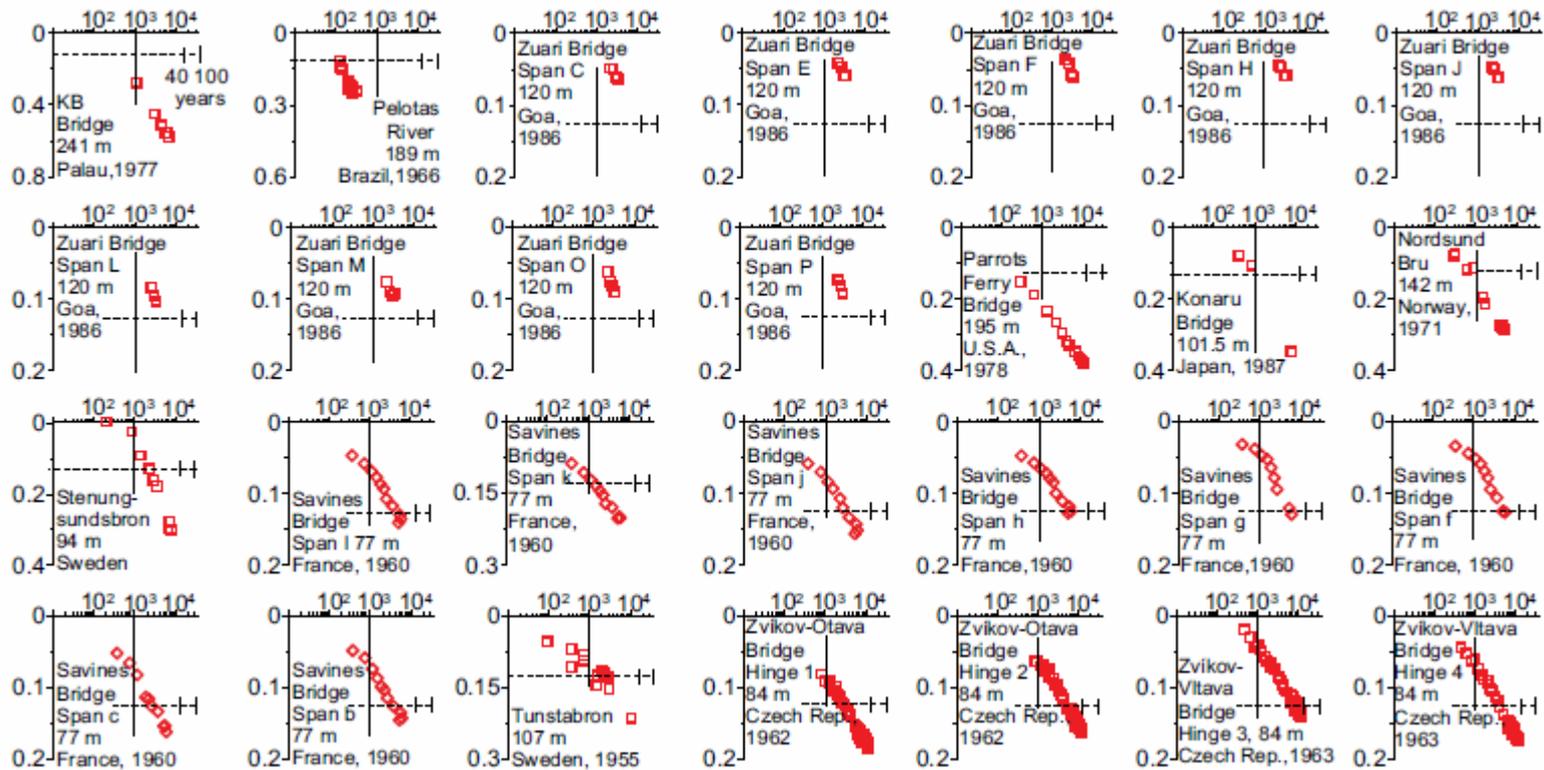
Fluage du béton : de l'échelle nanoscopique à l'ouvrage
Paris, 5 novembre 2015

Analyse de la déformation d'ouvrages et approche analytique

JP Sellin, JF Barthélémy, JM Torrenti

Constat de structures au fluage excessif

Les flèches varient à long terme en $\log(t)$



[Bazant et al., Excessive Creep Deflections: An Awakening, Concrete International, August 2011]

Questions

- Peut-on modéliser avec fiabilité les déformations à long terme de structures en béton précontraint selon les lois de l'Eurocode 2?
- Si non, peut-on adapter ou modifier ces lois ?
- La flèche au cours du temps est-elle une donnée suffisante pour caler des lois de béton et d'acier ?

Effets des déformations différées

Origines :

- Fluage
 - Retrait
- } endogènes ou liés à des transferts hydriques avec l'extérieur
- Relaxation des aciers de précontrainte.

Conséquences :

- Défauts : flèches, endommagement des équipements, fissures...
- Redistribution d'efforts dans la structure.



Le Pont de Savines

Construit à la fin des années 50 :

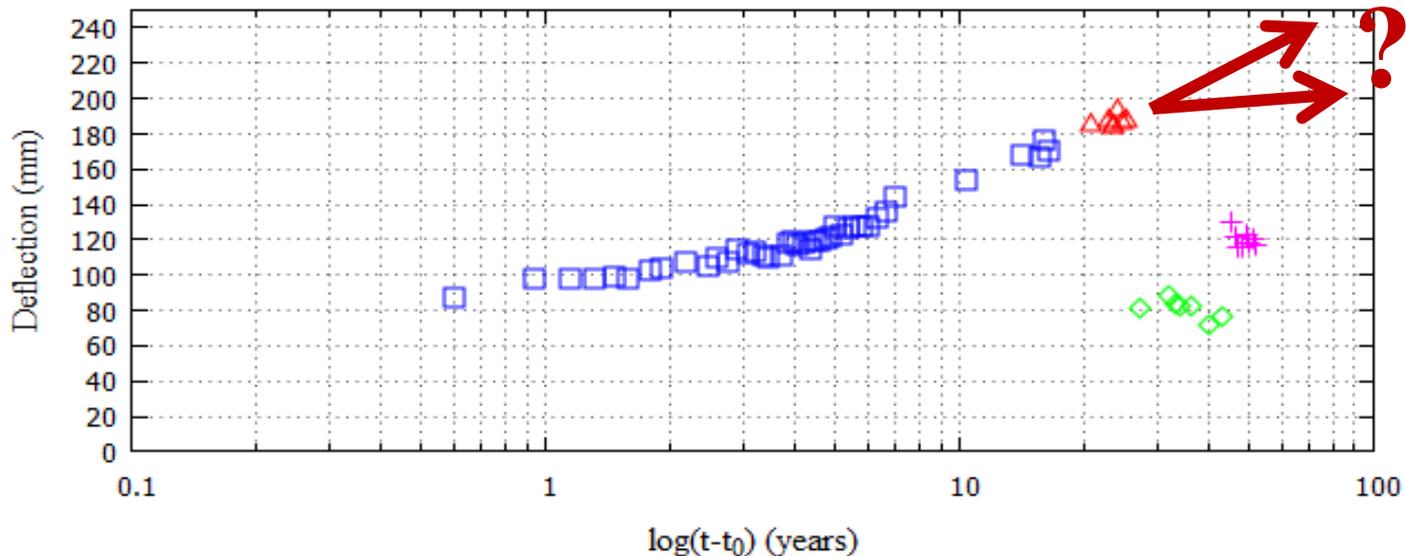
- Construit par encorbellements successifs
- Précontraint par post-tension
- 13 travées (chacune de 77 m de long)
- Structure isostatique : le clavage entre fléaux ne transmet ni effort normal ni moment de flexion
- Des flèches jusqu'à 150 mm sont observées



Campagnes de mesures de flèches

Les mesures nécessitent une correction

- La hauteur de référence à partir de laquelle les flèches sont mesurées a été perdue à plusieurs reprises
- En échelle log, les données les plus récentes sont plus resserrées et donc fournissent moins d'information => l'extrapolation risque d'être peu fiable, 2 tendances sont proposées (une croissante et une stagnante)



A

1st campaign of measurements 1960-1976
2nd campaign of measurements 1981-1985



3rd campaign of measurements 1987-2003
4th campaign of measurements 2005-2012

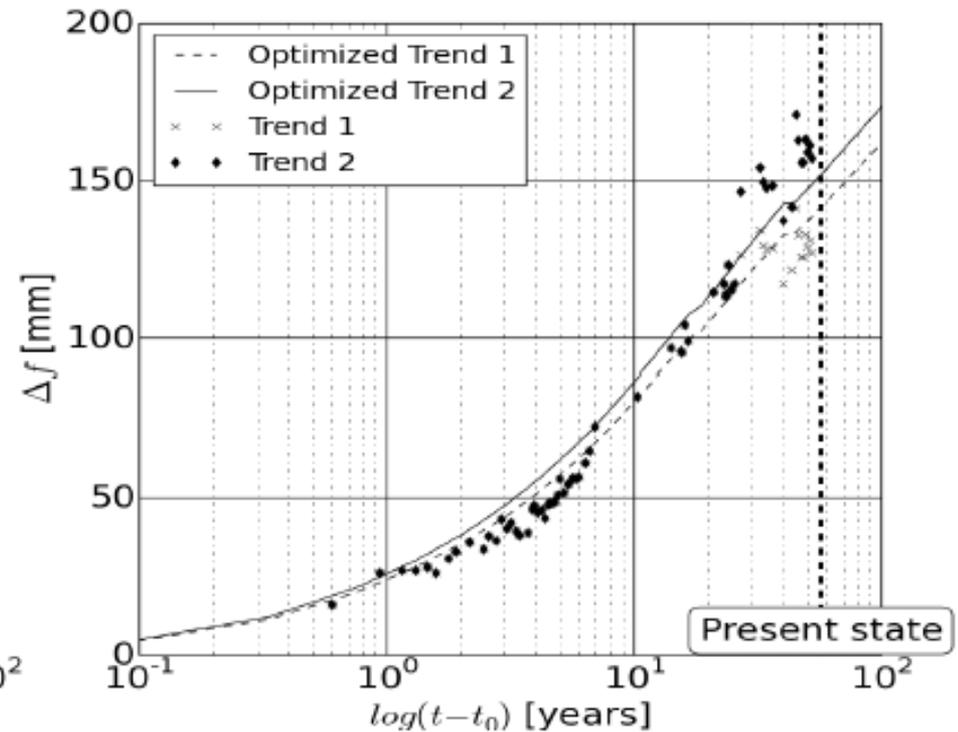
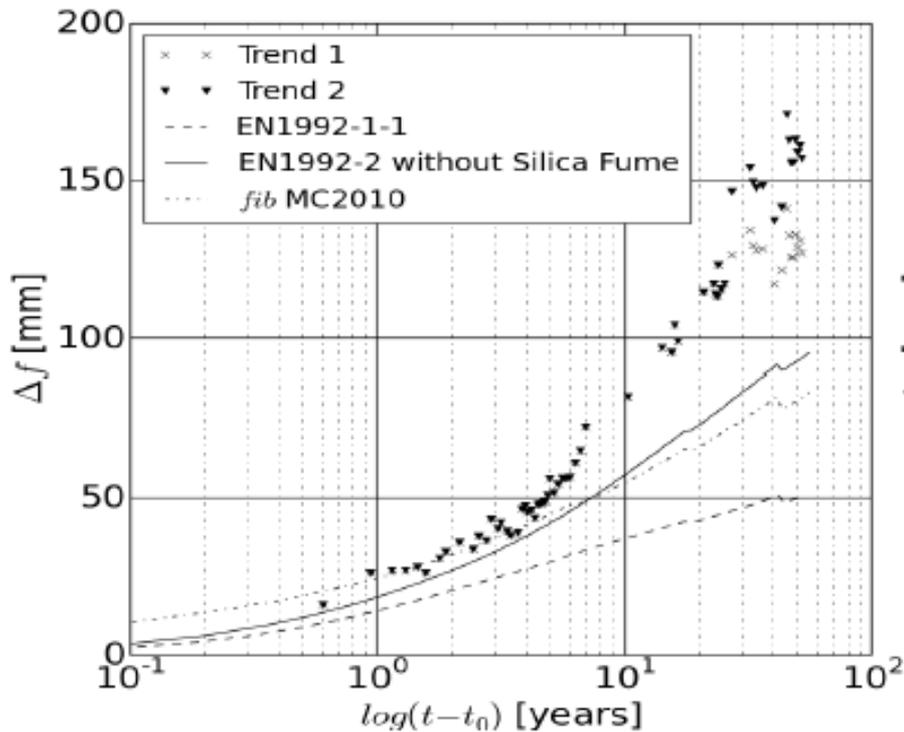
ST1 models of the deflection history

EN1992-2 corrigé

$$\varepsilon_{\text{delayed}} = k_{as} \varepsilon_{as} + k_{ds} \varepsilon_{ds} + k_{bc} \varepsilon_{bc} + k_{dc} \varepsilon_{dc}$$

$$J_{bc}(t, t_0) = \frac{\varphi(t_0, f_{cm}(t_0))}{E_c} \frac{\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{t-t_0} + k_c \beta(f_{cm}(t_0))}$$

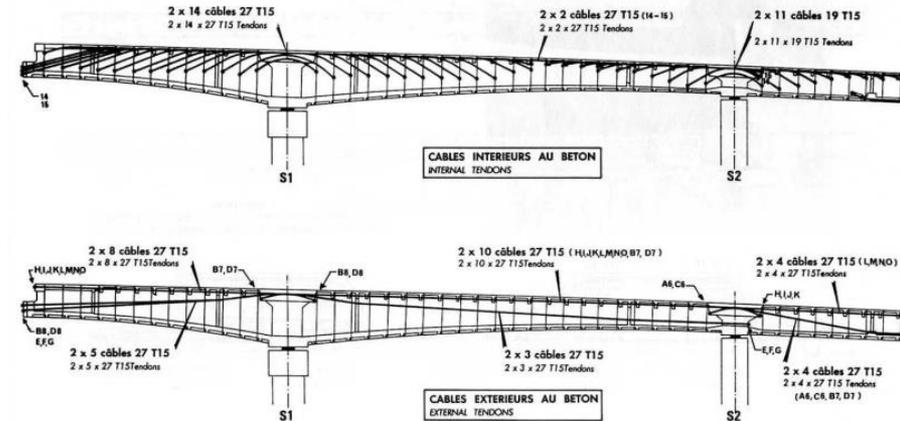
Lois de fluage des normes



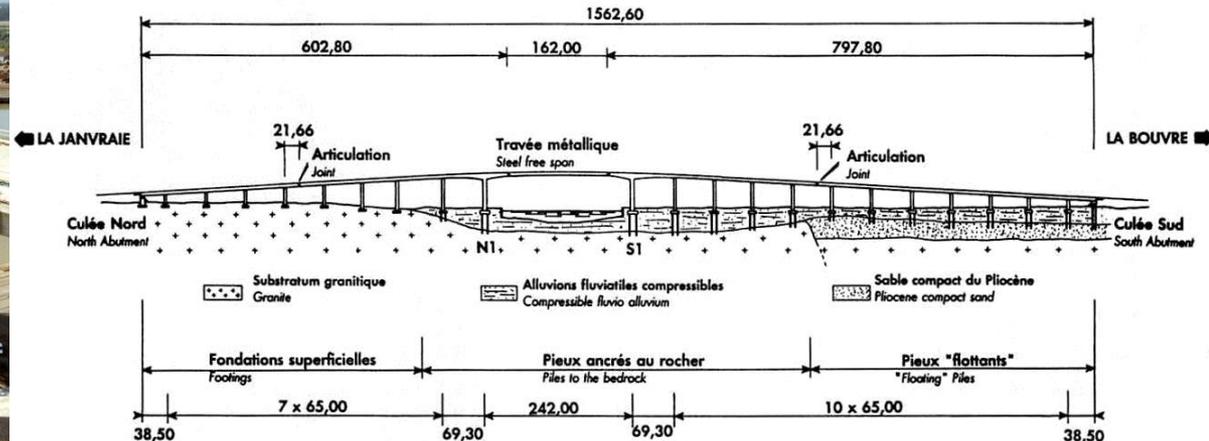
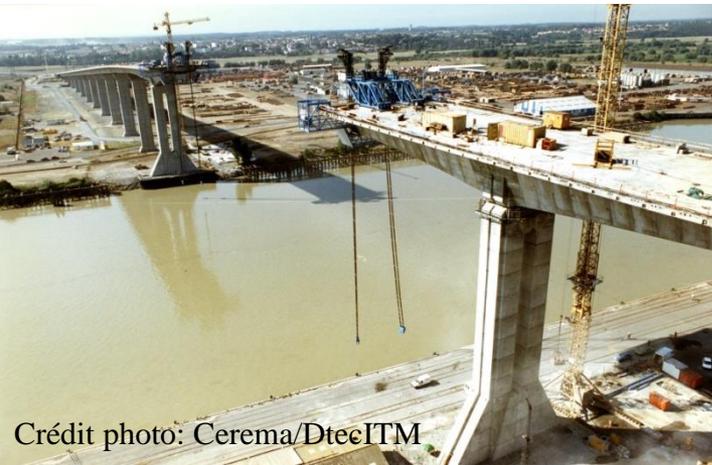
Le Pont de Cheviré

Construit en 1990 :

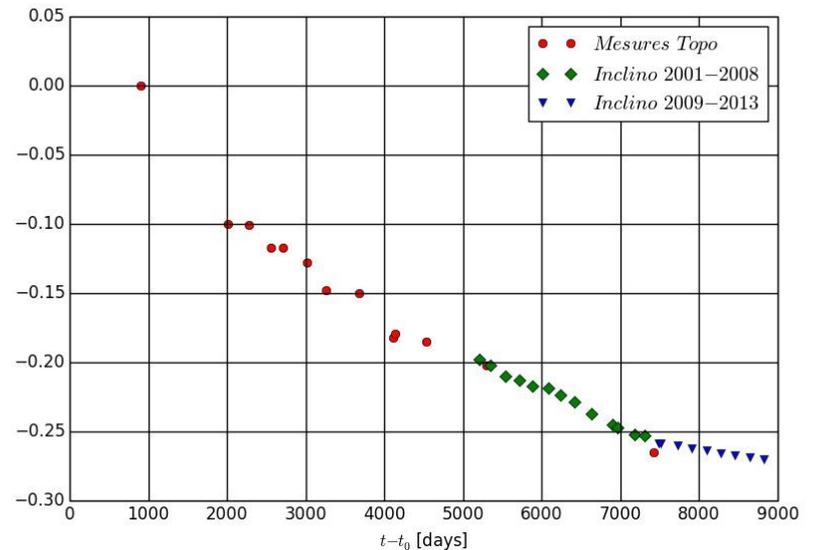
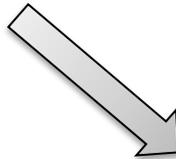
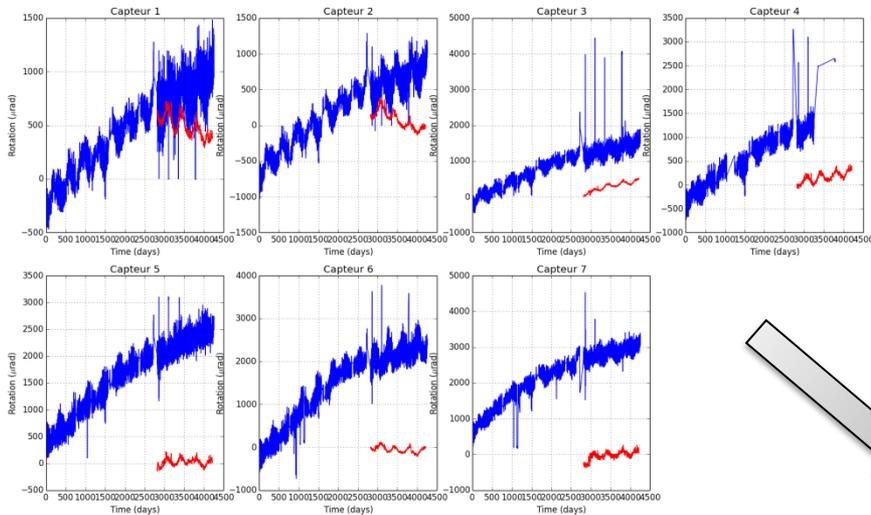
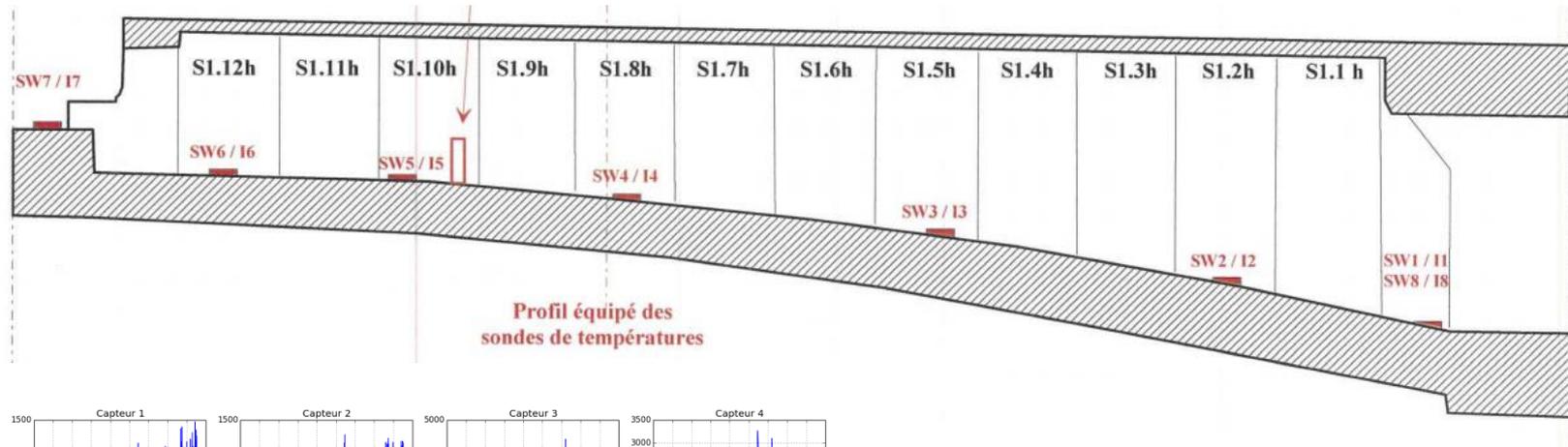
- 1600 m de long
- Deux viaducs d'accès en BP
- 21 travées BP + 1 métal (≈ 240 m)
- Travée métallique (≈ 162 m long) supportée par deux cantilevers en BP (≈ 40 m de long)
- Flèche actuelle de 25 - 30 cm à l'extrémité du cantilever Sud



La technique française du béton précontraint , AFGC, fib symposium 1990



Instrumentation

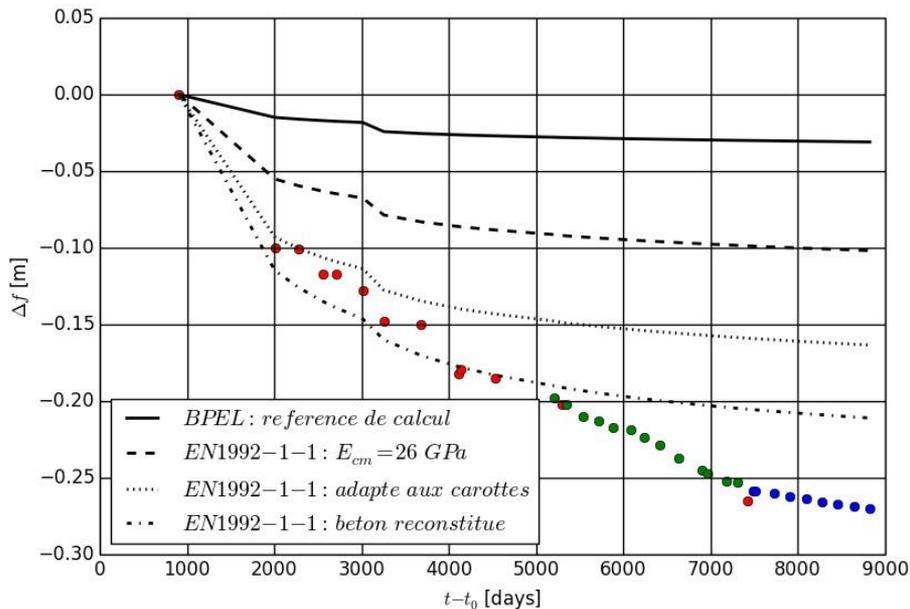


Modèles PCP de l'histoire de la flèche

Comparaison entre les flèches mesurées et les calculs :

- BPEL (norme utilisée à la conception)
- EN1992-1-1 avec
 - Module d'Young théorique $E_{cm} = 36$ GPa
 - Un module d'Young réajusté $E_{cm} = 26$ GPa
 - Coefficients de fluage et de retrait recalculés à partir des expériences LCPC de 2005

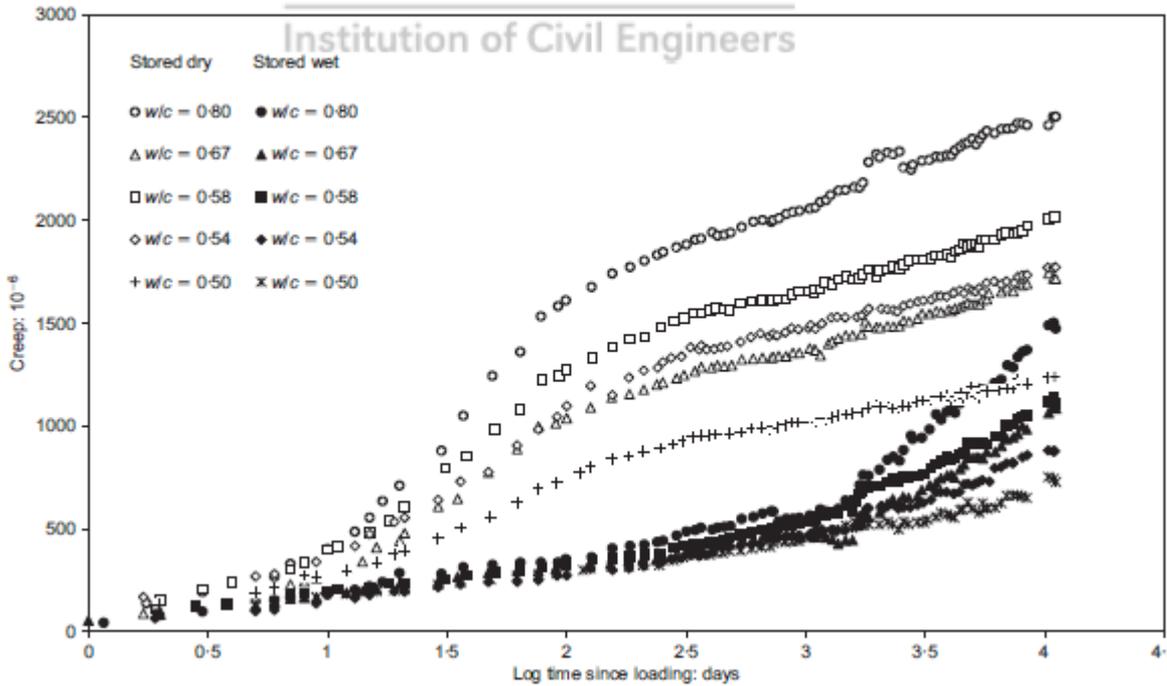
(1) Sur échantillons in-situ; (2) Sur échantillons reconstitués.



Tous les modèles sous-estiment la flèche et la cinétique de déformation

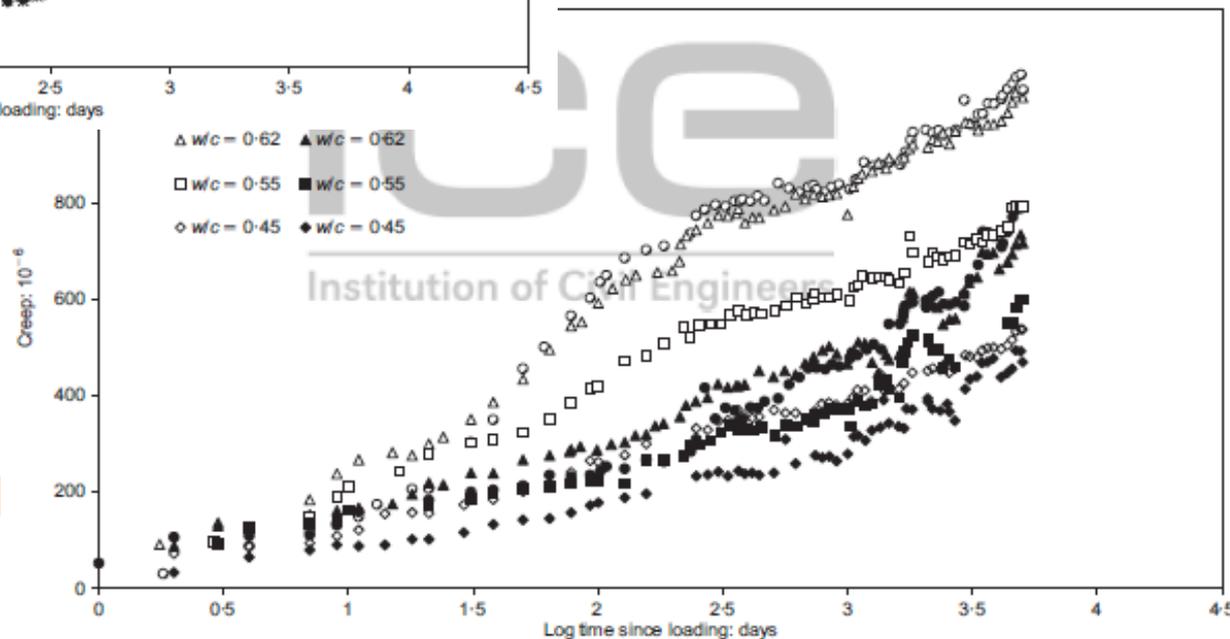


Fluage à long terme sur échantillons labo (dm)



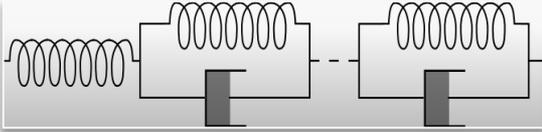
[Brooks, 30-year creep and shrinkage of concrete, 2005]

Complaisances à long terme en $\log(t)$



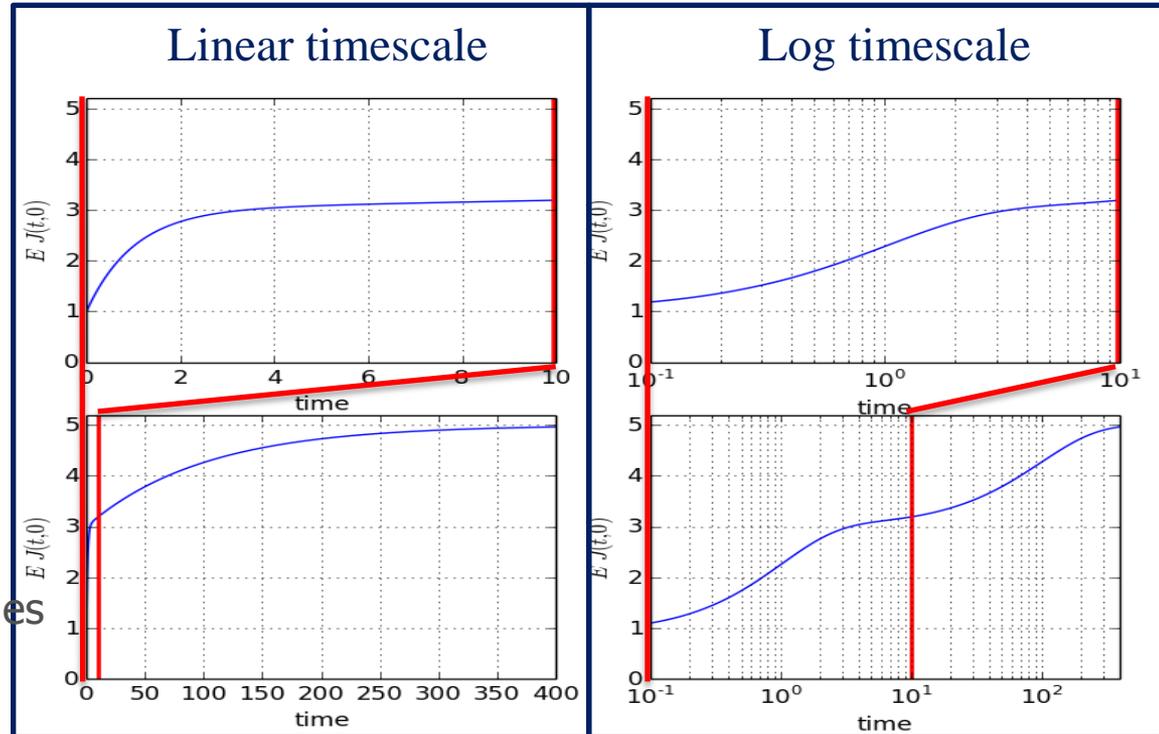
Que signifie « long terme » ?

Generalized Kelvin-Voigt



$$J(t, t_0) = \frac{1}{E} \left(1 + \sum_{i=1}^n \beta_i (1 - e^{-(t-t_0)/\tau_i}) \right)$$

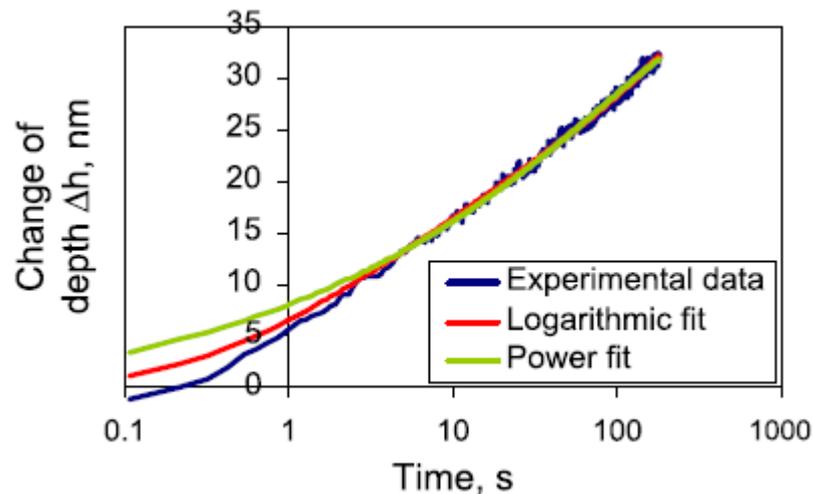
Exemple avec 2 temps caractéristiques
 $n=2$; $\beta_1=\beta_2=2$; $\tau_1=1$; $\tau_2=100$



- Des mécanismes physico-chimiques peuvent apparaître à des temps très différents
- Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer le fluage propre :
 - Solidification à court terme (en lien avec l'hydratation) [Carol and Bazant 1993]
 - Microfracturation [Rossi et al. 2012]
 - Glissements entre feuillets d'hydrates en lien avec des variations de microprécontrainte [Bazant et al. 1997]

Fluage à l'échelle des hydrates

Identification du fluage des hydrates par nanoindentation



[Vandamme Ulm,
Nanoindentation investigation of
creep properties of CSH, 2013]

Module de fluage variant en
 $\log(t)$

*Cohérent avec les
expériences décimétriques
(par homogénéisation)*

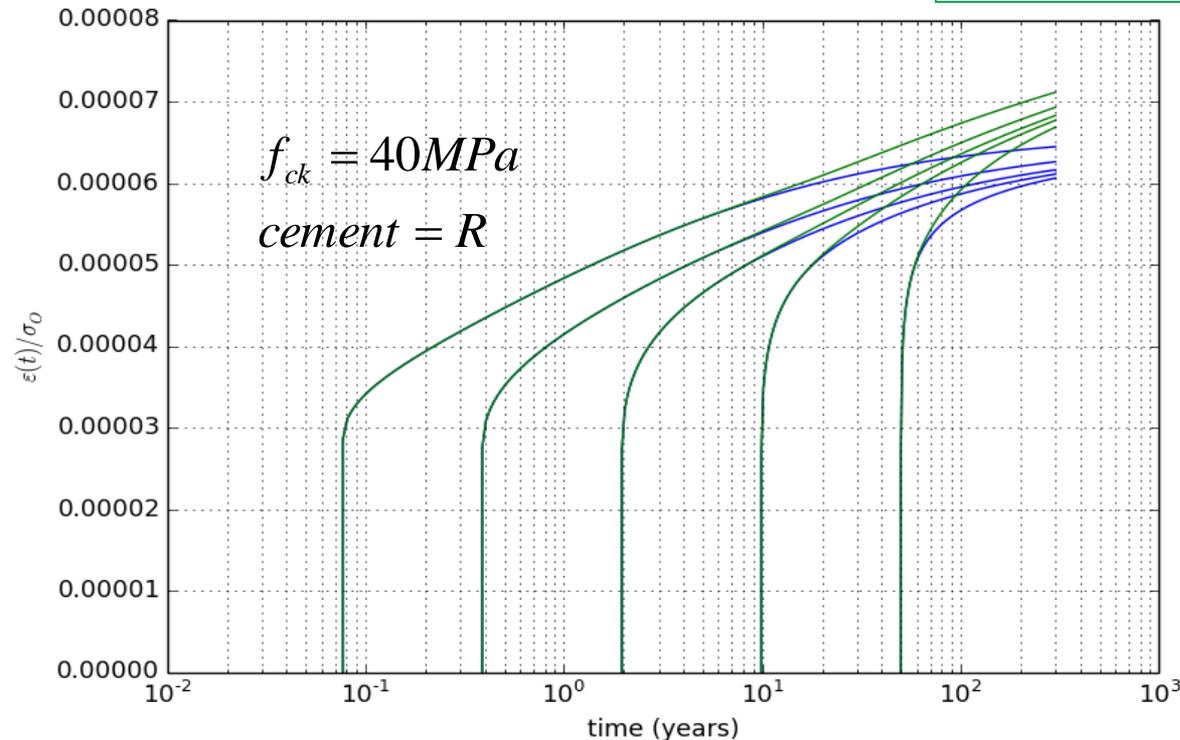
Loi de fluage propre dans l'Eurocode 2-2

Fluage propre EC2-2 (en bleu)

$$J_{bc}(t, t_0) = \frac{\varphi(t_0, f_{cm}(t_0))}{E_c} \frac{\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{t-t_0} + \beta(f_{cm}(t_0))}$$

Addition d'un terme log (en vert)

$$J_{addlog}(t, t_0) = \frac{\alpha}{E_c} \log \left(1 + \beta \left(\frac{t-t_0}{t_c} - 1 \right)^2 \right) \text{ for } t \geq t_0 + t_c$$



(Fluage propre MC 2010 en log)

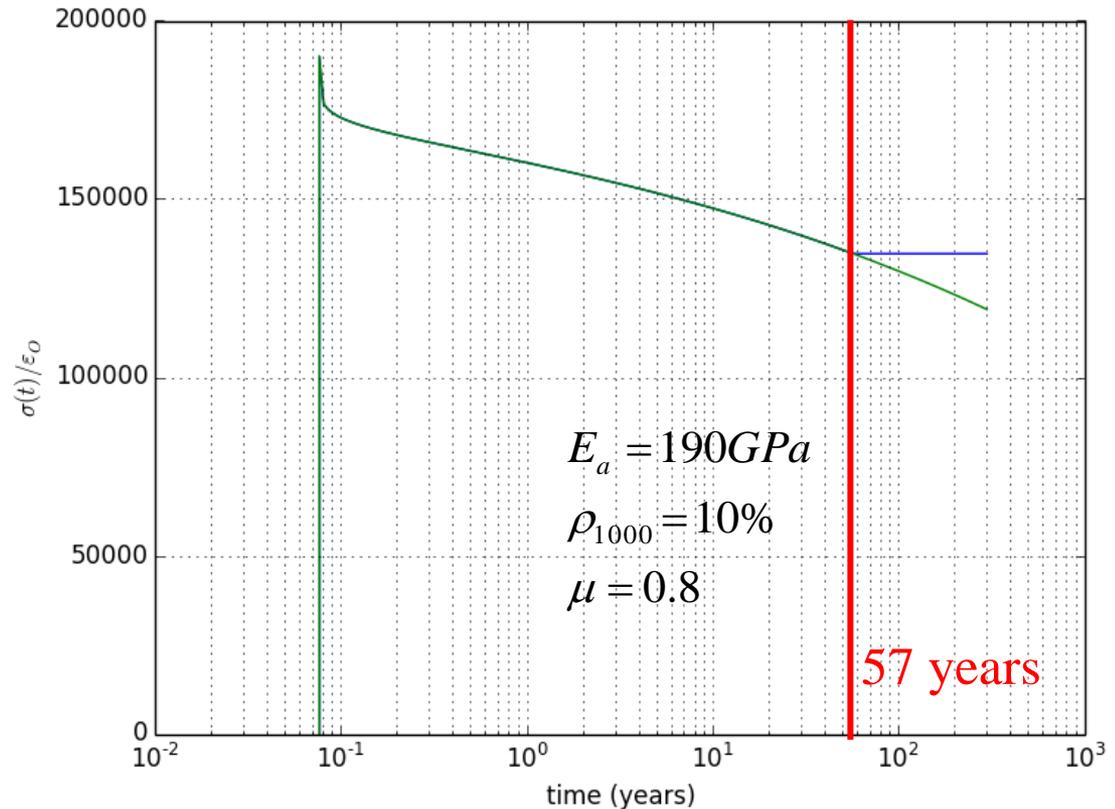
$$J_{fp}(t, t_0) = \frac{\beta_{bc}(f_{cm})}{E_c} \ln \left(1 + \left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 (t-t_0) \right)$$

Relaxation de l'acier dans l'Eurocode 2

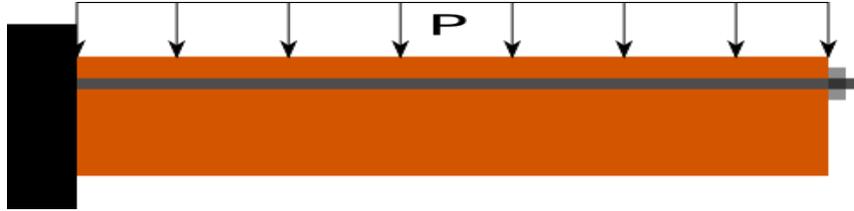
Classe 1 (rel. normale), perte de précontrainte = $\frac{\Delta\sigma_p}{\sigma_{pi}} = 5.39 \rho_{1000} e^{6.7 \sigma_{pi}/f_{pk}} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0.75 \left(1 - \sigma_{pi}/f_{pk}\right)} 10^{-5}$

EC2 indique d'utiliser la valeur à 57 ans comme valeur finale de perte :

- Valeur utile dans un calcul approché basé sur un module retardé
- La loi puissance doit-elle se prolonger par une fonction constante après 57 ans ?
- Quel est l'impact du choix de la fonction après 57 ans sur l'évolution de la flèche ?



Un calcul analytique simplifié instructif : flexion d'une poutre console précontrainte



- Basé sur les caractéristiques de Savines simplifiées
 - Précontrainte extérieure rectiligne
 - Section uniforme
- Objectifs du modèle simplifié :
 - Illustrer les conséquences des choix de comportements à long terme
 - Evaluer si la seule donnée de la flèche suffit à estimer les comportements du béton et de l'acier

- Chargement
 - Poids propre
 - Précontrainte
- Béton
 - Visco. lin. vieillissant
 - Fluage propre + *log*
- Acier de précontrainte
 - Viscoélastique linéaire
 - Relaxation const. ou puissance après 57 ans

Résolution du problème RDM viscoélastique

1. Statique => N et M dans le béton = f (Tension câbles)
2. Intégration des lois de comportement visco. vieillissantes :

- Déformations axiales béton et acier : $\varepsilon_{\alpha}(t) = \frac{J_{\alpha}(t, \cdot)}{S_{\alpha}} \circ N_{\alpha}(\cdot) \quad \alpha = c \text{ or } s$

- Courbure béton: $\chi_c(t) = \frac{J_c(t, \cdot)}{I_c} \circ M_c(\cdot)$

- Opérateur de Volterra : $y(t) = f(t, \cdot) \circ x(\cdot) = \int_{t'=-\infty}^t f(t, t') dx(t')$

3. Liaison cinématique acier/béton => détermination de la tension de précontrainte puis de la flèche

$$N_s = K^{\circ-1} \circ (H_{t_0} K_0 N_s^0 + J_c^{t_0} P h L^2 / (6 I_c)) ; D = (J_c^{t_0} P L^2 / 4 - J_c \circ N_s h) L^2 / (2 I_c)$$

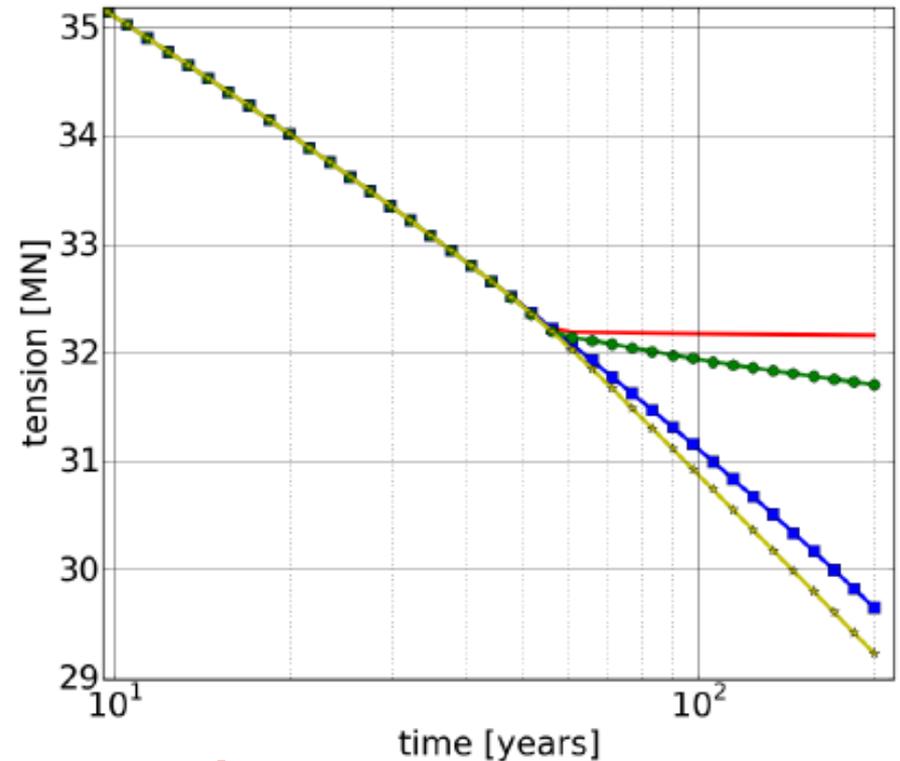
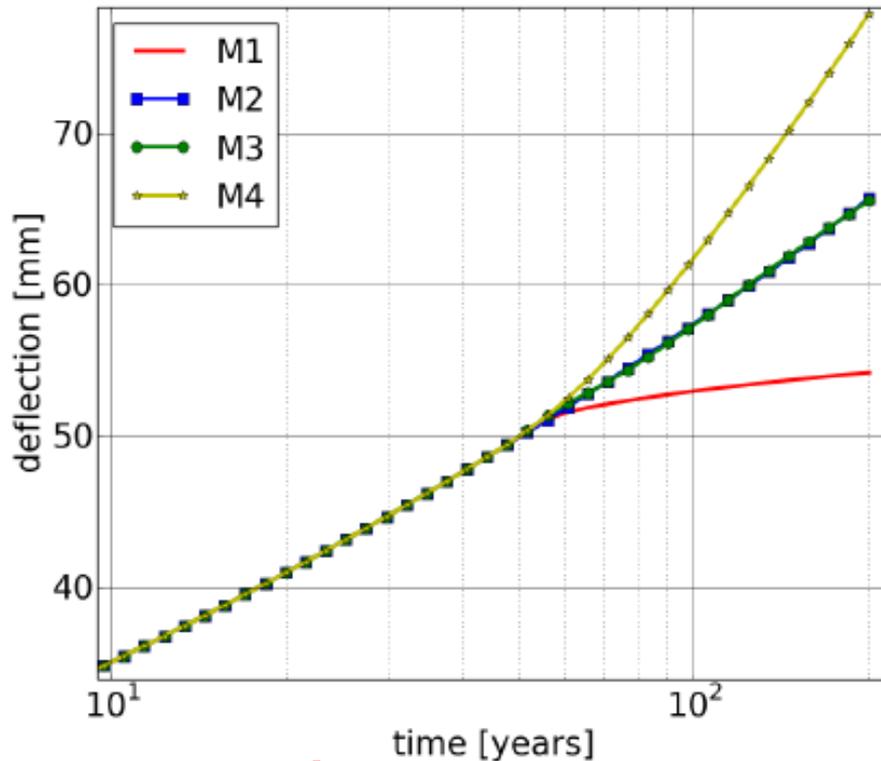
Implémentation numérique

$$N_s = K^{\circ-1} \circ (H_{t_0} K_0 N_s^0 + J_c^{t_0} P h L^2 / (6 I_c)) ; D = (J_c^{t_0} P L^2 / 4 - J_c \circ N_s h) L^2 / (2 I_c)$$

- Solution du problème viscoélastique vieillissant semblable à celle élastique sauf présence d'opérateurs de Volterra
- Méthode des trapèzes pour estimer les opérateurs intégraux ([Bazant, 1972]) => les opérateurs de Volterra deviennent de simples relations matricielles ([Sanahuja, 2013])

$$y(t) = f(t, \cdot) \circ x(\cdot) = \int_{t'=-\infty}^t f(t, t') d x(t') \Rightarrow \begin{bmatrix} y(t_1) \\ \vdots \\ y(t_N) \end{bmatrix} = [\mathbf{f}] \begin{bmatrix} x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_N) \end{bmatrix}$$

Résultats des modèles



- M1: béton=EC2, acier=constant après 57 ans
- M2: béton=EC2, acier=loi puissance
- M3: béton=EC2+log, acier=constant après 57 ans
- M4: béton=EC2+log, acier=loi puissance

Recherche de tendances dans un cas non vieillissant

- Hypothèses

- Béton : $J_c(t) = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{C_c} \ln(1 + t/\tau_c)$

- Acier : élastique ou simple modèle de Kelvin $R_s(t) = E_s^f + (E_s^i - E_s^f) e^{-t/\tau_s}$

- Peut-on retrouver une estimation de la réponse en flèche de la poutre sous forme d'une loi en log (comme celle du béton) ?

$$D_{eq}(t) = \frac{1}{E_{eq}} + \frac{1}{C_{eq}} \ln(1 + t/\tau_{eq})$$

- Identification des coefficients $E_{eq}, C_{eq}, \tau_{eq}$ après passage dans l'espace de Laplace-Carson $f^*(p) = \int_{t=0}^{+\infty} e^{-pt} f'(t) dt$ par l'exploitation des théorèmes des valeurs finale et initiale $\lim_{t \rightarrow 0, +\infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow +\infty, 0} f^*(p)$
- Intérêt de Laplace-Carson : "o" devient un simple produit

$$N_s = K^{\circ-1} \circ (H_{t_0} K_0 N_s^0 + J_c^{t_0} P h L^2 / (6 I_c)) ; D = (J_c^{t_0} P L^2 / 4 - J_c \circ N_s h) L^2 / (2 I_c)$$

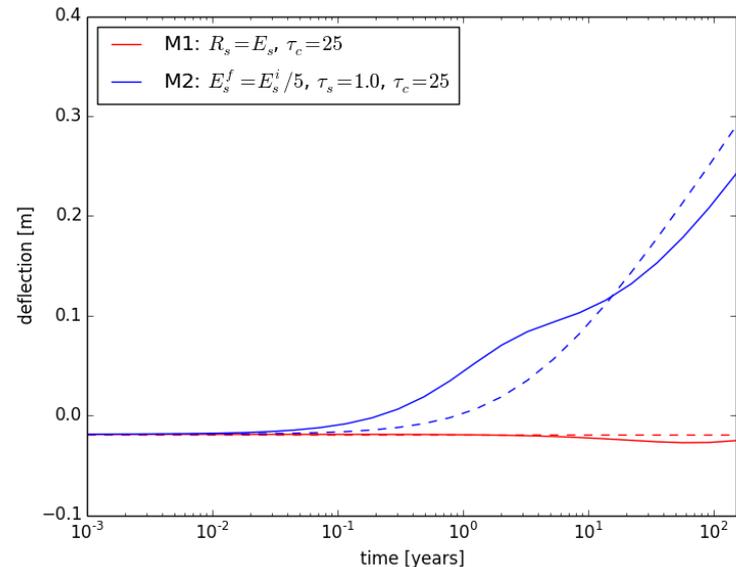
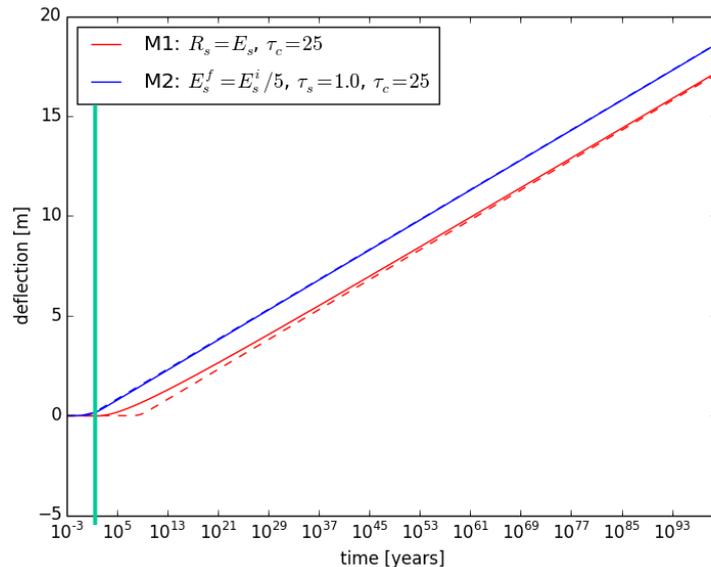
Résultats

$$J_c(t) = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{C_c} \ln(1 + t/\tau_c)$$

- M1: béton $\sim \log(t)$, acier=élastique $R_s(t) = E_s$

- M2: béton $\sim \log(t)$, acier=modèle de Kelvin

$$R_s(t) = E_s^f + (E_s^i - E_s^f) e^{-t/\tau_s}$$



L'identification des tendances à court et long termes ne donne pas de bons résultats pour l'échelle de temps qui nous intéresse. Les temps caractéristiques des matériaux et de la structure sont très différents.

Conclusions

- Les lois de l'Eurocode 2 de fluage du béton et de relaxation de l'acier ne sont pas adaptées à certaines structures
 - Une solution pourrait être de rajouter un terme en log au fluage du béton
 - Mais un traitement purement mathématique d'identification des lois à partir de données labo à court terme ne garantit pas la fiabilité à long terme
 - La solution est de connaître les mécanismes à la petite échelle **à long terme** et remonter au comportement macroscopique par homogénéisation : la recherche est active dans ce domaine
- Les structures étudiées illustrent l'importance du recueil de données de manière fiable dans le temps
 - Ce sont les seules données accessibles à cet âge (plusieurs décennies)
 - La mémoire de la hauteur de référence est cruciale pour les relevés topo
 - Il faudrait étendre le monitoring à la tension dans les câbles mais c'est un processus onéreux et destructif

Thank you for your attention

Jean-François Barthélémy

Centre for Expertise and Engineering on Risks, Urban and Country Planning,
Environment and Mobility

Technical Centre for Bridge Engineering
Division of Material Engineering

jf.barthelemy@cerema.fr

<http://www.cerema.fr/>