



# Couplages chemo-mécaniques appliqués à la durabilité des ouvrages de génie civil



Alain SELLIER

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Université de Toulouse,

INSA/UPS Génie Civil,

135 Avenue de Rangueil,

31077 Toulouse cedex 04 France



## Sommaire

- **Contexte**
  - Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
  - Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
    - Réaction alcali-granulat (RAG)
    - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - **Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée**
  - **Formulation différentielle du fluage de la matrice poreuse**
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - **Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée**
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - **Champ de phase pour un effet d'échelle probabiliste « tronqué par l'assurance qualité »**
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- **Perspectives**



- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives





## - Contexte industriel

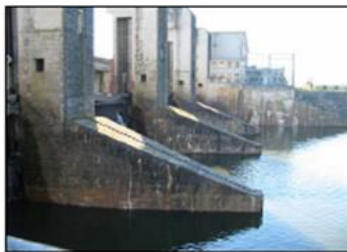
### - Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne

#### Les barrages

Barrage du Chambon



Barrage de Temple sur Lot



#### **Pathologie :**

Réaction alcali-granulat / DEF



#### **Conséquences :**

Blocage des évacuateurs de crues



Disfonctionnements hydro-électrique  
Sécurité civile

#### **Solutions:**



Déconstruction et  
remplacement de  
l'ouvrage



Maintenance et  
suivi de  
l'ouvrage



Conception des nouveaux ouvrages en anticipant les risques

Auscultation → **Prédiction de durée de vie**

Fissuration au jeune âge

Limitation des températures  
maximales en construction /DEF

Prédiction des endommagements  
par RAG et DEF, efficacité des techniques  
de réparation...



- Sommaire

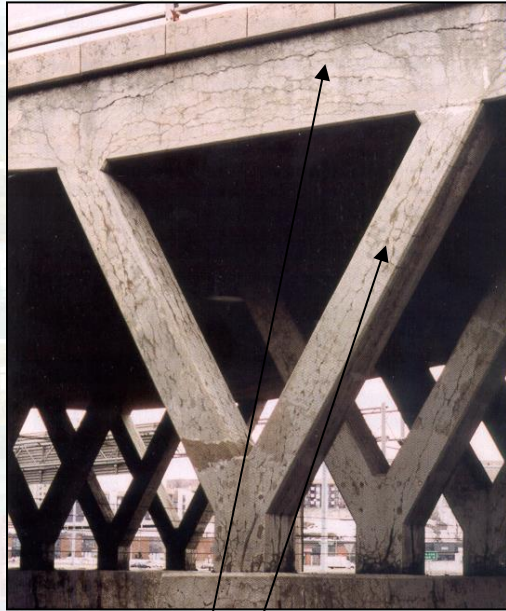
- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- **Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne**
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- **Perspectives**





**Bridge affected by AAR**



(canmet)

Anisotropic cracking parallel to the main reinforcements which can be broken by constrained swelling effects

**Concrete dams (Chambon)**

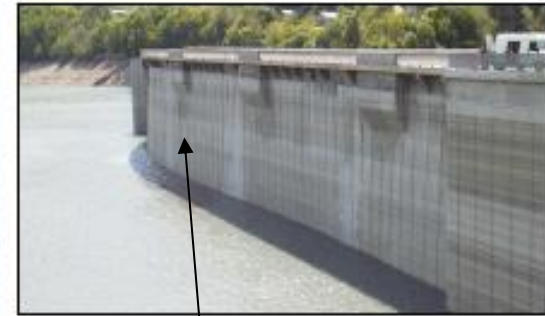


(EDF)

High pressure of concrete on the soil of abut : **risk of soil's failure**



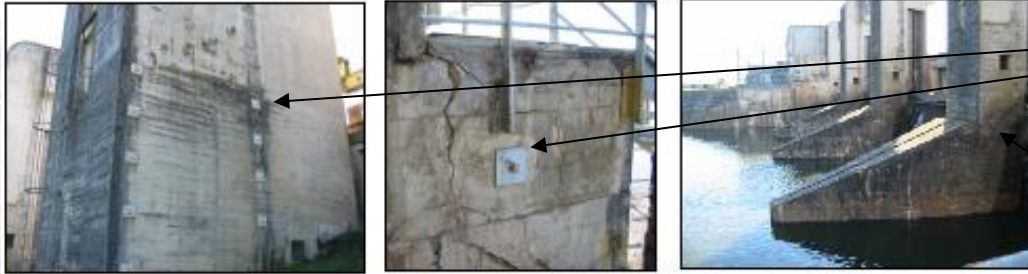
Remedial solution : **Slot cutting to remove constrained swelling effects**



**Watertight membrane to limit water pressure effect in concrete**



## Effets structuraux de la réactions alcalis-granulats (RAG)

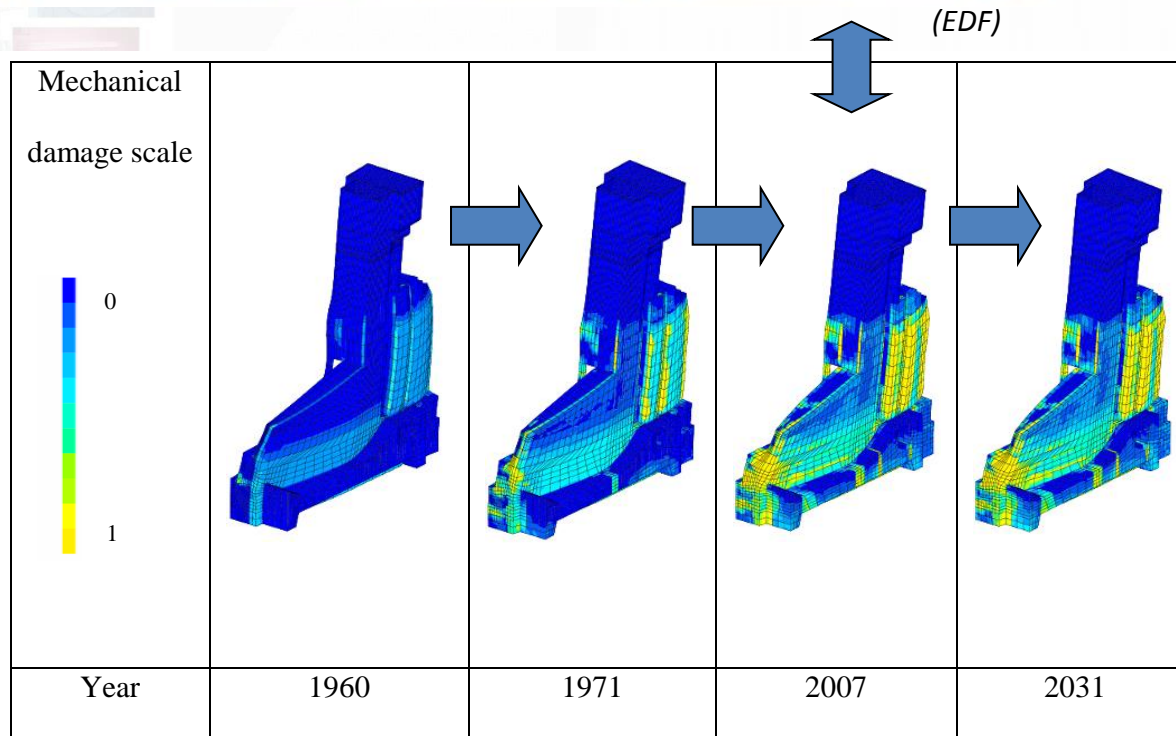


Fissurations diffuses et localisées dans les piles & **remédiation au risque de dislocation par tirants métalliques précontraints**

Déplacements des piles et du guidage des portes vannes, remédiation par rabotages périodiques des guides de portes



**Nécessité de prédire l'état du barrage et les vitesses d'évolution des phénomènes pour la maintenance et la démonstration de stabilité mécanique**



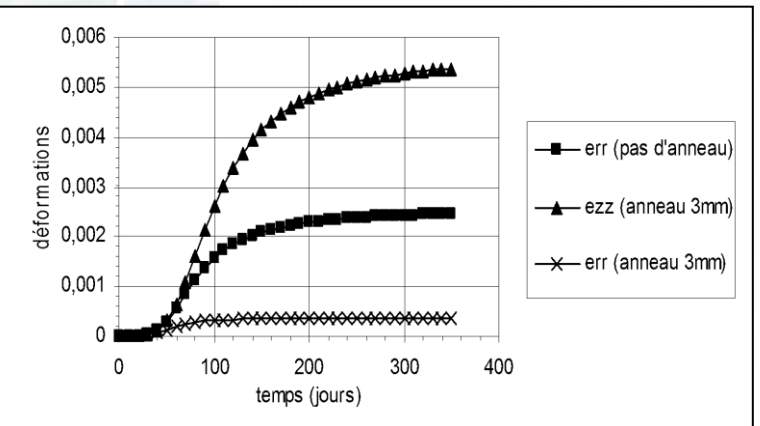
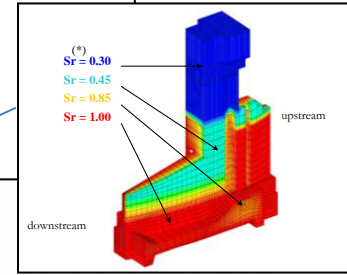
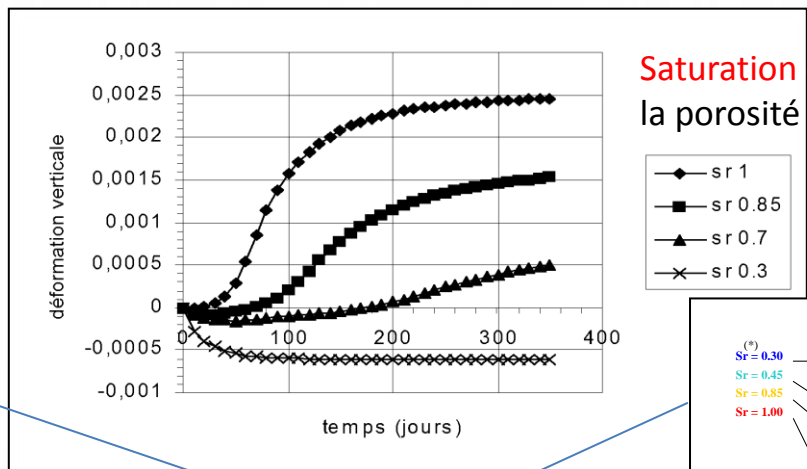
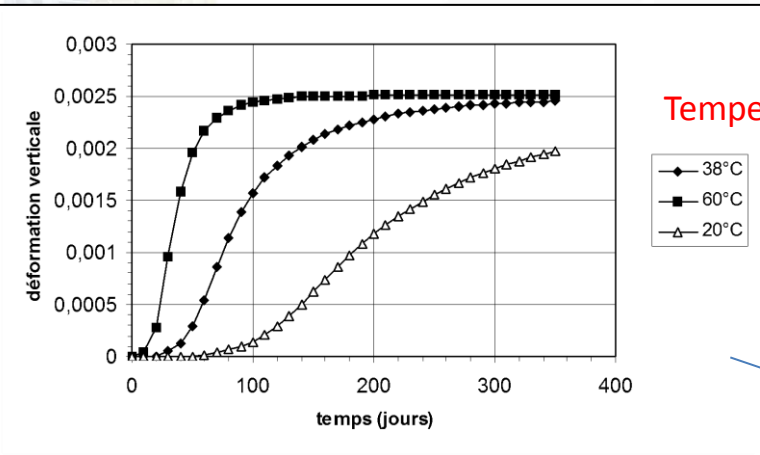
(Thèse Grimal 2007 & Morenon 2017)







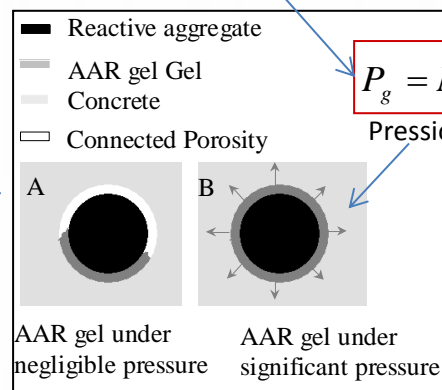
• Influence des conditions Thermo Hydro Mécanique (THM) sur la RAG



$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha_0 \cdot \exp \left[ \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \frac{(Sr - Sr^0)^+}{(1 - Sr^0)} (Sr - A)^+$$

Avancement chimique

**Anisotropie**



$$P_g = M_g \left[ AV_g - (A_0 V_g + b_g tr \varepsilon)^+ \right]^+$$

Pression intra poreuse

Influence de la **contrainte appliquée** sur la vitesse de gonflement





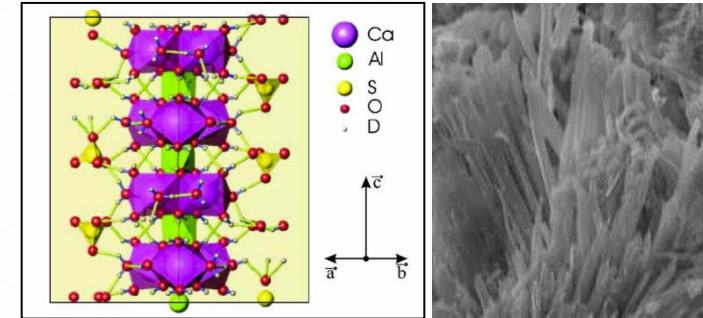
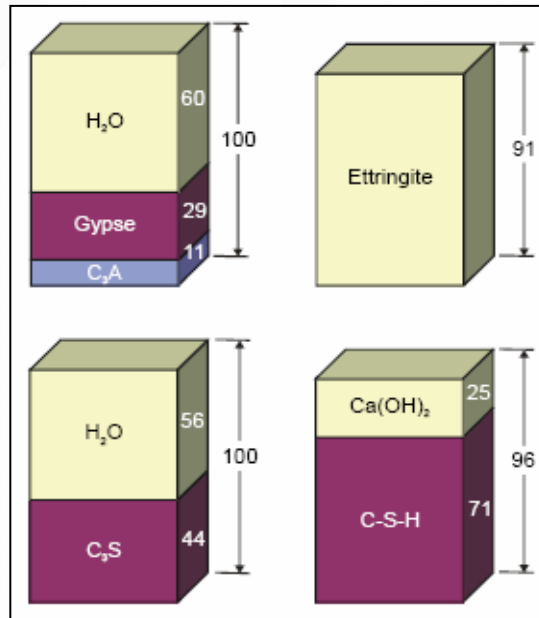
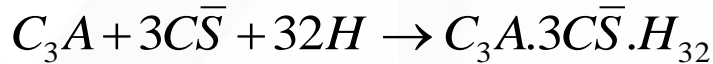
- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - **Réaction Sulfatique interne (RSI)**
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- **Perspectives**



## Effets structuraux de la réaction sulfatique interne (RSI)

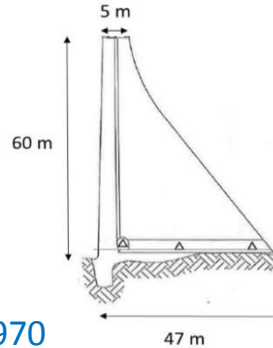


- *Variation des volume molaires importante → pression intraporeuse si ettringite différée → fissuration importante (10X+ que la RAG)*
- *Déstabilisation de l'ettringite primaire pour les températures supérieures à 65°C*

→ **Nécessité de connaître l'historique de température dans les ouvrages**  
**Pour prédire le potentiel de gonflement par RSI**



## Barrage poids atteint d'ettringite différée (thèse Morenon LMDC 2017)



1946

1948

1960

1970

2009

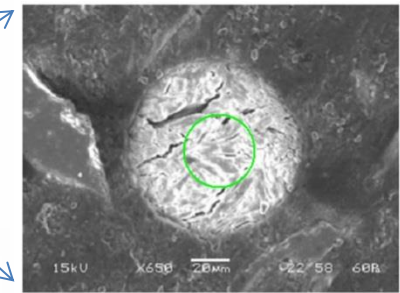
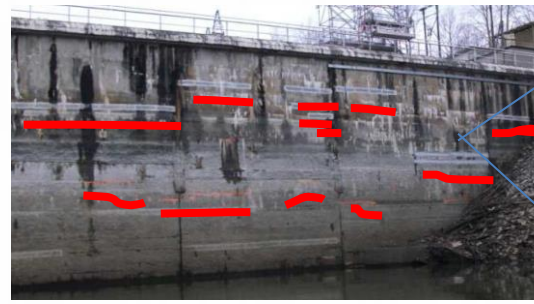
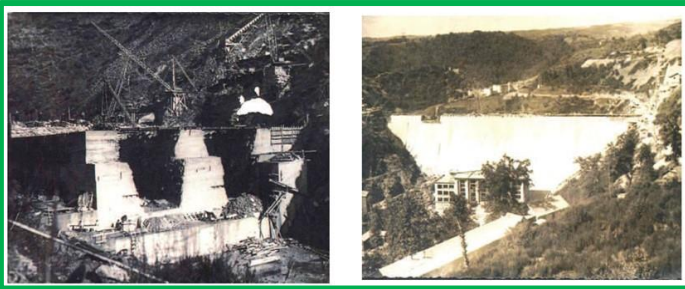
VIE DE L'OUVRAGE



Construction  
1946 à 1948

Vieillessement

Prédiction



Photographie de l'ouvrage en rive droite à l'amont dans les années 2000

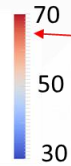
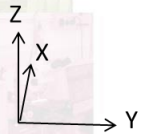
Pore rempli d'ettringite [Division transfert LMDC 2009]





❑ **Modélisation thermique**

Température à 5 mètres du parement amont(°C)

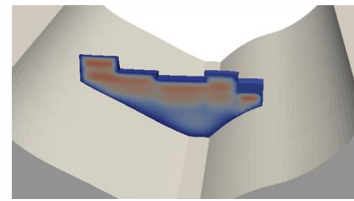
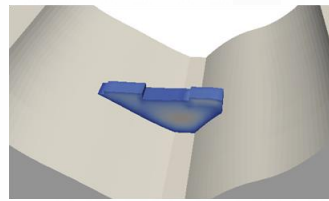
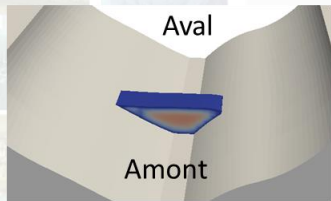


Un potentiel de DEF se crée

3<sup>ème</sup> mois

7<sup>ème</sup> mois

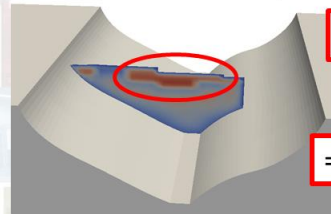
11<sup>ème</sup> mois



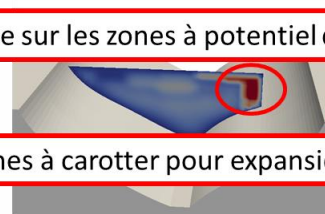
14<sup>ème</sup> mois

17<sup>ème</sup> mois

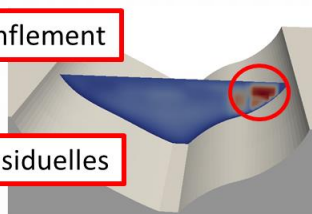
21<sup>ème</sup> mois



Indice sur les zones à potentiel de gonflement



=> Zones à carotter pour expansions résiduelles



(Extrait de la thèse de Pierre Morenon 2017)

- La chronologie de coulage du béton de 1945-46 a été rétablie à partir d'archives photographiques du chantier, et utilisée dans un modèle Chemo-mécanique pour prédire le potentiel de RSI

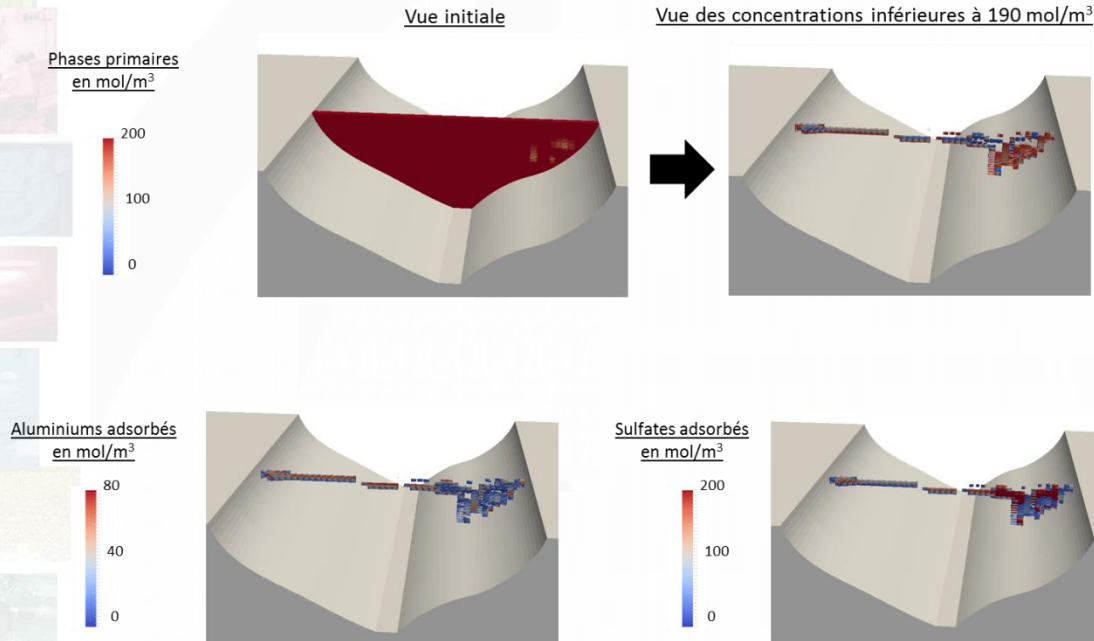
(Thèses LMDC Salgues 2013 et thèse LMDC Morenon 2017)

$$\frac{\partial \text{AFt}}{\partial t} = \chi_{\text{AFt}} \left( 1 - \frac{\log\left(\left(\text{Ca}^{2+}\right)^6 \left(\text{SO}_4^{2-}\right)^3 \left(\text{Al}(\text{OH}_4)^-\right)^2 \left(\text{OH}^-\right)^4\right)}{\log\left(\text{K}_{\text{AFt}}\right)} \right)$$

La modélisation thermo-chimique est passée par des étapes +/- complexes avant d'isoler les phénomènes principaux utilisables à l'échelle du barrage...



☐ Espèces chimiques présentes après la phase de chauffage



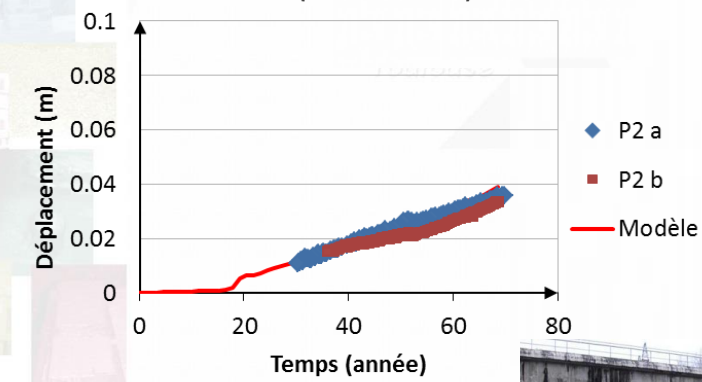
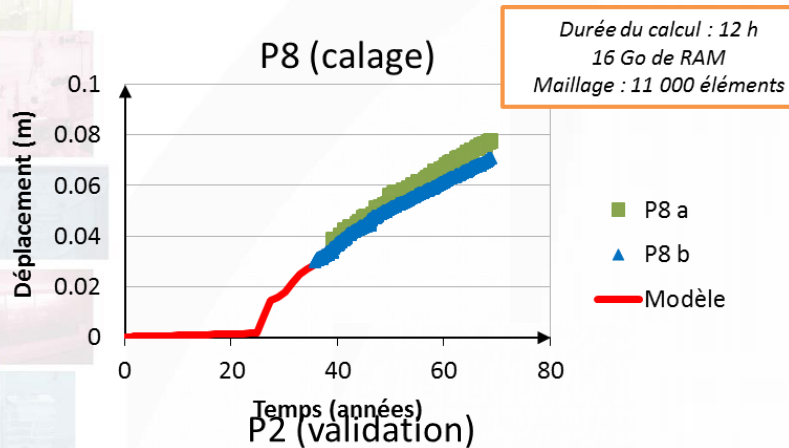
(Illustration thèse Morenon 2017) <sup>9</sup>

- Le potentiel de gonflement dépend de l'histoire thermique
- le gonflement effectif, dépend du potentiel, de la teneur en eau, et de la lixiviation des alcalins...
- Modélisation différentielle intégrant ces aspects  
**THC=moteur des pressions intra-poreuses**

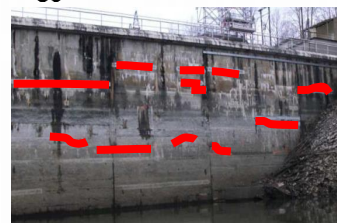
Sellier, A., & Multon, S. (2018). Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 108, 72–86. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.006>



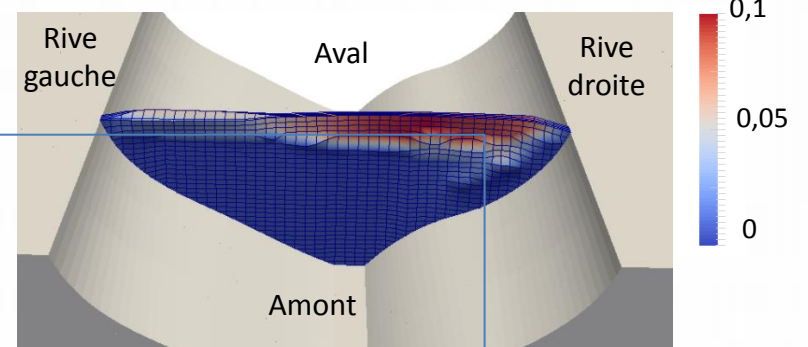
## Déplacements – Fissuration du barrage atteint d'ettringite différée (thèse Morenon 2017)



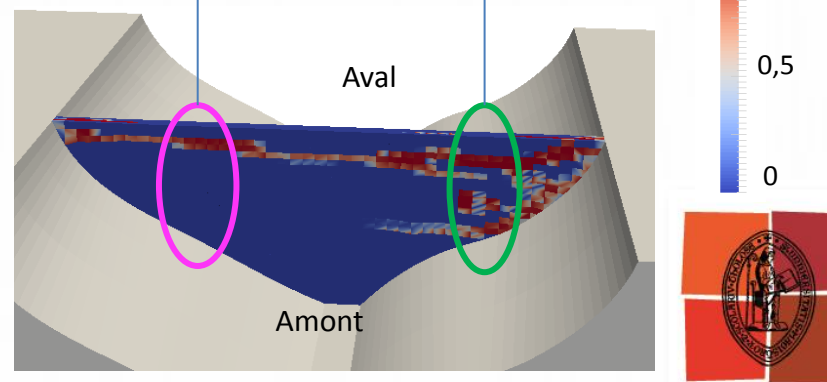
### Déplacements verticaux



### Déformées (70 ans)



### Fissuration localisée (70 ans)







- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives



- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)

- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**

- **Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé**
- Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
- Fluage de la matrice poreuse

- **2- Modélisation des armatures**

- La relaxation des aciers de précontrainte
- Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée

- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**

- Les effets de maillons faibles
- Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué

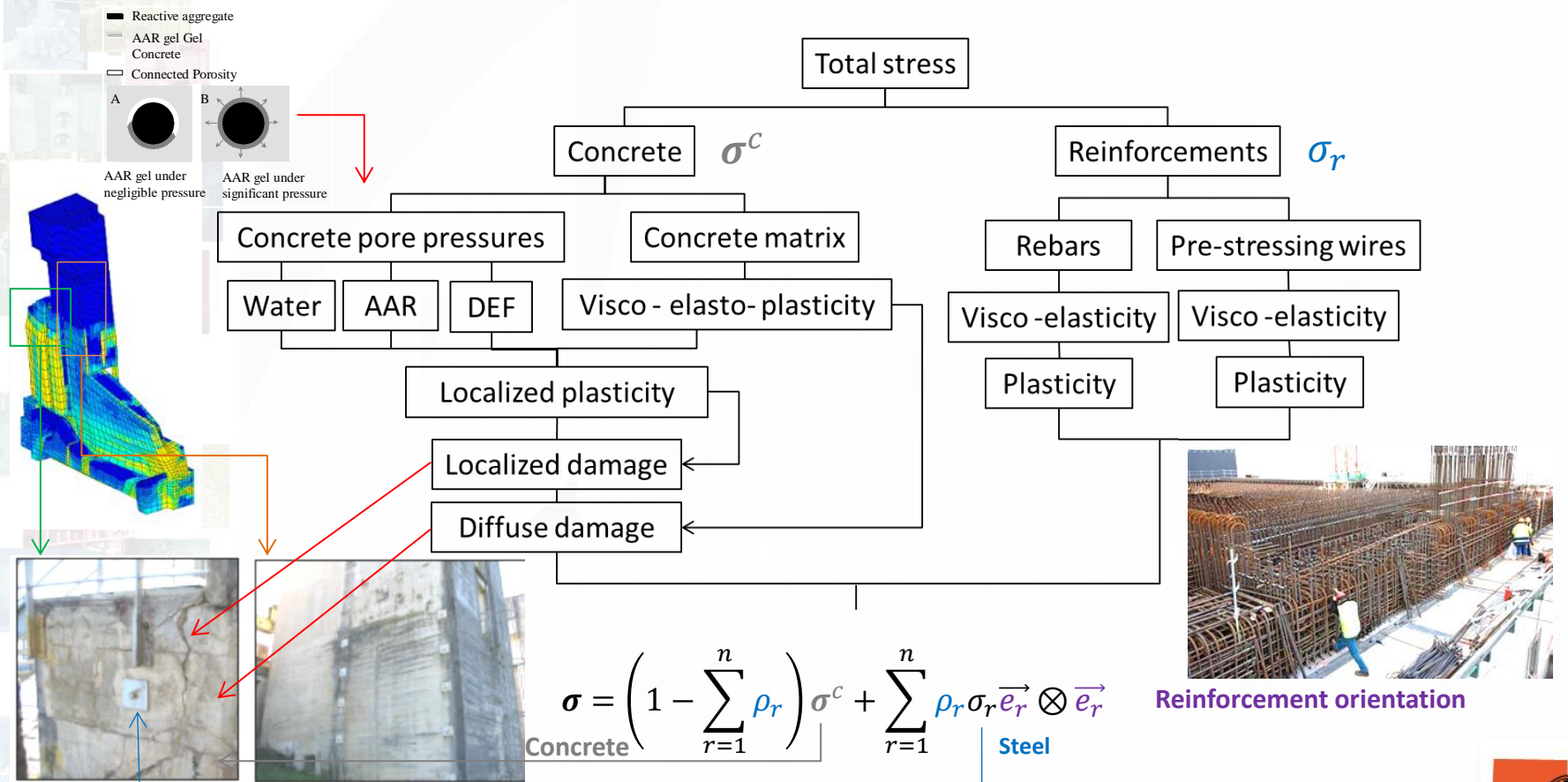
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**

- **Conclusions**

- **Perspectives**



Loi de comportement poro-mécanique homogénéisée pour le béton réactif armé et précontraint

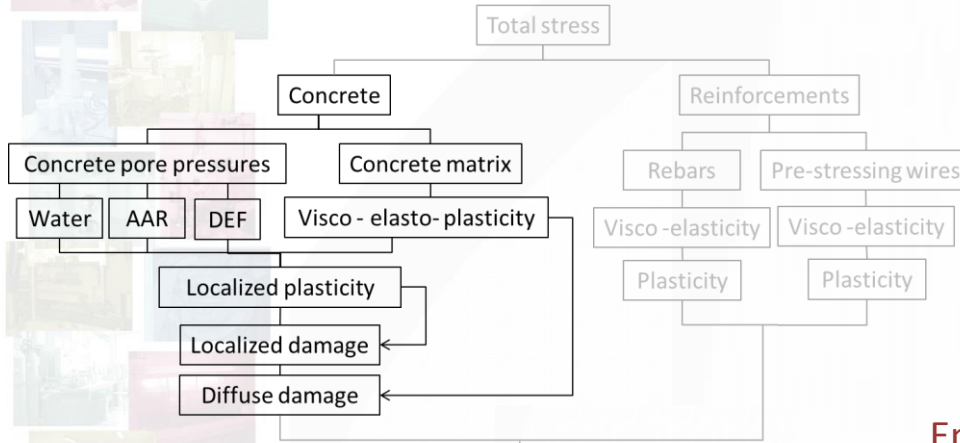


Sellier, A., & Millard, A. (2019). A homogenized formulation to account for sliding of non-meshed reinforcements during the cracking of brittle matrix composites: Application to reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 213, 182–196. <http://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.008>





- Principe de fonctionnement de la partie poro-mécanique pour le béton



Endommagement isotrope de cisaillement

Endommagement anisotrope de traction

Fonction de refermeture de fissure

$$\sigma = \left(1 - \sum_{r=1}^n \rho_r\right) \sigma^c + \sum_{r=1}^n \rho_r \sigma_r \vec{e}_r \otimes \vec{e}_r$$

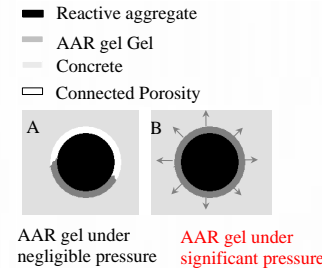
$$\sigma^c = (1 - D^s)(\tilde{\sigma}^{ct}(1 - D^t) + R^c \tilde{\sigma}^{cc})$$

**Pressions physico-chimiques**

$$\tilde{\sigma}^{ct} + \tilde{\sigma}^{cc} = C^0 \varepsilon^e - \sum_i B^i \zeta^i p^i \quad i \in [Water, RAG, RSI]$$

$$\varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^T - \varepsilon^c - \varepsilon^{pt} - \varepsilon^{ps}$$

Tenseur de rigidité élastique du milieu poreux drainé



Déformation de fluage

Déformation plastique de traction  $\varepsilon^{pt} = \varepsilon^{ptl} + \varepsilon^{ptd}$

Déformation plastique de cisaillement



- Sommaire

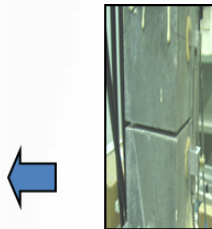
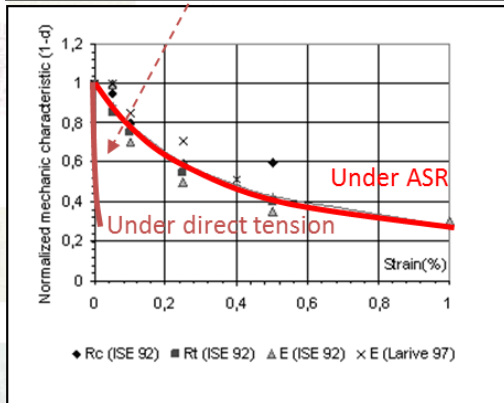
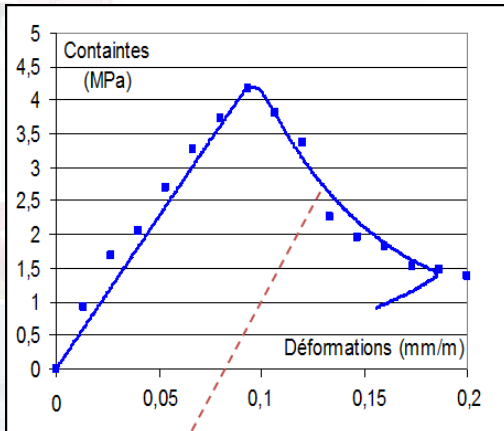
- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - **Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée**
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives

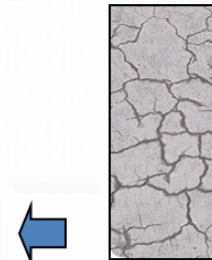


- Intérêt de l'approche poro-mécanique
  - Fissuration diffuse / fissuration localisée

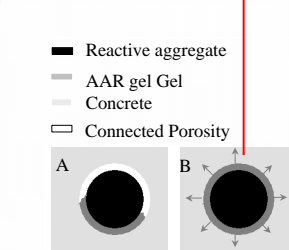
$$\epsilon^{pt} = \epsilon^{ptl} + \epsilon^{ptd}$$



**Traction directe : rupture au maillon faible,** faible énergie de fissuration (surfactive avec localisation macroscopique) :  $\epsilon^{ptl}$



**RAG et RSI : Multi fissuration,** forte énergie de fissuration (volumique sans localisation macroscopique) ;  $\epsilon^{ptd}$



AAR gel under negligible pressure

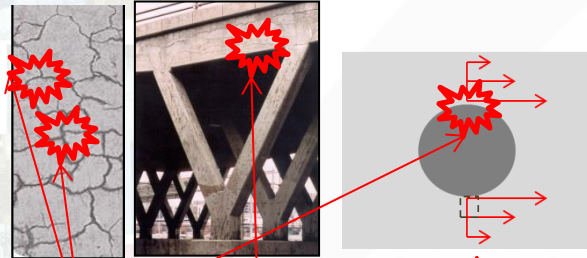
AAR gel under significant pressure

**Intérêt de la poro mécanique pour distinguer les deux types de fissuration**





• Critère orthotrope d'ouverture de fissuration diffuse



Contraintes ortho-radiales induites au bords des granulats ou des pores par les pressions intra poreuses

Critère de plasticité / endommagement = Compétitions entre

- Les effets **négatifs** des différentes pression intra poreuses
- l'effet **positif**
  - de la **pression capillaire** et de la cohésion des hydrates
  - De la **contrainte de compression macroscopique** (précontrainte)

$$f^{td} = \left( \tilde{\sigma}^{cc} + \sum_i K^i b^i S^i P^i \right) - \underbrace{\left( \tilde{R}_{sat}^t - b^w S_r P^w \right)}_{\text{Cohésion en contrainte totale}} \quad \text{pour } i \in [Water, RAG, RSI] \text{ et } P^i > 0$$

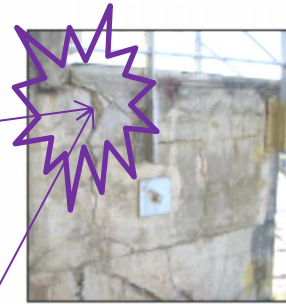
$K^i$  coefficient de concentration de contrainte (normalisé par rapport à l'effet de la contrainte externe)

Cohésion en contrainte totale

• Critère orthotrope d'ouverture de fissuration localisée en contrainte totale

$$f^{ptl} = \tilde{\sigma}^{ct} - \left( \tilde{R}_{sat}^t - b S_r P^w \right)$$

Contrainte totale



• Critère orthotrope de refermeture des fissures localisées en contrainte totale

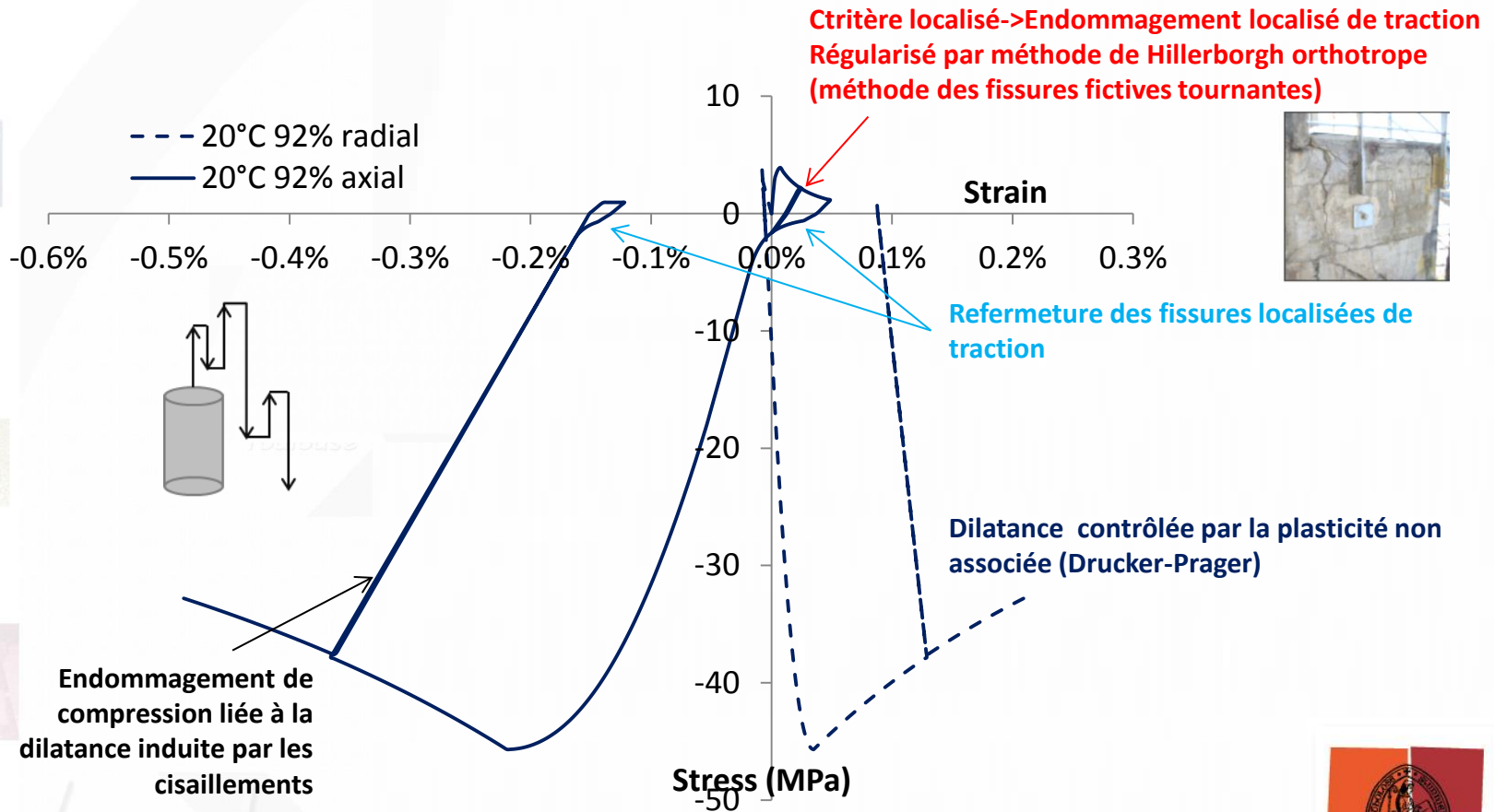
$$f^{ptl} = \left( -\tilde{R}^r - \tilde{\sigma}^{cc} \right) H(\epsilon^{ptl})$$

Résistance à la refermeture de fissure localisée

Heaviside de la déformation localisée de traction



• Réponse du modèle plasticité-endommagement anisotrope sous chargement cyclique





- Sommaire

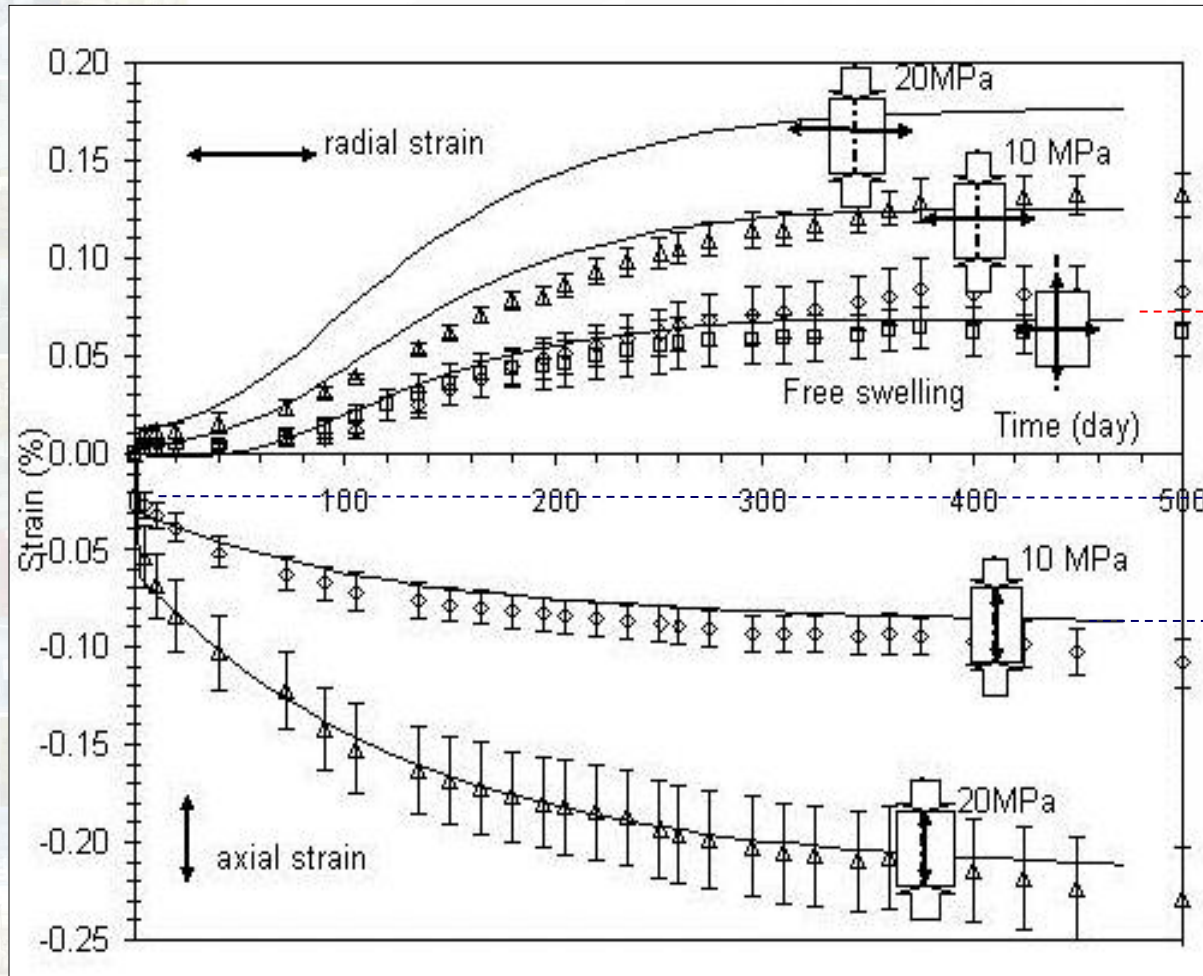
- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - **Fluage de la matrice poreuse**
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- **Perspectives**





• Importance du fluage dans les modèle mécanique de durabilité



Les essais (Multon 2002), montrent que sous 10MPa le fluage représente à 1 an 200% de la déf élastique

La déformation axiale est du même ordre que le fluage à 1 an

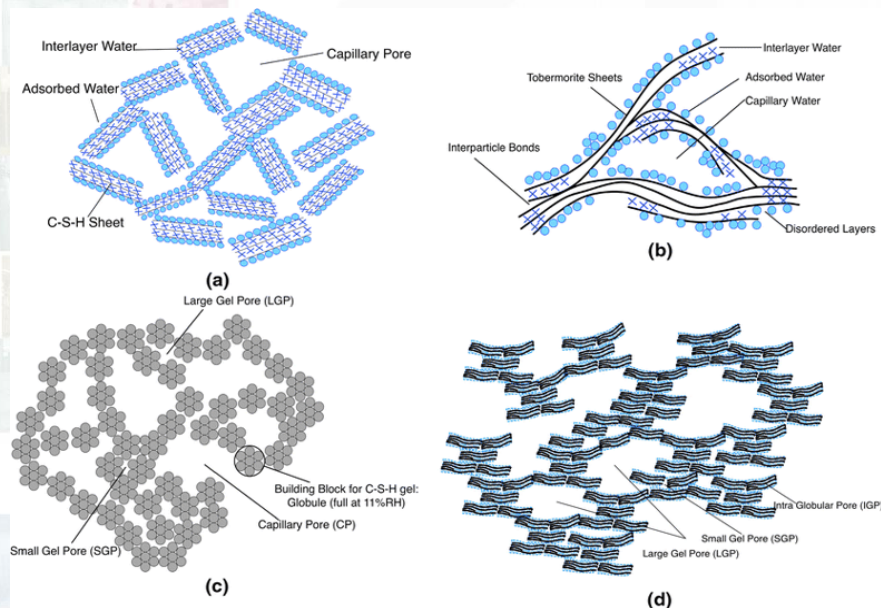
Le fluage doit être modélisé précisément pour une structure atteinte de RAG ou de RSI

(from Grimal & al MJ - ACI 2008)

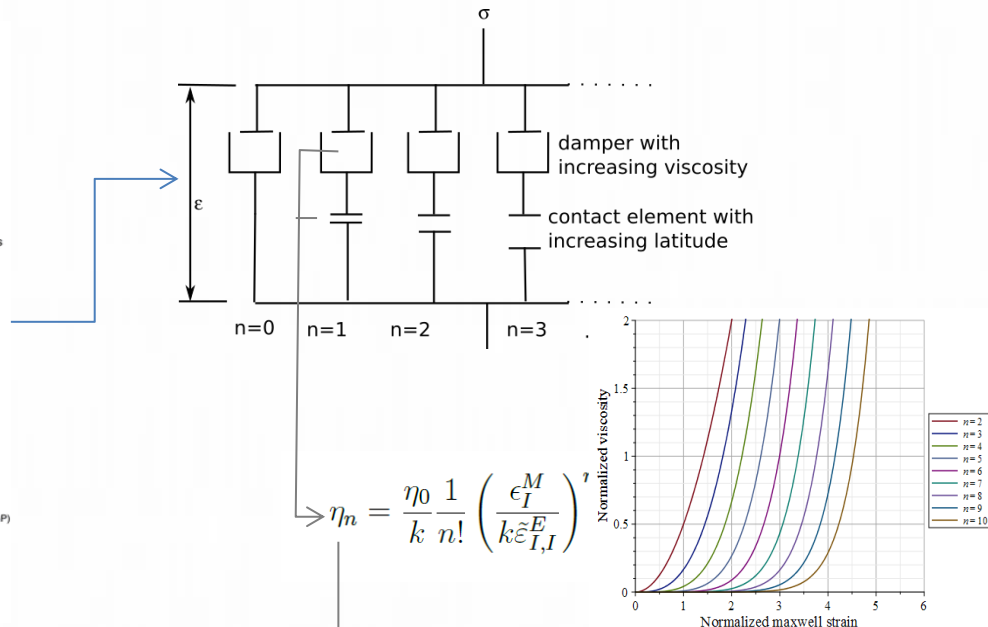


• **Modélisation du fluage non asymptotique basé sur une théorie de consolidation anisotrope**

• **Modèle LMDC Maxwell non linéaire**



structures of C-S-H (a) Powers and Brownyard model [adopted from Powers and Brownyard (1946)], b) Feldman and Sereda model [adopted from Feldman and Sereda (1968)], c) CM-I model [adopted from Jennings (2000)], and d) CM-II model [adopted from Jennings (2008)]



$$\eta_n = \frac{\eta_0}{k} \frac{1}{n!} \left( \frac{\epsilon_I^M}{k \tilde{\epsilon}_{I,I}^E} \right)^n$$

$$\eta(\epsilon_I^M) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n = \frac{\eta_0}{k} \exp \left( \frac{1}{k} \left( \frac{\epsilon_I^M}{\tilde{\epsilon}_{I,I}^E} \right) \right)$$

Sellier, A., Multon, S., Buffo-lacarrière, L., Vidal, T., Bourbon, X., & Camps, G. (2016). Concrete creep modelling for structural applications : non-linearity , multi-axiality , hydration , temperature and drying effects. Cement and Concrete Research, 79, 301-315. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.001>



• **Modélisation du fluage non asymptotique basé sur une théorie de consolidation anisotrope**

Vitesse de Fluage proportionnel au chargement (donc à la def élastique)

Le fluage réside principalement dans les C-S-H qui en se consolidant voit leur viscosité augmenter

$$\frac{\partial \epsilon_I^c}{\partial t} = \frac{\epsilon_I^e}{\tau_I}$$

Diminution de la vitesse de fluage du béton

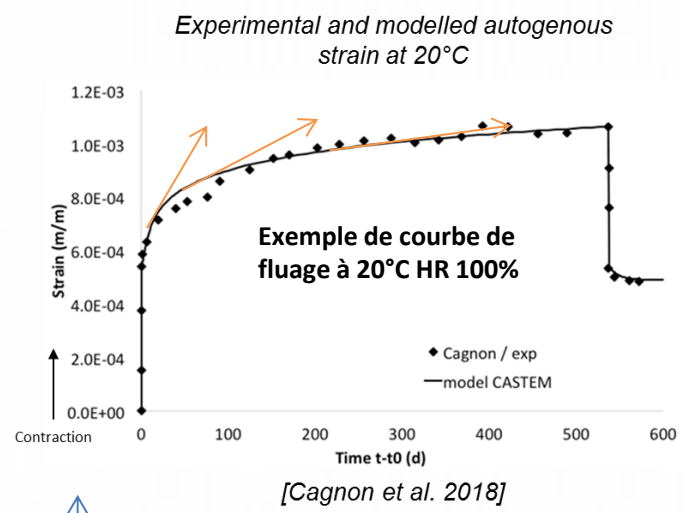
Transfert des contraintes sur les granulats et autres hydrates

$$\tau_I = \tau^{ref} C_v^T C_v^H C_I^c$$

Temps caractéristique du fluage ↗

Diminution de la vitesse de fluage des C-S-H

Réduction des contraintes sur les C-S-H



**Modèle de fluage du LMDC anisotrope, incrémental à variables internes, non asymptotique**

Coefficient de consolidation anisotrope

$$C_I^c = \frac{1}{k} \exp\left(\frac{\epsilon_I^c}{k \epsilon_I^e}\right)$$

Sellier, A., Multon, S., Buffo-lacarrière, L., Vidal, T., Bourbon, X., & Camps, G. (2016). Concrete creep modelling for structural applications : non-linearity , multi-axiality , hydration , temperature and drying effects. *Cement and Concrete Research*, 79, 301–315. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.10.001>





- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives



- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)

- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**

- Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
- Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
- Fluage de la matrice poreuse

- **2- Modélisation des armatures**

- **La relaxation des aciers de précontrainte**
- Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée

- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**

- Les effets de maillons faibles
- Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué

- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**

- **Conclusions**

- **Perspectives**



• **Prise en compte de la relaxation des câbles de précontrainte dans le BP homogénéisé**

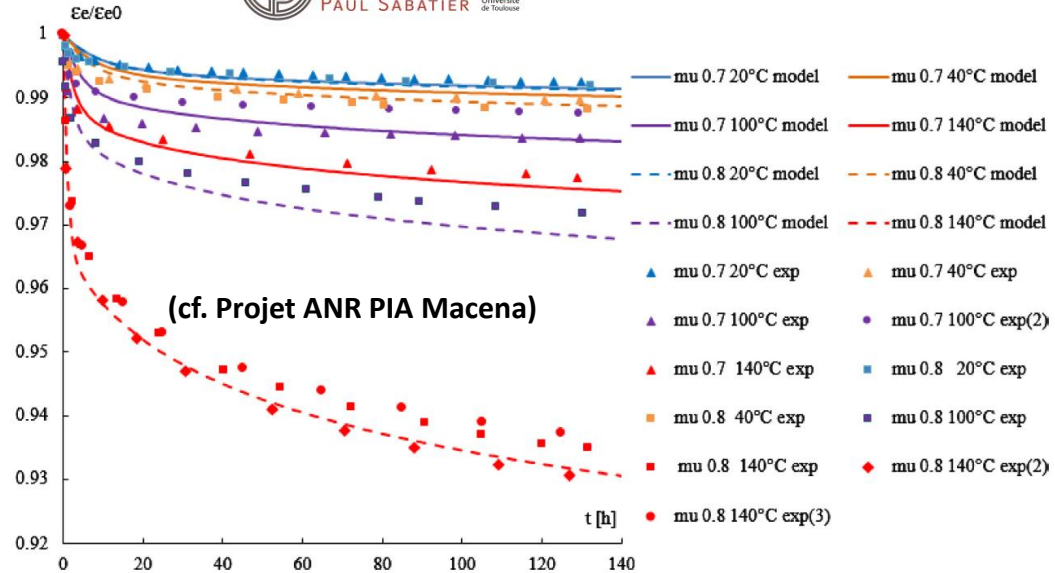


Fig. 4. Comparison between model and experimental results of relaxation versus time for different temperatures and loading ratios (0.7 and 0.8).

**1-Heated steel wires in relaxation conditions (Ifsttar Nantes)**

**2-LMDC Modeling (PhD Chhun Ponleu) uses the same consolidation theory than for concrete but with an activation energy of viscosity dependent of loading level (Chhun et al. 2018)**

Chhun, P., Sellier, A., Lacarriere, L., Chataigner, S., & Gaillet, L. (2018). Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature. *Construction and Building Materials*, 163, 337–342. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.123>

**Modèle de relaxation du LMDC anisotrope, incrémental à variables internes, non asymptotique (même base théorique que pour le béton...)**





- Sommaire

- **Contexte**

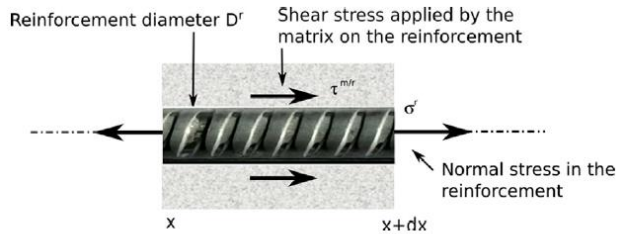
- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - « Champs de phases » pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives



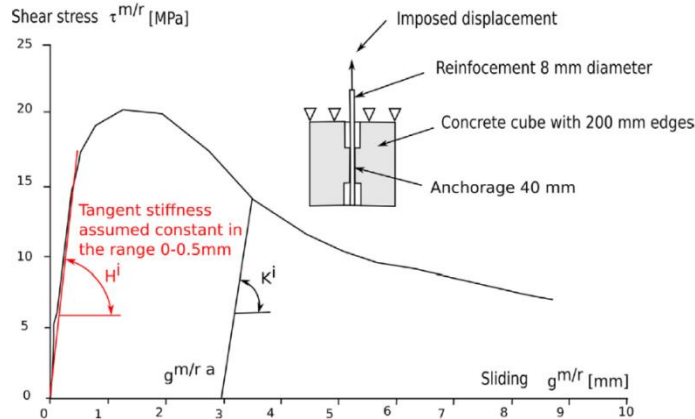


• **Prise en compte du glissement linéaire acier béton dans les modèles homogénéisés**

**Pb d'homogénéisation : renforts plus grands que les EF !!!**



Axial and shear stresses applied to a reinforcement imbedded in a matrix.



Pull out test to obtain the bond stiffness

Sellier, A., & Millard, A. (2019). A homogenized formulation to account for sliding of non-meshed reinforcements during the cracking of brittle matrix composites: Application to reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 213, 182–196. <http://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.008>

• **Axial equilibrium**

$$\frac{\partial \sigma^r}{\partial x} \frac{\pi (D^r)^2}{4} + \tau^{m/r} \pi D^r = 0$$

• **Steel behavior law**

$$\sigma^r = E^r \underbrace{(\epsilon^r - \epsilon^{ra})}_{\epsilon^{re}}$$

• **Bond linearized behavior law**

$$d\tau^{m/r} = H^i dg^{m/r}$$

• **De-bonding Kinematic relationship**

$$\frac{\partial g^{m/r}}{\partial x} = \epsilon^m - (\epsilon^{re} + \epsilon^{ra})$$



**Resulting Helmholtz differential equation**

$$\epsilon^{re} - \frac{E^r D^r}{4H^i} \frac{\partial^2 \epsilon^{re}}{\partial x^2} = \epsilon^m - \epsilon^{ra}$$

The elastic strains of rebars become the state variables of the continuous Helmholtz problem

**Formulation différentielle de "champ de phases" continu se substituant à la modélisation explicite des renforts (pas de maillage des renforts longs, et glissement tout de même considéré !)**



• **Prise en compte du glissement linéaire acier béton dans les modèles homogénéisés**

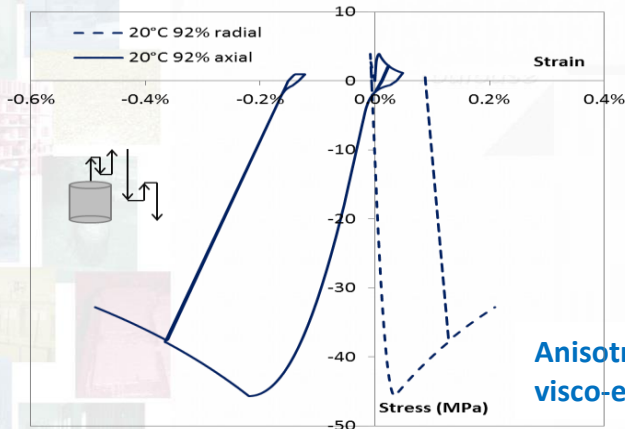
• **Classical combination of concrete and steel stresses**

$$\sigma_{ij} = \left( 1 - \sum_{n=1}^{N^r} \rho^n \right) \sigma_{ij}^m + \sum_{n=1}^{N^r} \rho^n \sigma_{ij}^m$$

Steel ratio

Steel stress

Concrete stress



Anisotropic-Damage coupled with visco-elasto-plastic

$$\sigma^r = E^r (\underbrace{\epsilon^r - \epsilon^{ra}}_{\epsilon^{re}})$$

To consider R/C sliding without meshing reinforcements, it's necessary solving simultaneously the global equilibrium of RC and the Helmholtz equation

• **Equilibrium of homogenized RC**

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \text{ for } i \in [1, 2, 3]$$

$$\epsilon_n^{er} - \frac{l_{cn}^2}{2} \frac{\partial^2 \epsilon_n^{er}}{\partial x_n^2} = S_n \text{ for } n \in [1 \dots N^r]$$

• **Helmholtz differential equation for equilibrium during the steel concrete sliding process**

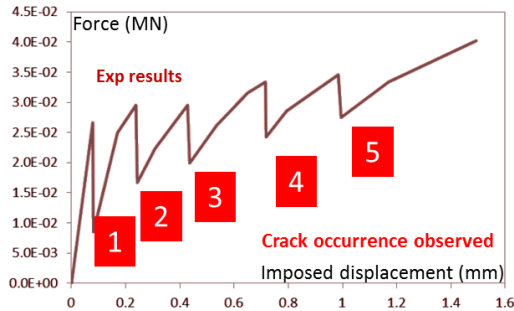
**Implémentation existante dans CASTEM 2018**



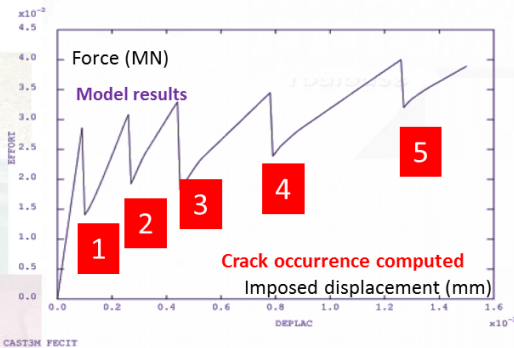




• **Prise en compte du glissement linéaire acier béton dans les modèles homogénéisés**

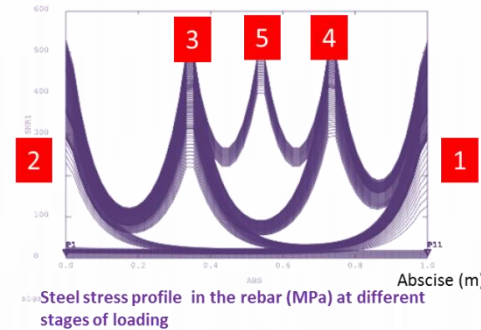
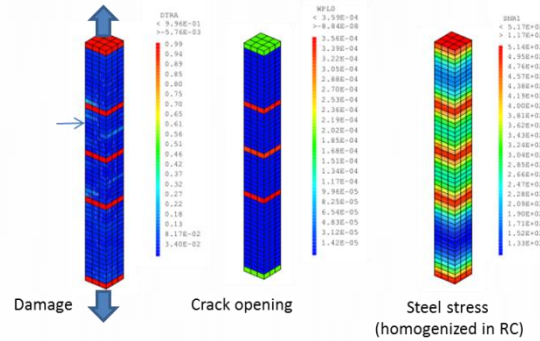


• **Experimental response of the concrete tie beam**



• **Numerical response of the concrete tie beam modeled without meshing the rebar is realistic**

• **The central bar is not meshed but replaced by the Helmholtz equation solving its elastic strain**



• **The crack's formation chronology, and their opening are well reproduced without meshing reinforcements**

• Solution: elastic strain in reinforcements

$$\epsilon^{re} - \frac{E'D^r}{4H^i} \frac{\partial^2 \epsilon^{re}}{\partial x^2} = \epsilon^m - \epsilon^{ra}$$

• Total strain of concrete (including the crack opening)

• Inelastic strain in rebar (including plasticity and relaxation)

**The elastic strain in rebars is analogous to the solution of an orthotropic diffusion in the volumic Finite elements around the crack !**





- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)

- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**

- Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
- Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
- Fluage de la matrice poreuse

- **2- Modélisation des armatures**

- La relaxation des aciers de précontrainte
- Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée

- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**

- Les effets de maillons faibles
- Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué

- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**

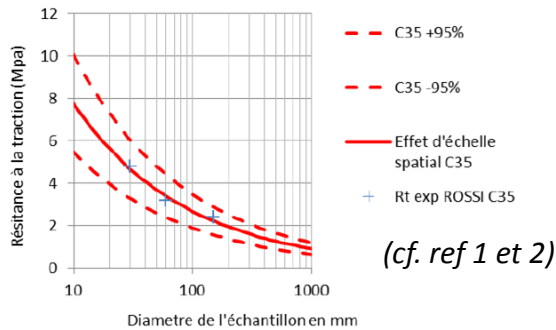
- **Conclusions**

- **Perspectives**



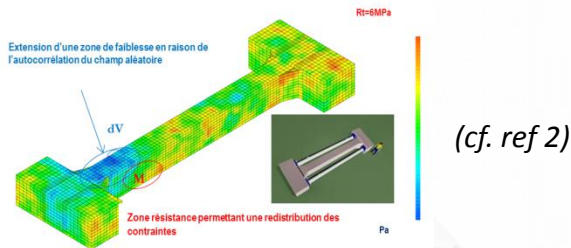
## • Problématique du maillon faible pour la localisation de la fissure

- Pour un état de contrainte homogène la localisation a lieu au maillon faible
- La résistance du maillon faible diminue avec l'augmentation du volume chargé
- Le maillon faible peut être modélisé de plusieurs manières
  - Déterministe en utilisant la **loi de Weibull** qui nécessite une intégration explicite de l'état de contrainte cf. opérateur 'WEIBULL'



**Pb : Calcul explicite du volume chargé par l'intégrale de Weibull, localisation difficile en chargement homogène, difficulté à actualiser l'intégrale de Weibull lors d'un calcul non linéaire...**

- Probabiliste en utilisant une succession de **champs aléatoires** à longueur de corrélation et variance compatible avec l'effet d'échelle cf. 'ALEA' 'BANDES\_TOURNANTES' dans CASTEM par exple



**Pb : grand nombre de tirages aléatoires nécessaire, choix de la longueur d'autocorrélation et des caractéristiques aléatoires du champs difficile, mais localisation facilitée...**

(1) Barre, F. et al. Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures. Control of Cracking in Reinforced Concrete Structures (2016). doi:10.1002/9781119347088 (ouvrage de recommandations suite au PN CEOS.fr)

(2) Sellier, A. & Millard, A. Dépendance spatio temporelle de la résistance des matériaux, origines des phénomènes et modélisation. 21<sup>ème</sup> congrès Français de Mécanique, Bordeaux 26-30 août 2013 1-6 (AFM, 2013).





- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)

- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**

- Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
- Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
- Fluage de la matrice poreuse

- **2- Modélisation des armatures**

- La relaxation des aciers de précontrainte
- Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée

- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**

- **Les effets de maillons faibles**
- Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué

- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**

- **Conclusions**

- **Perspectives**

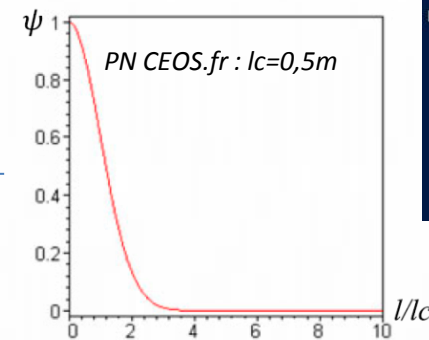
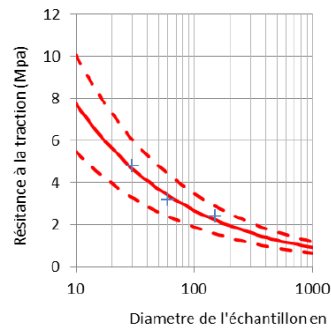


## • Méthode originale pour traiter les effets d'échelle probabilistes : WL2

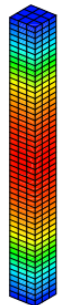
- L'intégrale de Weibull est modifiée pour devenir une intégrale non locale permettant d'intégrer la qualité de contrôle du béton dans le calcul d'effet d'échelle (rejet des bétons non conformes)
- Les effets d'échelle sont considérés analytiquement jusqu'à un volume chargé maximal  $V_{max}$  obtenue par une fonction non locale

$$\frac{R_{t(M)}}{R_{t/Vref}} = \left( \frac{V_{ref}}{V_{eq}(M)} \right)^{1/m}$$

$$\ln(1 - Pf_{V/A}) = \int_V \frac{\ln(1 - Pf_e)}{V_e} \psi(l/lc) dV = \ln(1 - Pf_e) \frac{V_{eq/A}}{V_e}$$



Effet d'échelle de Weibull



$$V_{max(M)} = \int_{V \rightarrow \infty} \psi(l/lc) dV = (lc\sqrt{2\pi})^N$$

Volume maximal  $V_{eq}(M)$  considéré par la méthode WL2

**Pondération non locale proposée dans le PN CEOS.fr pour tenir compte du contrôle qualité**





- Sommaire

- **Contexte**

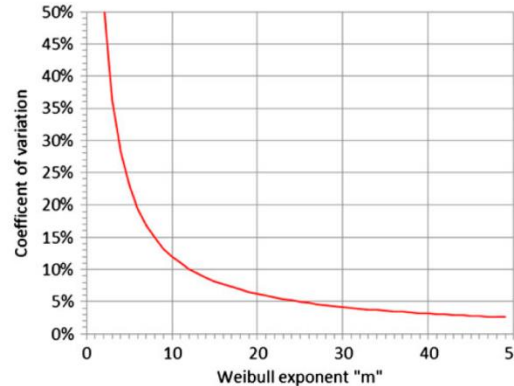
- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - **Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué**
- Application à une pile de pont atteinte de RSI
- Conclusions
- Perspectives





• **Méthode originale pour traiter les effets d'échelle probabilistes : WL2**

$$\frac{R_{t(M)}}{R_{t/Vref}} = \left( \frac{V_{ref}}{V_{eq(M)}} \right)^{1/m}$$



Relation entre l'exposant de Weibull « m » et le coefficient de variation de la résistance d'après (ref 3)

$$V_{eq(M)} = \alpha \left( \frac{\sigma_{max}}{R_{t/Vref}} \right)^{-m}$$

avec  $\alpha = \int_V \left( \frac{\sigma}{R_{t/Vref}} \right)^m \psi(l/l_c) dV$

D'après (ref Sellier & Millard 2014), un développement limité en série de Taylor d'ordre 2 en espace permet de ramener l'estimation du volume équivalent à une équation d'Helmholtz :

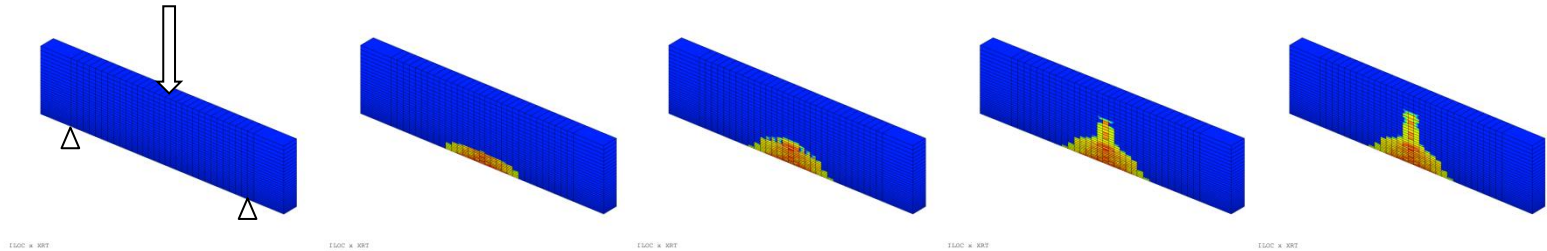
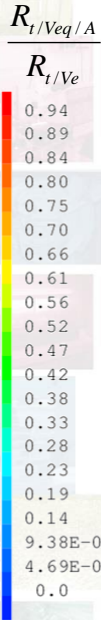
$$\alpha - \left( \frac{lc^2}{2} \right) \Delta \alpha = V_{max} \cdot \left( \frac{\sigma}{R_{t/Vref}} \right)^m$$

**Egalement disponible dans CASTEM**

- **Le calcul de l'intégrale de Weibull est remplacée par une équation d'Helmholtz résolue numériquement par un système linéaire**
- **i.e. champ de phase d'une variable probabiliste (mais pas un champ aléatoire !)->la résistance la plus probable est déterminée directement en fonction de géométrie sollicitée en un seul calcul**

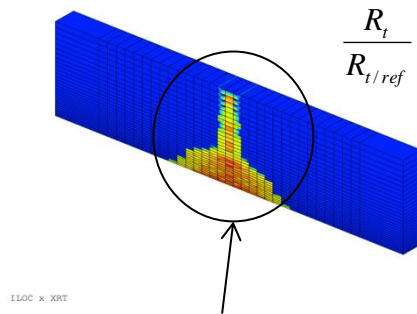


Exemple : Auto détermination de la résistance à la traction la plus probable lors d'un calcul **PASAPAS** de poutres en flexion 3 point, non encochées, issues des travaux de Syroka Korol (ref 4)

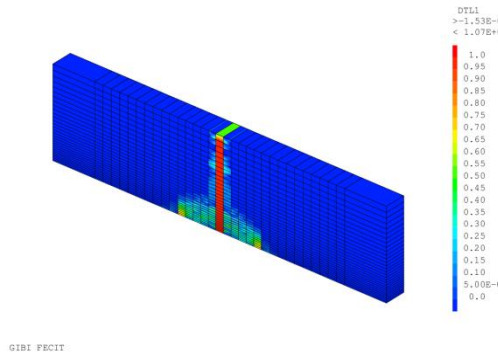


**Autodétermination, lors d'un calcul d'endommagement, du champ de résistance à la traction le plus vraisemblable en zone de localisation potentielle, la résistance intrinsèque la plus vraisemblable dépend, à chaque pas, du chargement ( via  $V_{eq}$ )**

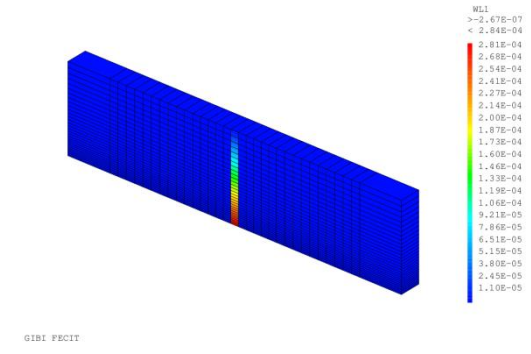
Résistance la plus vraisemblable en fin de simulation



Endommagement traction



Ouverture de fissure localisée



- Estimation de la résistance à utiliser dans les lois d'endommagement par WL2
- Contrôle de l'énergie dissipée par une méthode de Hillerborg anisotrope, cf. ref 5
- Prédiction des ouvertures de fissures, cf. ref 5

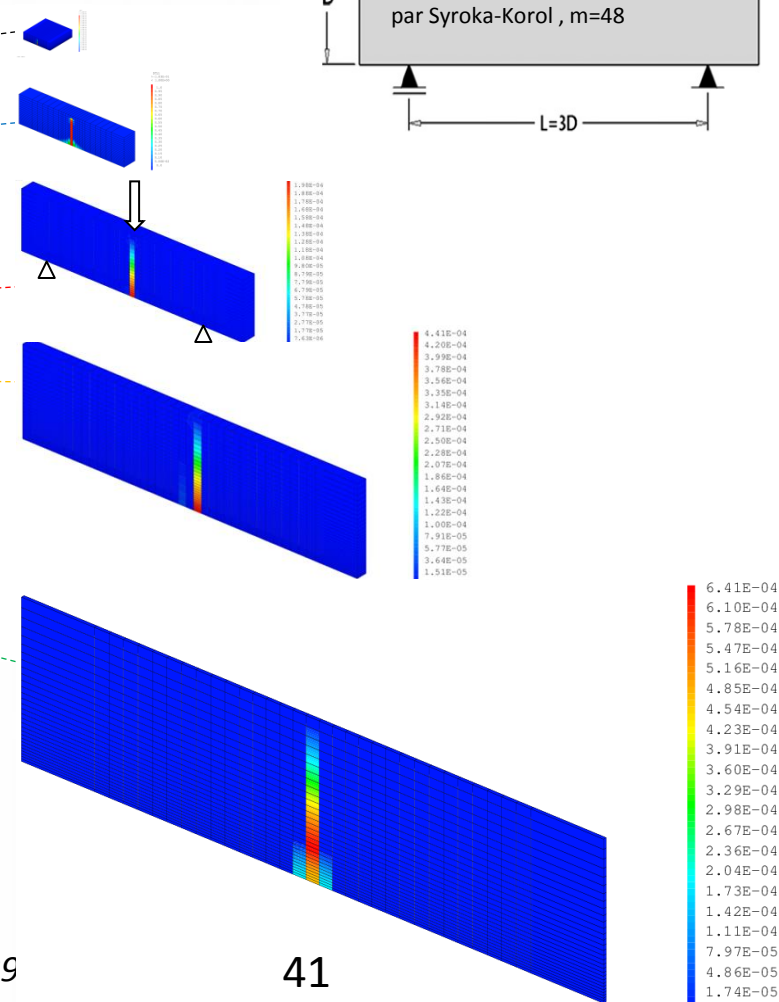
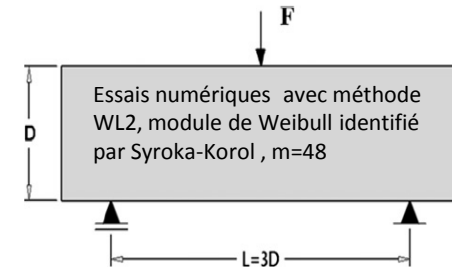
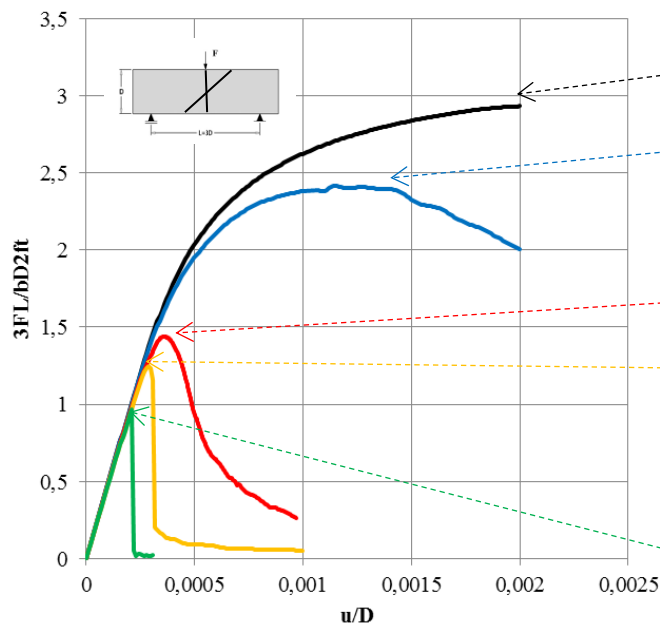
(4) Syroka-Korol, E., Teichman, J. & Mróz, Z. FE calculations of a deterministic and statistical size effect in concrete under bending within stochastic elasto-plasticity and non-local softening. *Eng. Struct.* 48, 205–219 (2013).

(5) Sellier, A., Casaux-Ginestet, G., Buffo-Lacarrière, L. & Bourbon, X. Orthotropic Damage coupled with Localised Crack Reclosure Processing. Part I: Constitutive Laws. *Eng. Fract. Mech.* 97, 148–167 (2013).



• **Méthode originale pour traiter les effets d'échelle probabilistes : WL2**

Aptitude de la méthode à considérer simultanément les effets d'échelle déterministes et probabilistes : test par simulation de poutres non entaillées



En l'absence d'effet d'échelle toutes les courbes devraient être superposées

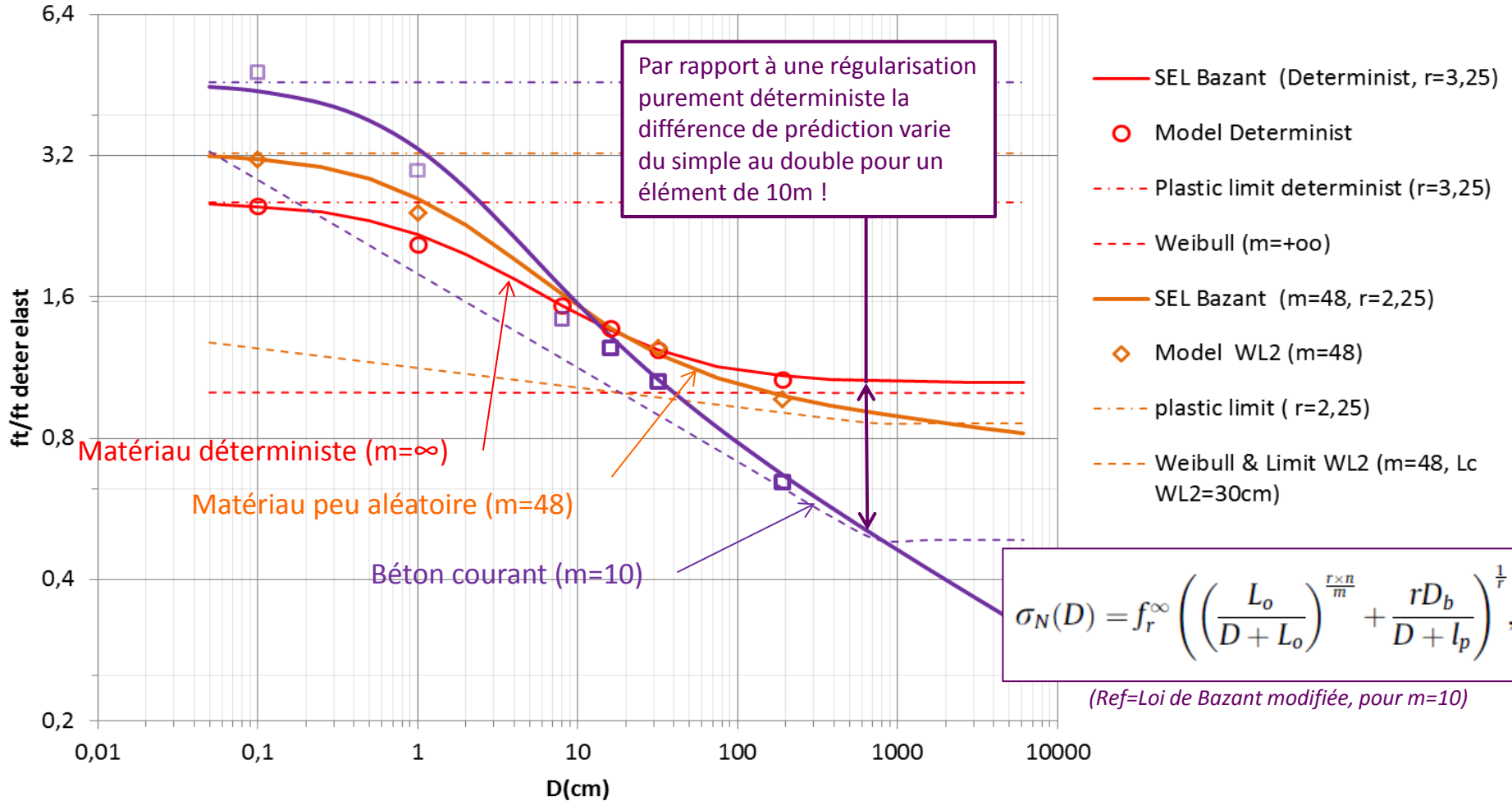
La méthode prédit une forte dépendance de la résistance normée à la taille de la structure.

Réalisme de cet effet d'échelle ?





• Méthode originale pour traiter les effets d'échelle probabilistes WL2





- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- Conclusions
- Perspectives



• Exemple de calcul EF combinant les méthodes présentées :  
**Pile de pont atteinte de d'ettringite différée**

Champs EF résolus au niveau EF :  $U, \epsilon^{nr}, \alpha$

Champs résolus au niveau EF: T, W

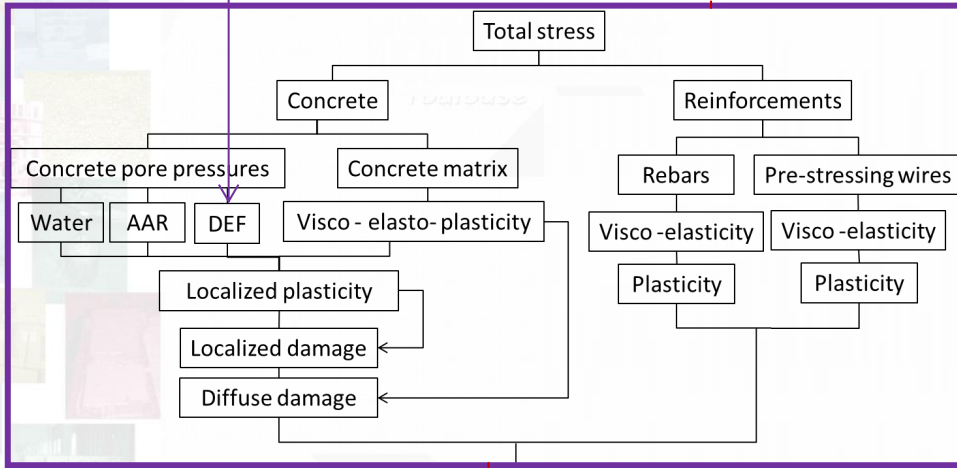
- Transfert thermique long terme
- Transfert hydriques long terme

Non linéarités

- Chimie hydratation
- Chimie RSI

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \text{ for } i \in [1, 2, 3] \\ \epsilon_n^{er} - \frac{l_{cn}^2}{2} \frac{\partial^2 \epsilon_n^{er}}{\partial x_n^2} = S_n \text{ for } n \in [1 \dots N^r] \\ \alpha - \left(\frac{lc^2}{2}\right) \Delta \alpha = V_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma}{R_t/V_{ref}}\right)^m \end{cases}$$

$$\begin{aligned} V_{eq(M)} &= \alpha \left(\frac{\sigma_{\max}}{R_t/V_{ref}}\right)^{-m} \\ \frac{R_t(M)}{R_t/V_{ref}} &= \left(\frac{V_{ref}}{V_{eq(M)}}\right)^{1/m} \end{aligned}$$



Non linéarités

Champs de variables internes au niveau des points de Gauss

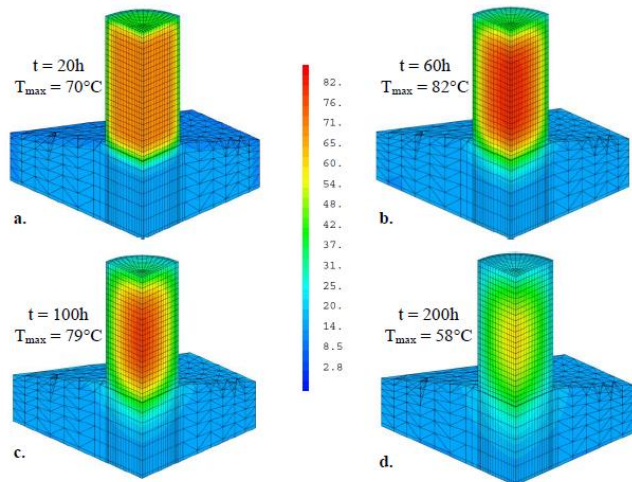
**5 Champs au niveau EF (VA principales)**  
**Plusieurs dizaines de VI au points de Gauss**





• Exemple de calcul EF combinant les méthodes présentées :  
**Pile de pont atteinte de d'ettringite différée**

1 - Calcul des températures jeune âge à partir du modèle d'hydratation

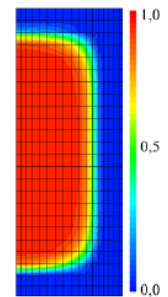


(Thèse LMDC VINCI GP Thiebaut 2018)

Sellier, A., & Multon, S. (2018). Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 108, 72–86.

<http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.006>

2- Calcul de potentiel d'ettringite différé en fonction de l'histoire des températures –cf. ref (4)



3- Calcul de la teneur en eau en fonction du temps

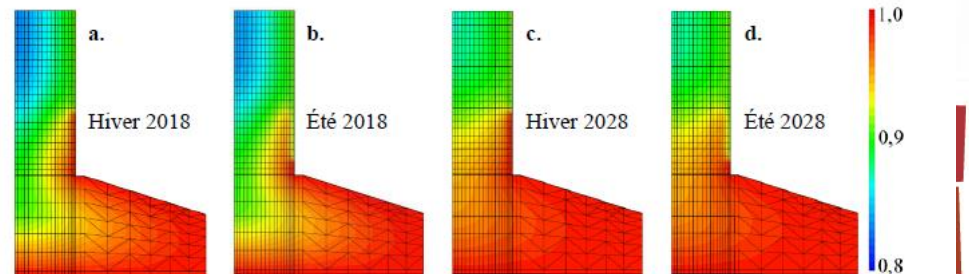


Figure 4-38. Champs de degré de saturation de la semelle et du fût de la pile P1 en hiver (a.) et été 2018 (b.), et en hiver (c.) et été 2028 (d.).



- Exemple de calcul EF combinant les méthodes présentées :  
**Pile de pont atteinte de d'ettringite différée (Thèse LMDC VINCI GP Thiebaut 2018)**

4- Calcul de l'avancement de la réaction chimique d'ettringite différée ne fonction du temps (4)

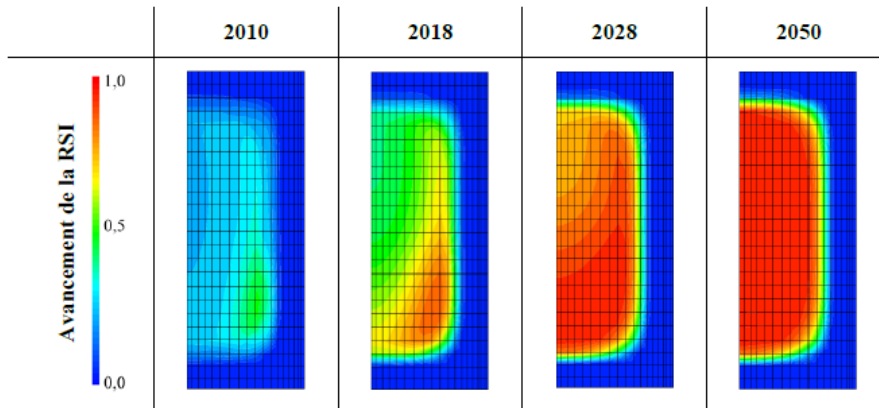


Figure 4-41. Champs d'avancement de la RSI du fût de la pile P1. Les valeurs affichées sont

5-1 Calcul mécanique, champs de déplacement

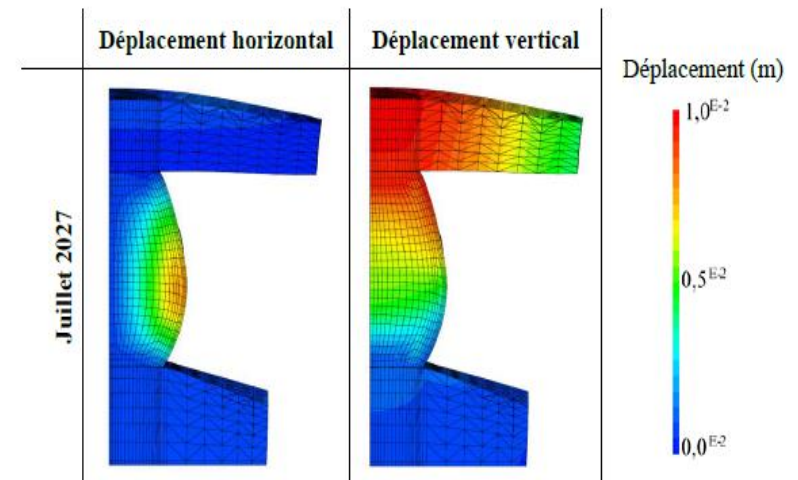


Figure 4-45. Déplacements horizontaux et verticaux tracés sur la déformée de la pile (coefficient d'amplification égal à 100).

(Extraits de la thèse de Yvan Thiebaut : LMDC VINCI GP 2018)

Sellier, A., & Multon, S. (2018). Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for assessment of affected concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 108, 72–86. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.006>





- Exemple de calcul EF combinant les méthodes présentées :  
Pile de pont atteinte de d'ettringite différée (Thèse LMDC VINCI GP Thiebaut 2018)

5-2 Calcul mécanique, champs des fissures localisées

5-3 Calcul mécanique, champs des contraintes dans les aciers répartis

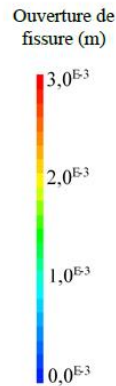
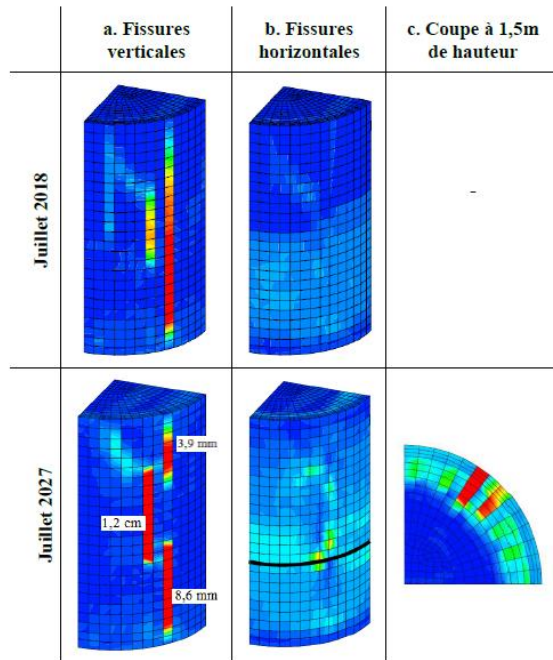


Figure 4-44. Ouvertures de fissures verticales et horizontales dans le fût de la pile en Juillet 2027. L'ouverture des fissures dont la valeur est en dehors de l'échelle est indiquée directement sur la figure. Le plan de coupe est indiqué par le trait noir.

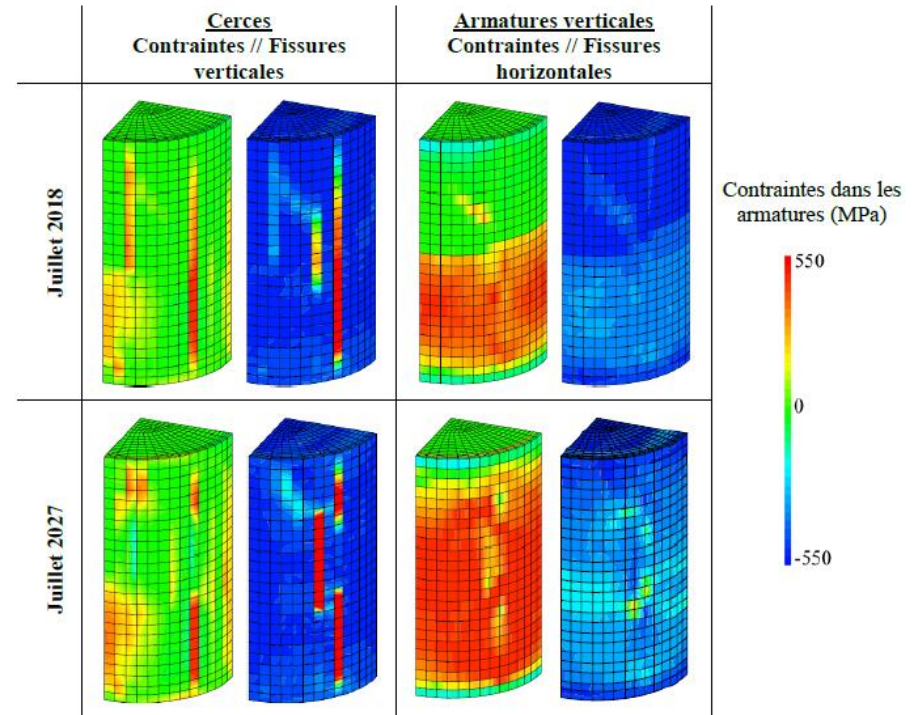


Figure 4-47. Champs de contraintes dans les armatures horizontales et verticales et champs d'ouverture de fissures associées en Juillet 2018 et 2027.





- Sommaire

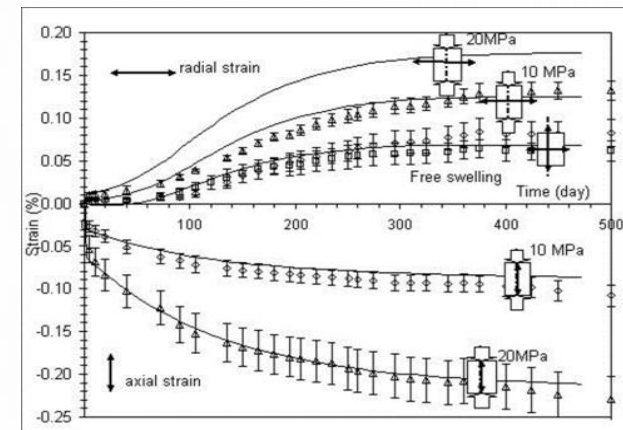
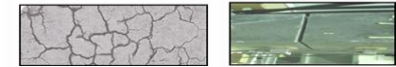
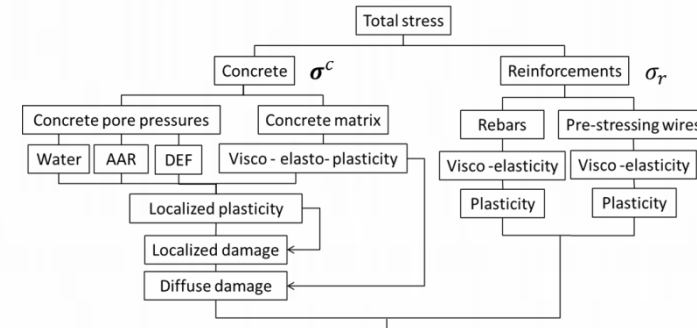
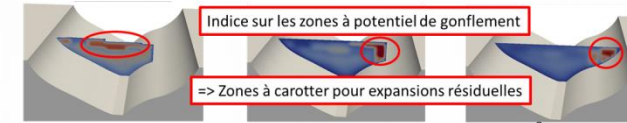
- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- Perspectives



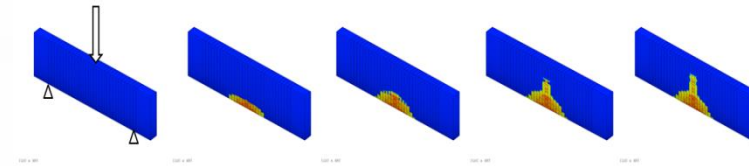
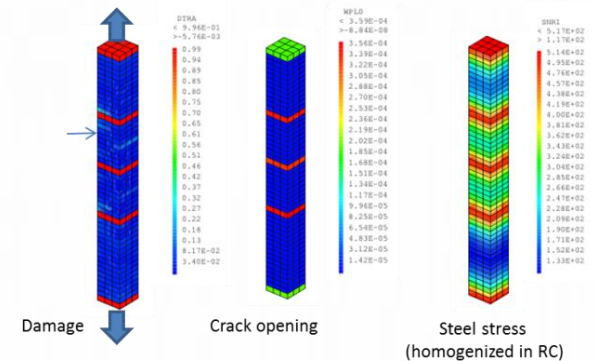
## Conclusions

- L'étude de la durabilité des ouvrages nécessite généralement la **simulation THM de leur vie entière** depuis leur construction, car plusieurs pathologies sont liés au mode de construction
- La dimension des ouvrages nécessite l'emploi d'un modèle de **béton réactifs armé homogénéisé**
- Le modèle béton doit être capable de distinguer la **fissuration diffuse et la fissuration localisée**, il peut s'appuyer pour cela du des critères combinant poro et micro mécaniques
- Sur le long terme, le **fluage** et les réactions chimiques internes conduisent à des déformation du même ordre, le modèle de fluage doit être précis et intégré dans le cadre poro-mécanique





- Le glissement acier béton doit être considéré, il est désormais possible de considérer des glissements « hors VER » grâce à une formulation EF originale i.e. « **champs de phases** » des armatures réparties
- Les effets d'échelle déterministe et probabiliste doivent être combinés et traité de façon rapide, pour cela on peut recourir à un **couplage Hilerborgh-Weibull non local (WL2)**-> auto détermination de la résistance la plus probable de façon incrémentale grâce à une second **champ de phase d'une variable probabiliste**
- Les deux formulations (armatures répartie glissantes et WL2) sont **disponibles dans CASTEM**







- Sommaire

- **Contexte**

- Objectifs des modélisations éléments finis pour la gestion des ouvrages
- Effets structuraux des Réactions de Gonflement Interne
  - Réaction alcali-granulat (RAG)
  - Réaction Sulfatique interne (RSI)
- **1- Intérêt de l'approche poro-mécanique pour la modélisation des effets micro-mécaniques**
  - Principe du modèle de béton poreux armé homogénéisé
  - Distinction entre fissuration diffuse et fissuration localisée
  - Fluage de la matrice poreuse
- **2- Modélisation des armatures**
  - La relaxation des aciers de précontrainte
  - Champs de phases pour glissement acier béton en phase de fissuration localisée
- **3- Prise en compte des hétérogénéités du matériau aux grandes échelles**
  - Les effets de maillons faibles
  - Champ de phase pour l'effet d'échelle probabiliste tronqué
- **Application à une pile de pont atteinte de RSI**
- **Conclusions**
- **Perspectives**



## Perspectives

- **Améliorer la description de certains phénomènes physico-chimiques**
  - **Re-dissolution de l'ettringite secondaire sous contrainte** (financement en attente)
  - **Prise en compte d'un fluage non homogène au voisinage des granulats réactifs en RAG** (Thèse Engie de C Lacombe avec T Vidal)
  - **Dilatation, perte de section et perte d'adhérence due aux produits de corrosion des aciers avec la technique des aciers homogénéisés glissants** (financement en attente)
  - **Approche multi-échelle de la porosité pour améliorer le lien entre fluage et teneur en eau** (thèse de F Manzoni soutenance fin 2019)
- **Adapter les modèles poro-mécanique éléments finis à d'autres matériaux**
  - **Prise en compte du comportement rhéologique au jeune âge pour les matériaux imprimables** (stage M2 de Jule Lebec avec A Papon L Lacarriere et Rashid Hameed)
  - **Armatures réparties glissantes pour traiter les béton fibrés armés et les BFUP** (Sateg R Gontero avec T Vidal)
  - **Critère poro-micro-mécaniques mis au point pour les RAG RSI pour étudier les terres crues à matrice argileuse ainsi que les matériaux bio-sourcés** (Thèse encours de Maïa Laffineur avec Florent Vieux Champagne, et démarrage de la thèse de Elsa Anglade)



# Couplages chemo-mécaniques appliqués à la durabilité des ouvrages de génie civil



## Merci pour votre attention