



Analyse du fluage du béton par approches multi-échelles

Frédéric GRONDIN, Ahmed LOUKILI

Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)

UMR-CNRS 6183

Ecole Centrale de Nantes

AFGC, UNICEM, Paris, 5 novembre 2015

Problématiques structurelle et scientifique

□ Les constructions en béton coulées en place sont soumises à des charges élevées à un âge précoce. L'effet de ces charges, en particulier en terme de *déformations de fluage*, peut être très significatif



Structures souterraines en béton
(dû à la pression du sol)



Charge appliquée constante



Structures de
grande hauteur



Charge appliquée par étapes



Structures en béton armé ou
précontraint (dû au retrait empêché)



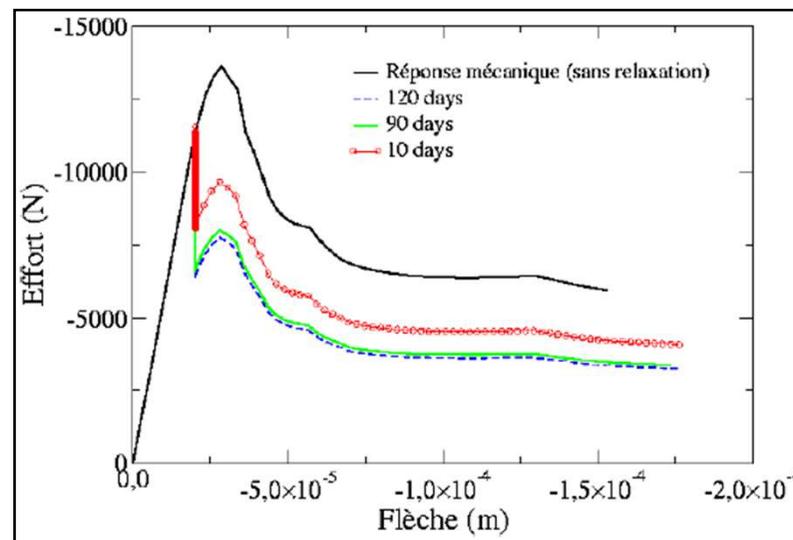
Charge appliquée évolutive

Le fluage est très complexe !!

- ☺ **Relaxation des contraintes** dues au retrait empêché lorsqu'il est en traction
- ☹ **Perte de la précontrainte** même s'il est linéaire
- ☹ **Tassements importants** dans les structures de grande hauteur (Palais de justice Saint-Denis Bouygues)
- ☹ **Effets négatifs** lorsqu'il est couplé à la **microfissuration** (couplage fluage-endommagement)

Problématiques structurelle et scientifique

Evaluer l'effet du fluage sur le comportement résiduel par des essais de rupture après fluage



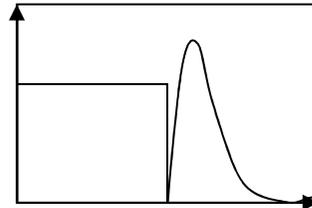
(Omar, Pijaudier-Cabot, & Loukili, 2004)

Objectifs

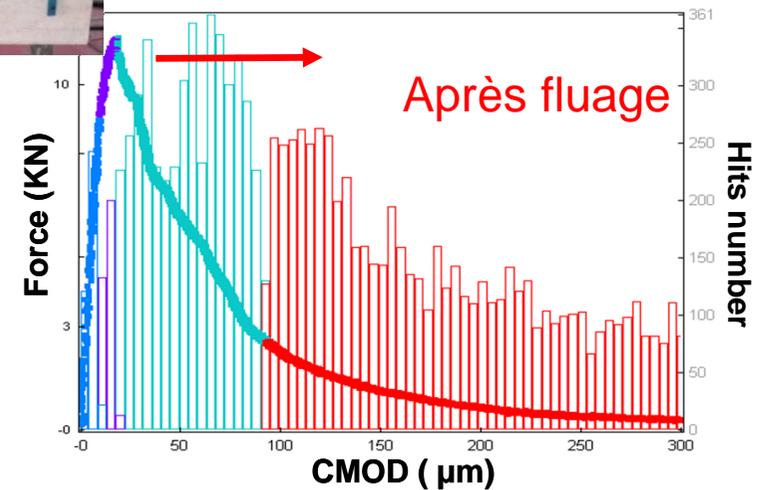
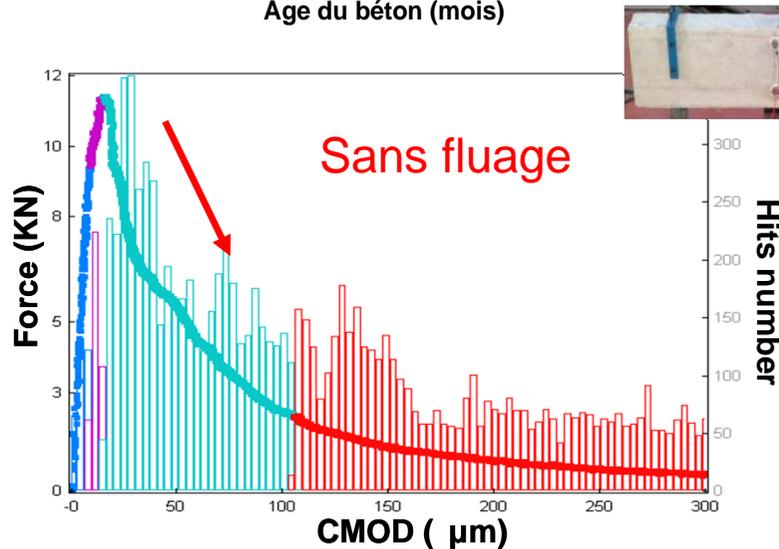
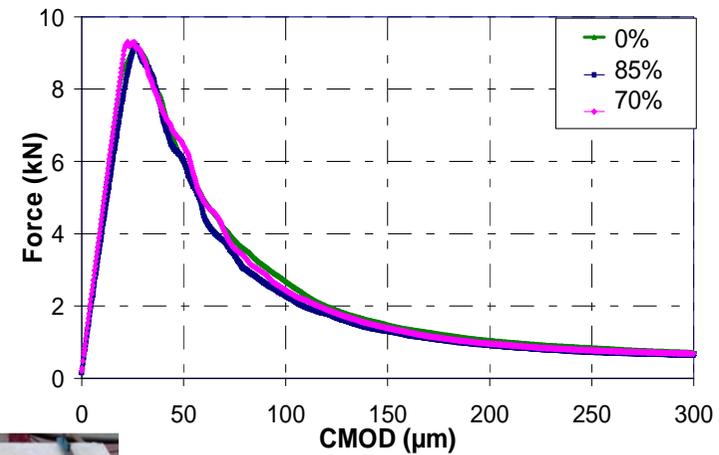
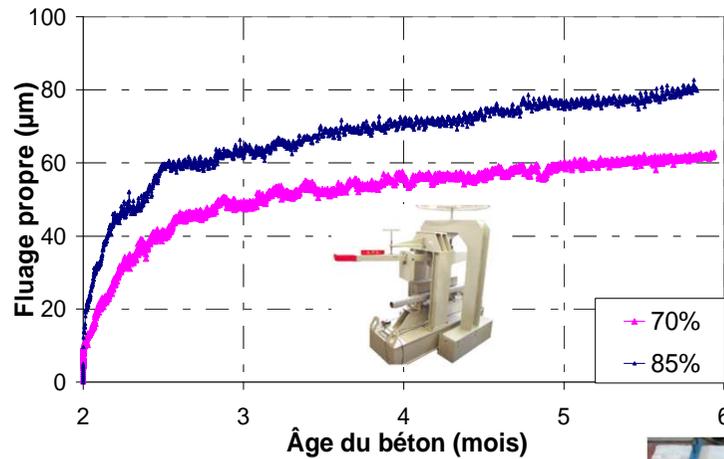
- Analyser expérimentalement ce qui a été montré numériquement
- Calculer les paramètres viscoélastiques macroscopiques à partir de ceux de la microstructure

Couplage fluage-endommagement

Essais de fluage puis de fissuration



Saliba, Loukili, Grondin, Regoin, *Mater Struct*, 2012



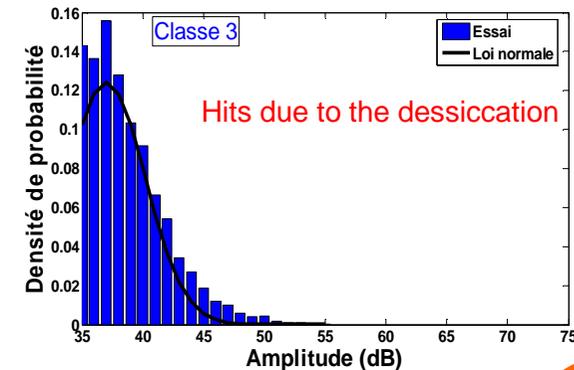
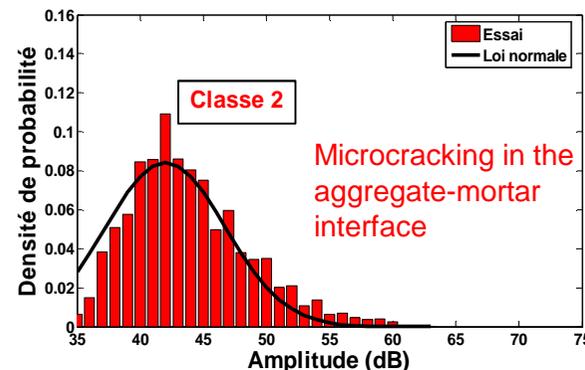
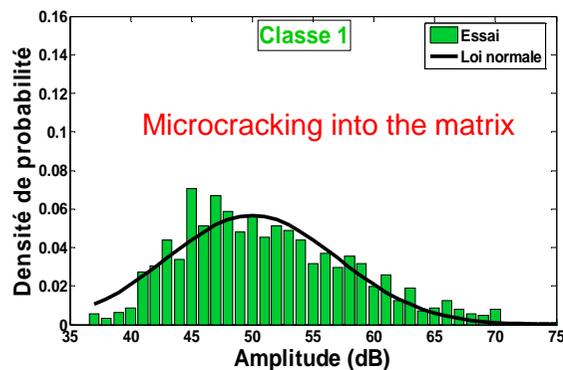
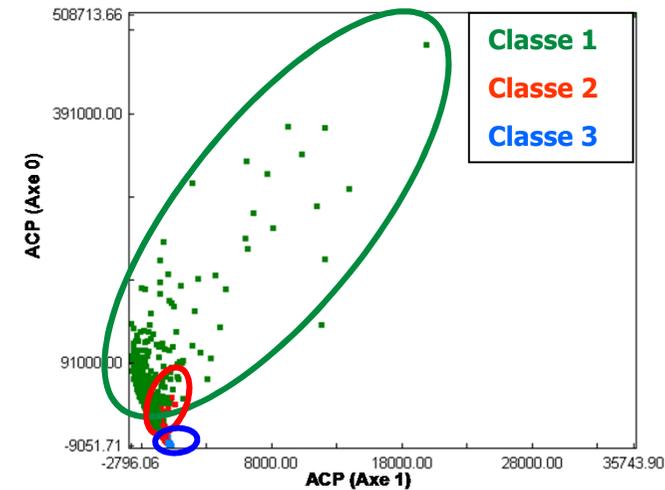
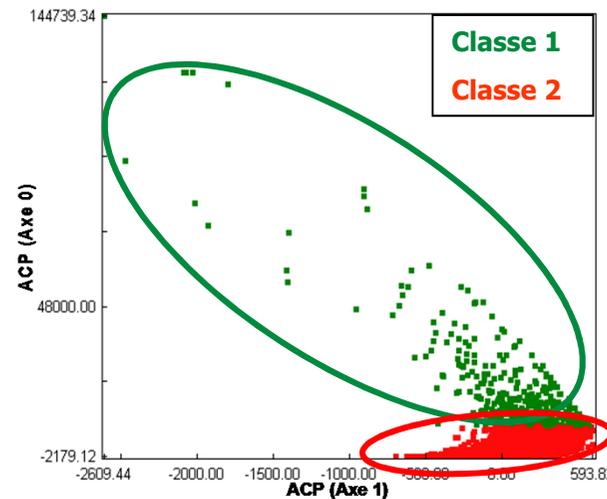
Couplage fluage-endommagement

Traitement de la signature acoustique des évènements

Saliba, Loukili, Grondin, Regoin, *Mater Struct*, 2014



Analyse par Composantes Principales par la méthode K-moyenne



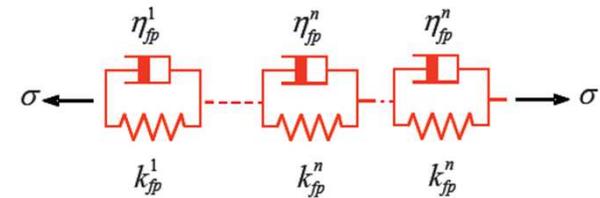
Couplage fluage-endommagement

Modélisation du béton hétérogène

➤ Couplage entre visco-élasticité et endommagement $\underline{\underline{\sigma}}(\underline{y}) = \underline{\underline{C}}(\underline{y}, \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{y})) : (\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{y}) - \underline{\underline{\varepsilon}}^{fp}(\underline{y}))$

➤ Modèle de Kelvin-Voigt (3 chaînes)

$$\eta_{fp}^i \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{fp}^i(t) + k_{fp}^i \underline{\underline{\varepsilon}}_{fp}^i(t) = \underline{\underline{\tilde{\sigma}}}(t)$$



➤ Evolution de l'endommagement

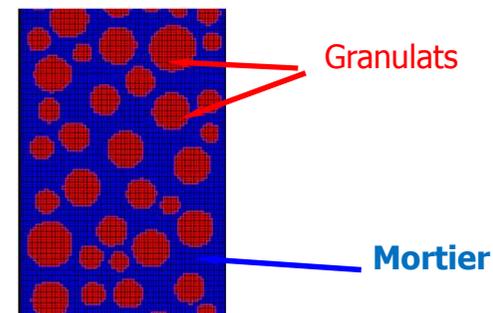
$$d = 1 - \frac{\underline{\underline{\varepsilon}}_{d0}}{\underline{\underline{\varepsilon}}_{eq}} \exp\left[B_t (\underline{\underline{\varepsilon}}_{d0} - \underline{\underline{\varepsilon}}_{eq}) \right]$$

[Mazzotti et Savoia, 2003]

$$\text{avec } \underline{\underline{\varepsilon}}_{eq} = \sqrt{\langle \underline{\underline{\varepsilon}}^e \rangle_+ : \langle \underline{\underline{\varepsilon}}^e \rangle_+ + \beta \langle \underline{\underline{\varepsilon}}^v \rangle_+ : \langle \underline{\underline{\varepsilon}}^v \rangle_+}$$



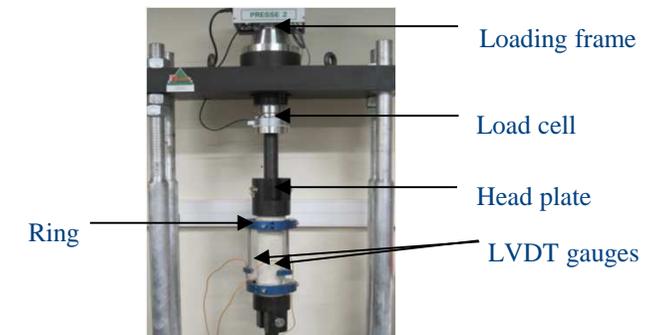
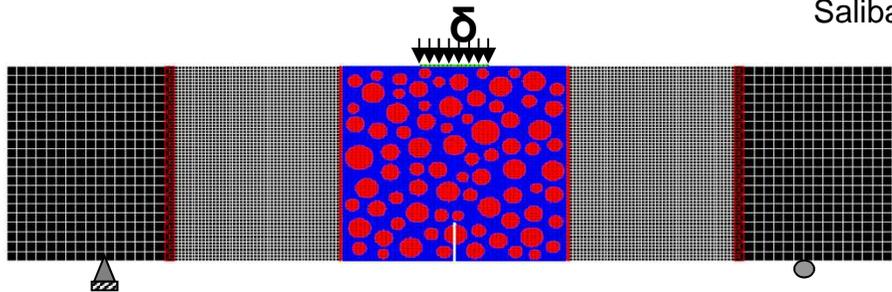
$$\underline{\underline{\varepsilon}}_{eq} = \sqrt{\langle \underline{\underline{\varepsilon}}^e \rangle_+ : \langle \underline{\underline{\varepsilon}}^e \rangle_+} \quad [\text{Saliba et al., 2013}]$$



Couplage fluage-endommagement

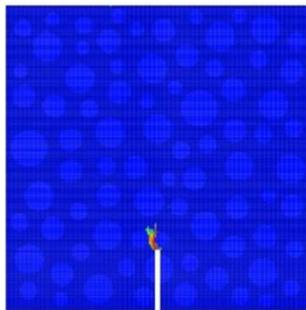
Modélisation des essais de fluage et de fissuration

Saliba, Grondin, Matallah, Loukili, Boussa, *Mech Time Depend Mat*, 2013

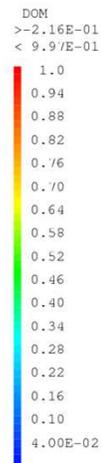
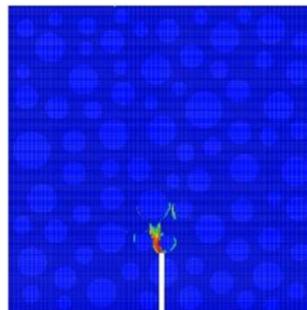


Après fluage

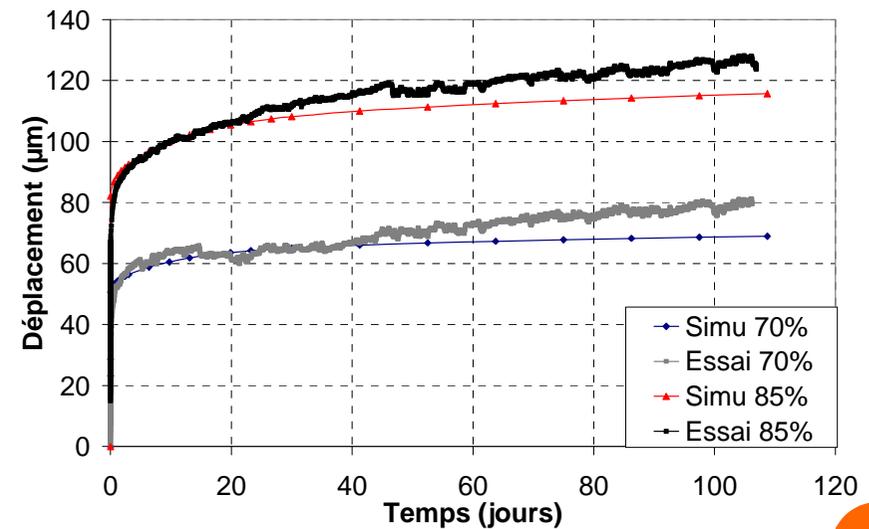
70%



85%



Endommagement autour des granulats !
Fragilité du mortier (matrice cimentaire)



Travaux antérieurs sur le fluage au jeune âge

Etude du fluage du béton **mature** (compression, traction, flexion) (Ghosh 1974, Bazant et al.,88; Bissonnette et al.,95; Sanahuja et al., 09; Omar, 04; Reviron, 09; Saliba, 2012, etc)

Etude du fluage du béton **jeune**
✓ En compression: (Delahaie, 97; Jiang et al., 14, etc)
✓ En traction: (Atrushi, 03; Østergaard et al., 01; Briffaut, 10, etc)

Absence de travaux sur le **fluage** en flexion des bétons **jeunes** !!!

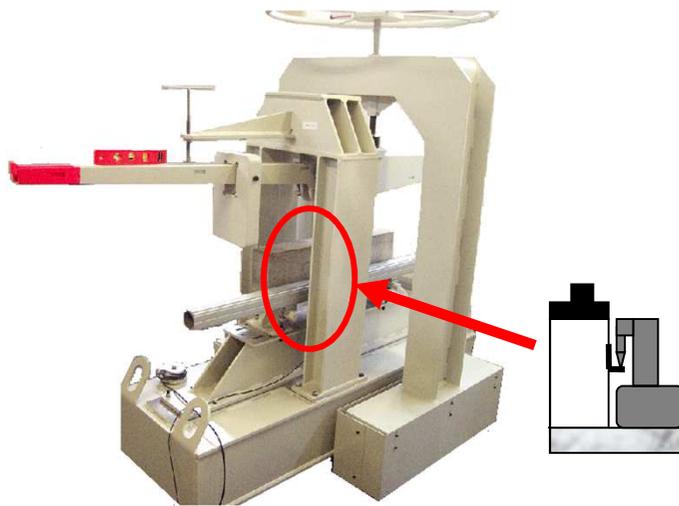
Avec des taux de chargement en fluage faibles (< 30 % de la résistance), le béton **mature** a un comportement viscoélastique linéaire. Mais qu'en est-il au **jeune âge** ?

Intérêt de l'étude

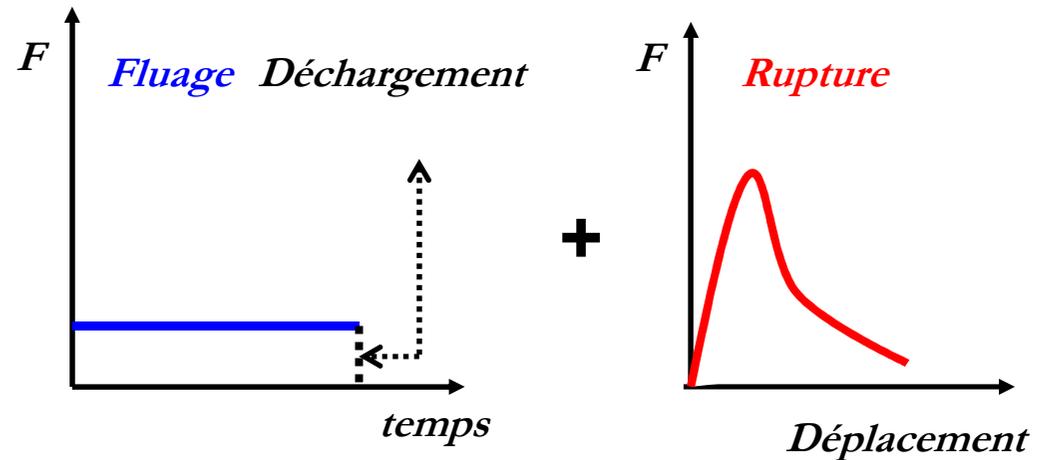
- Comprendre les mécanismes internes associés au couplage fluage-endommagement dans le cas d'un béton sollicité au jeune âge (les essais de fluage en flexion sont les plus convenables)



Nécessité d'un dispositif adapté



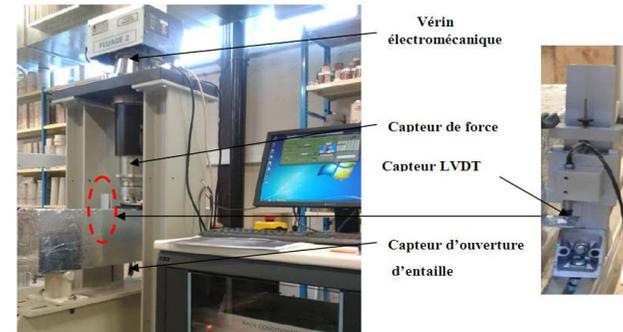
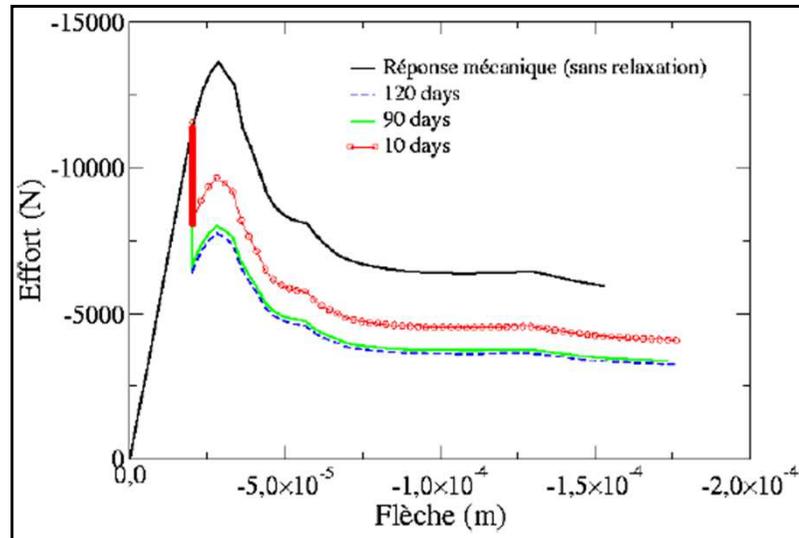
Ce bâti a été développé au GeM
(M. Omar, 2004)



Limites de ce bâti ??

- ☹ Essais de rupture (relaxation des contraintes + pas de mesure de l'ouverture de fissure)
- ☹ Seul mode de pilotage (pilotage en force)

Nouveau dispositif de fluage et rupture



Avantages

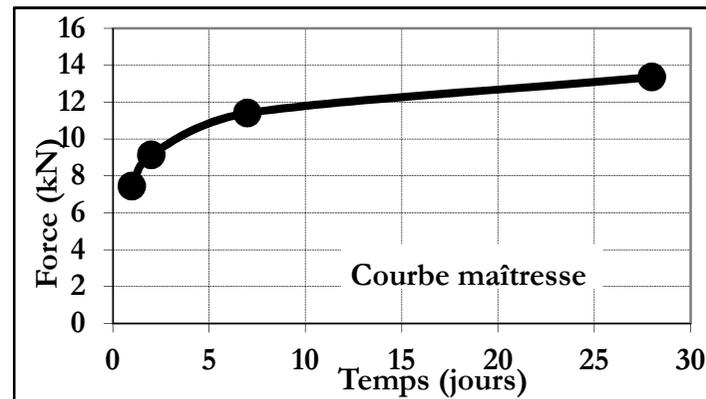
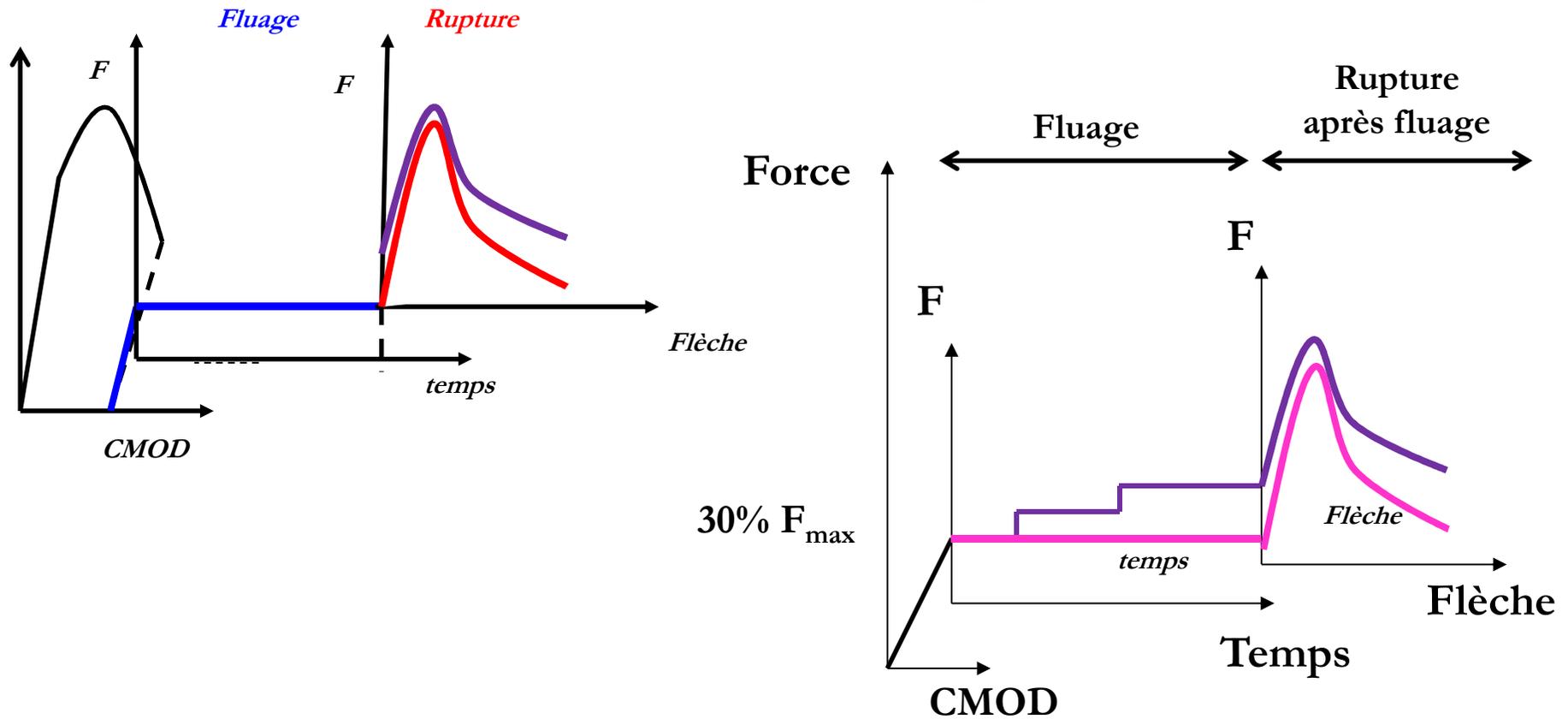
Double fonction



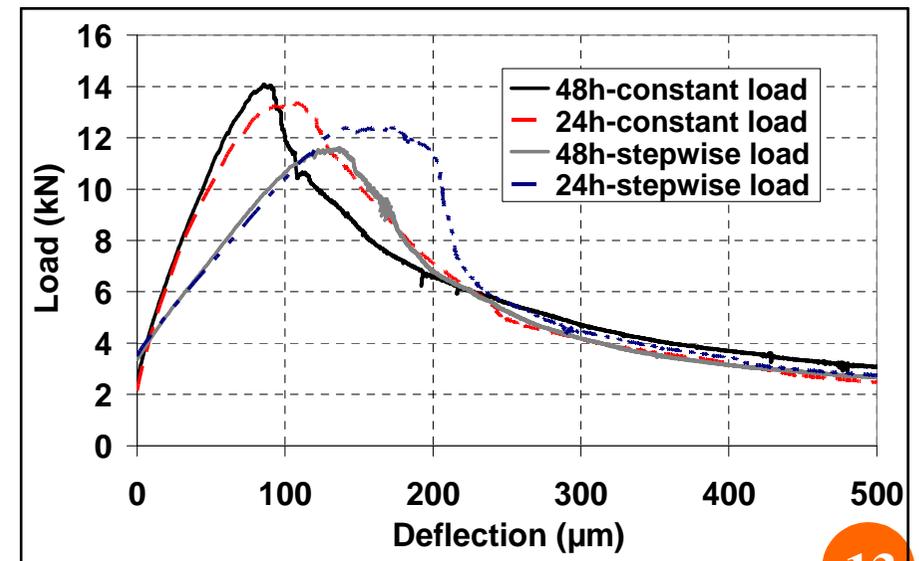
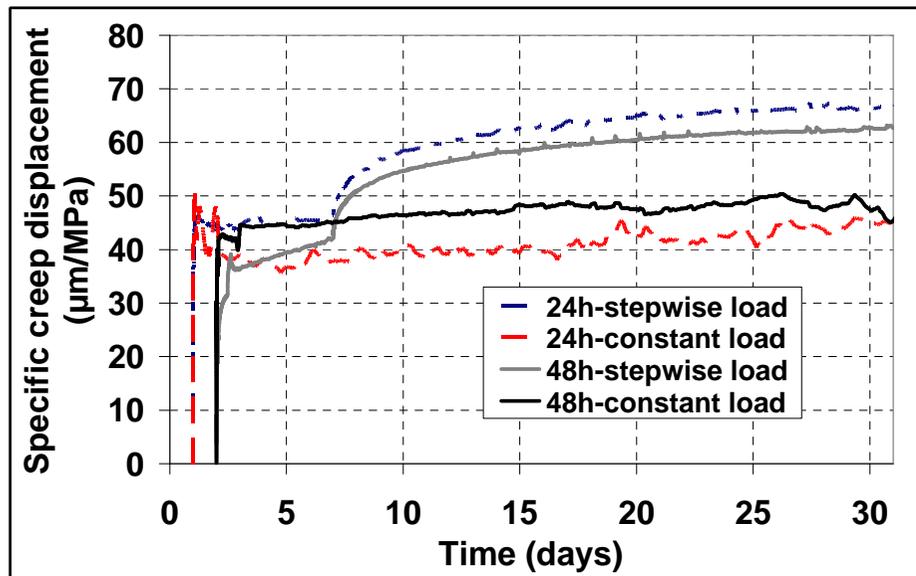
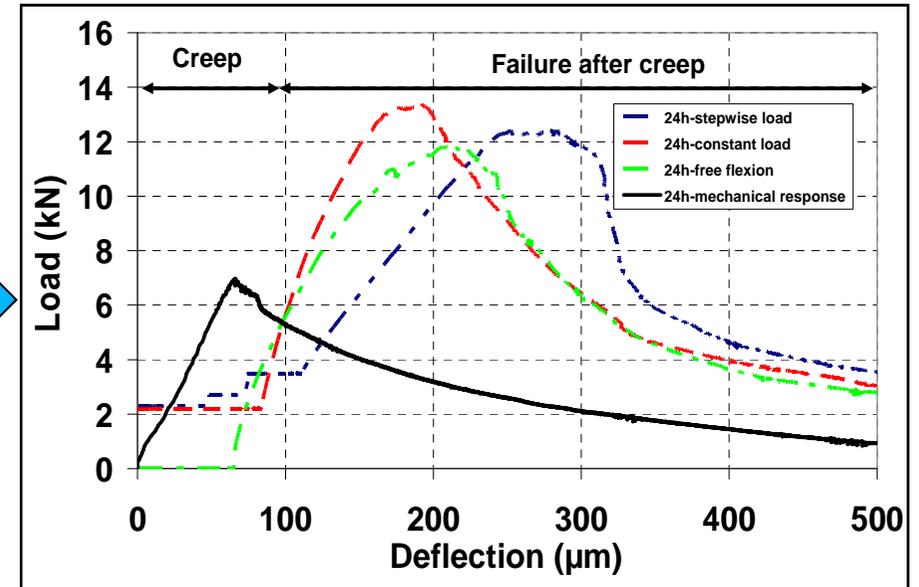
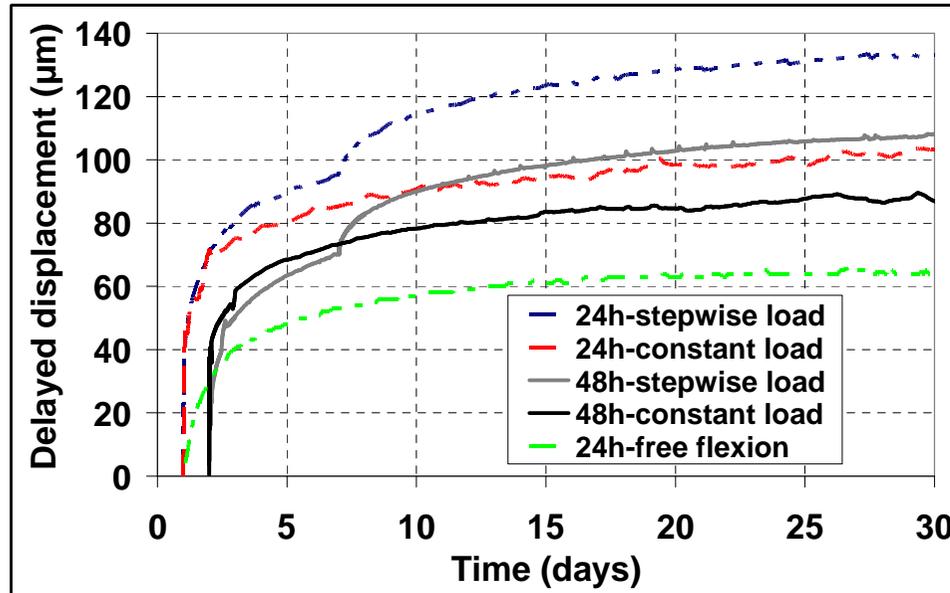
- ❑ Essais de rupture en flexion 3 points
- ❑ Essais de fluage en flexion 3 points

- ☺ Essais de rupture (pas de relaxation de contraintes + mesure de l'ouverture de fissure)
- ☺ Deux modes de pilotage (pilotage en ouverture d'entaille et pilotage en force)
- ☺ Essais de fluage sur des poutres *pré-endommagées*

Nouveau dispositif de fluage et rupture



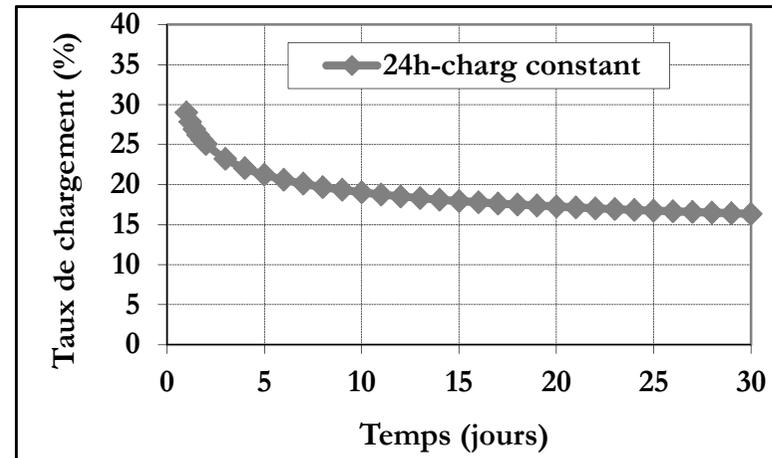
Résultats des essais de fluage



Résultats des essais de fluage

1) Chargement constant

Le matériau ne semble pas s'endommager sous le chargement constant



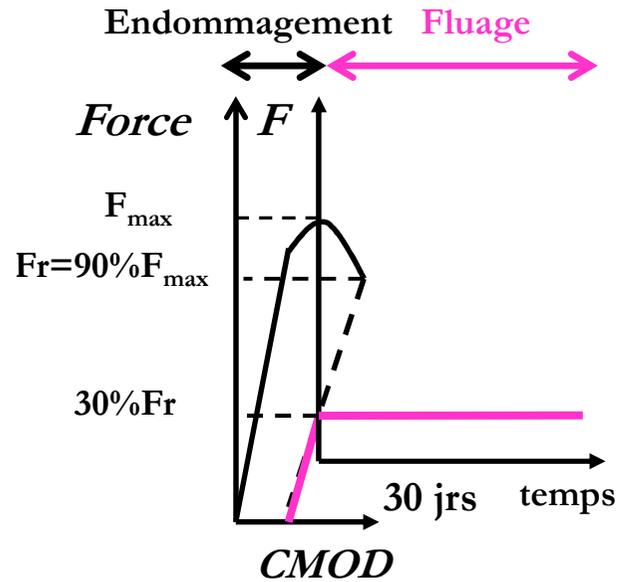
Taux de chargement = Force appliquée / Résistance

2) Chargement en palier

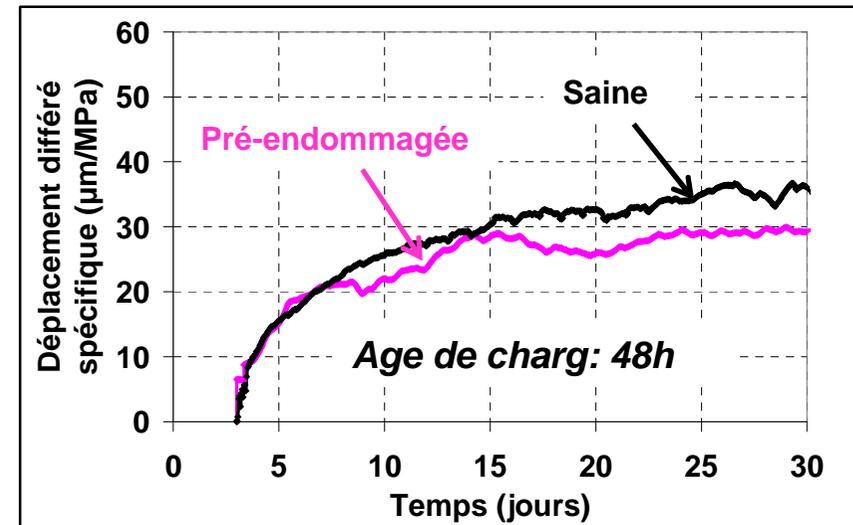
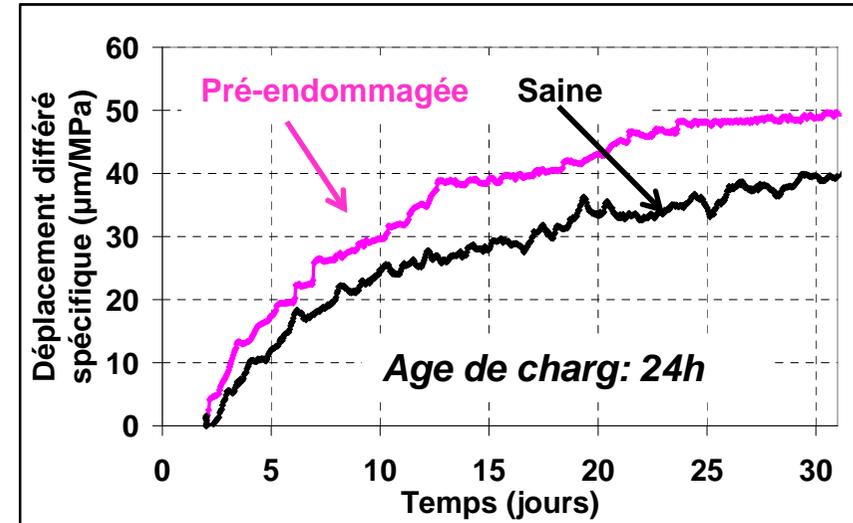
Le chargement en palier contribue plus à la perte de la rigidité avec une faible diminution de la résistance en flexion

➔ Ouverture de fissure ?

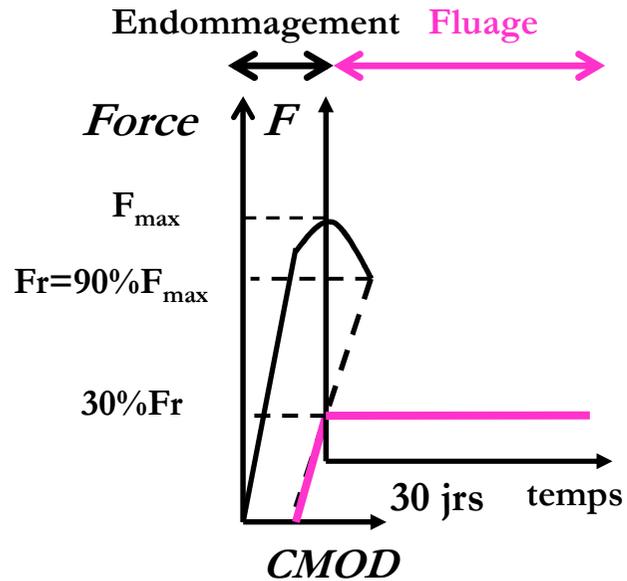
Effet d'une fissure initiale sur le fluage et la rupture



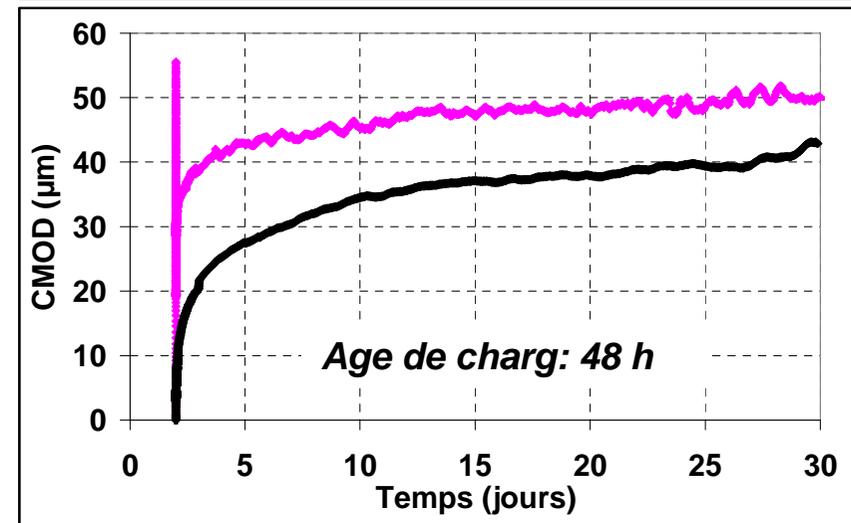
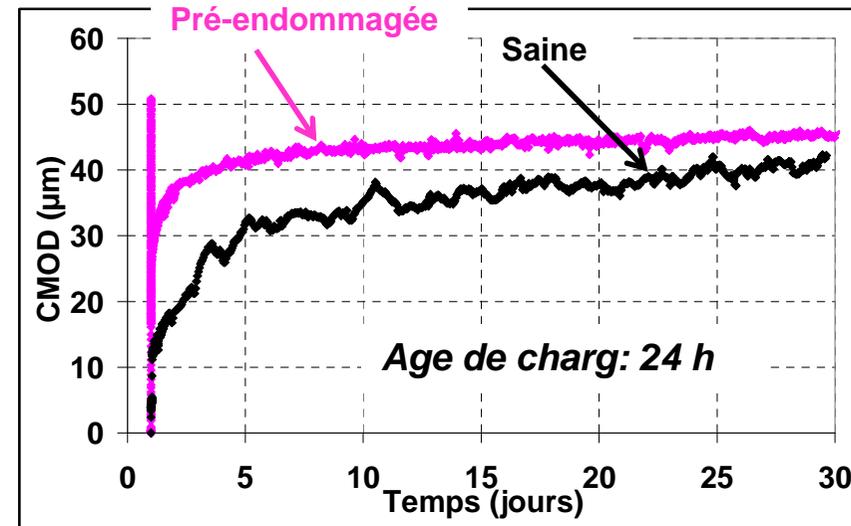
Ecart faible entre les poutres saines et pré-endommagées



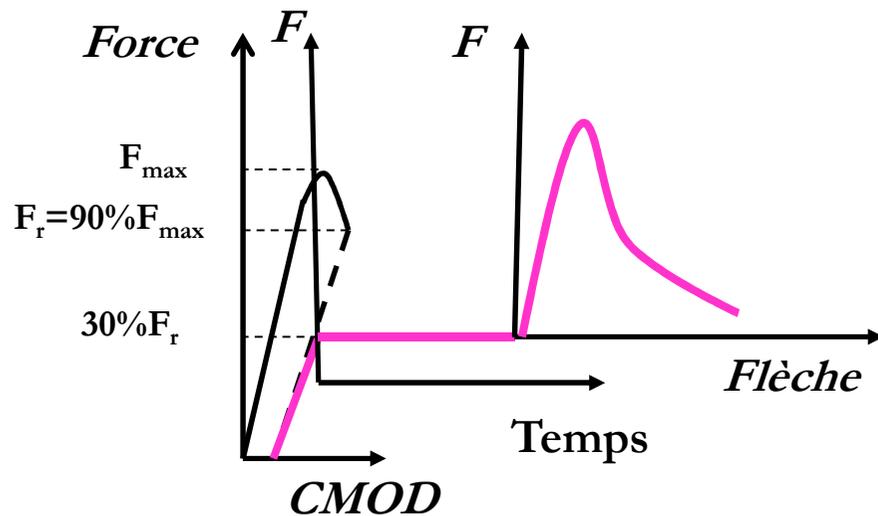
Effet d'une fissure initiale sur le fluage et la rupture



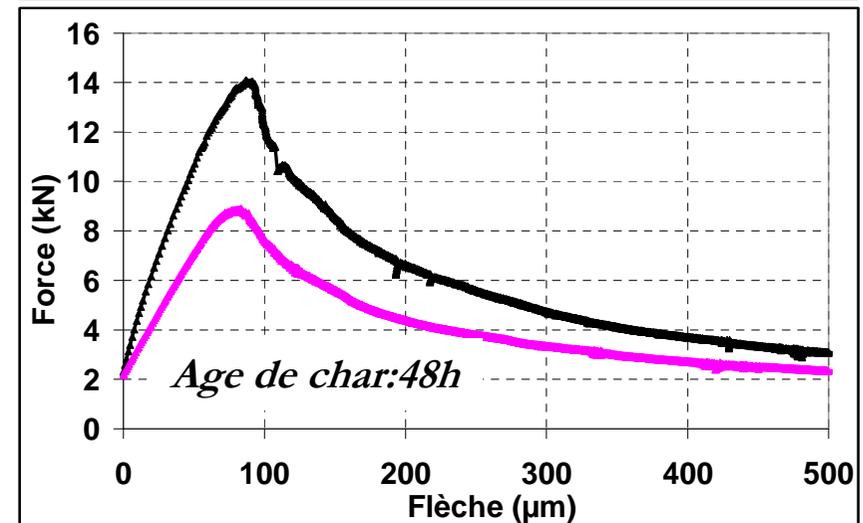
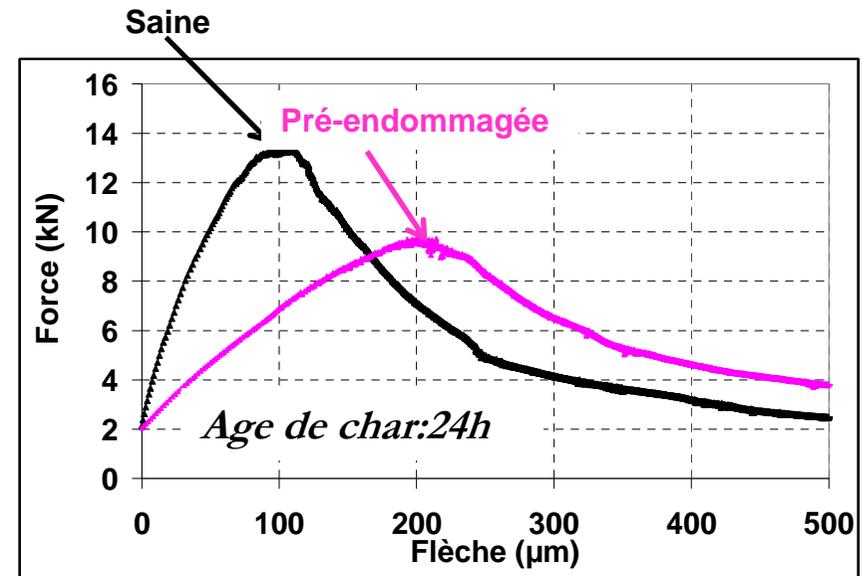
Pendant le fluage des poutres pré-endommagées, il y a réouverture de la fissure initiale sans création de nouvelles macro-fissures en pointe de l'entaille



Comparaison des comportements résiduels des poutres saines et pré-endommagées



Perte significative de la rigidité et de la résistance résiduelle des poutres pré-endommagées



Bilan

➤ **Caractérisation du comportement différé**

- Amplitude du déplacement spécifique augmente avec le taux de chargement (cas du chargement en palier)
- Le déplacement spécifique augmente avec la densité initiale des microfissures

➤ **Caractérisation du comportement mécanique après fluage**

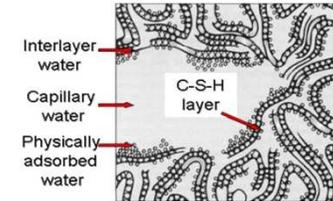
- **Poutres saines avec chargement constant**
 - Effet négligeable du fluage sur le comportement mécanique du matériau
- **Poutres saines avec chargement en palier**
 - Perte de rigidité avec une faible diminution de la résistance en flexion
- **Poutres pré-endommagées avec un chargement constant**
 - Perte de la rigidité avec une diminution importante de la résistance en flexion

➤ **Nécessité d'avoir un modèle pour comprendre les micromécanismes internes**

Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Modèle micro-macro

□ **Théorie de solidification (Bazant 1977) adoptée au jeune âge :**
Le fluage au jeune âge est principalement dû à la déformation des CSH augmentant avec l'âge, gênée par la présence des autres constituants du béton



Etape 1: Approche inverse pour déterminer les paramètres viscoélastiques «caractéristiques» des CSH

Béton

$$\langle \bar{\varepsilon}^v(t, \bar{y}) \rangle_V = \bar{J}^{\text{hom}}(t) : \langle \bar{\sigma}(t, \bar{y}) \rangle_V$$

(Ricaud et Masson, 2009)

$$k_{car}^i = \frac{3.A(f_p).k_{fp}^i}{4}$$

Residual clinkers $V_X(t) = V_{C0} f_X (1 - \xi_X(t))$

Residual water $V_E(t) = V_{E0} - \sum V_E^X \xi_X(t)$ avec $V_E^X = V_{C0} \frac{n_E \rho_C f_X / \mathcal{M}_X}{n_X \rho_E / \mathcal{M}_E}$

Hydrates $V_i^P(t) = \sum_{j=1}^n C_i^j \xi_j(t)$ avec $C_i^j = V_{C0} \frac{n_i^R \rho_C f_j / \mathcal{M}_j}{n_j^P \rho_i / \mathcal{M}_i}$

Gypsum $V_{gyp}(t) = V_{C0} \cdot f_{gyp} (1 - \beta \cdot (3\xi_{C_3A}(t) - 3\xi_{C_4AF}(t)))$

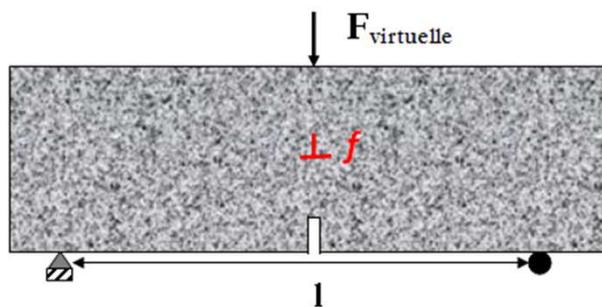
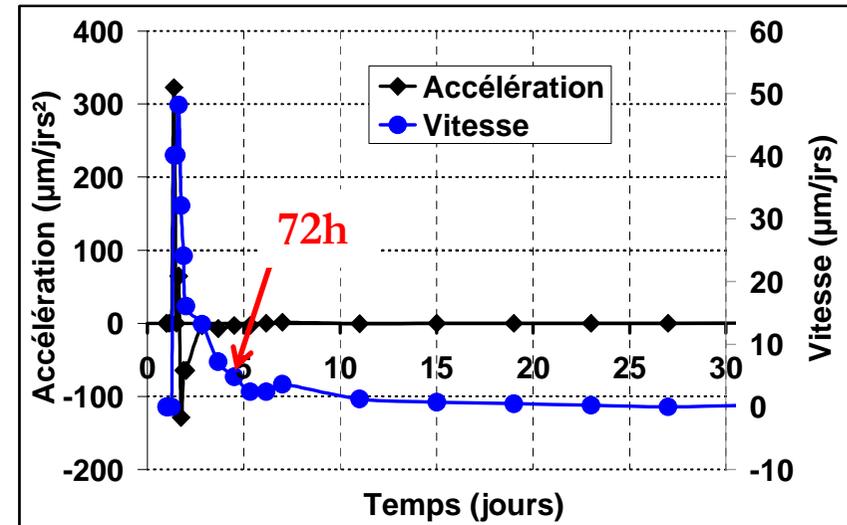
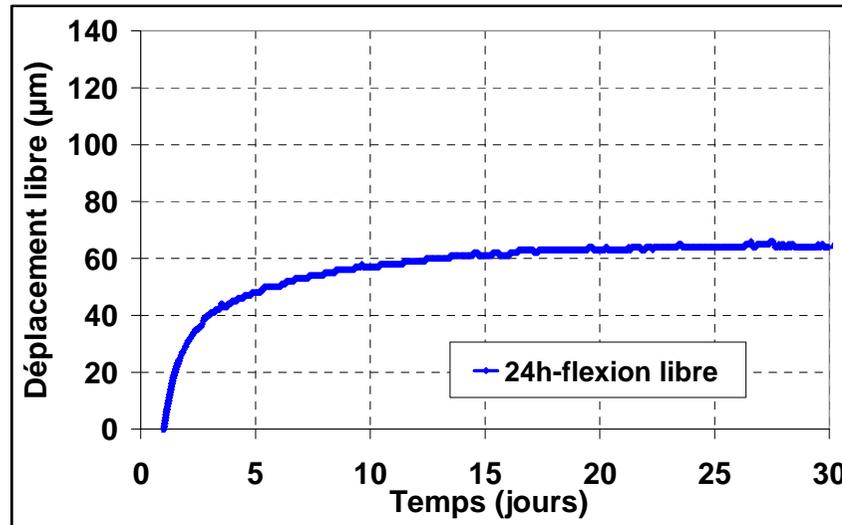
Ettringite $V_{ett}(t) = V_{ett}(t_g) (1 - 0.5\xi_{C_3A}(t) - 0.5\xi_{C_4AF}(t))$

Etape 2: Etude de l'influence de l'âge et donc de l'évolution de la porosité sur le fluage du béton

Etape 3: Exploitation du modèle pour l'analyse du fluage en flexion au jeune âge

Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

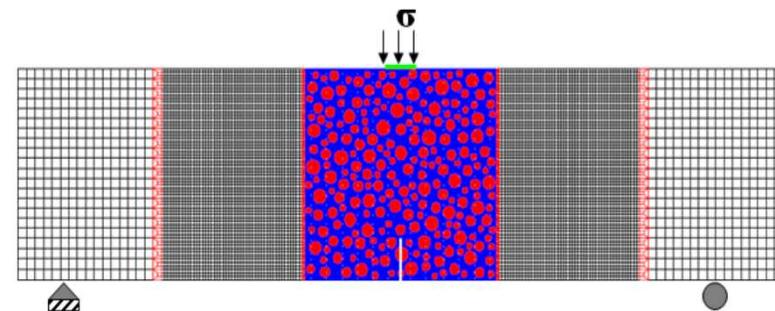
Effet de la déformation libre sous poids propre ?



$$F_{virtuelle} = \frac{48EIf}{l^3}$$

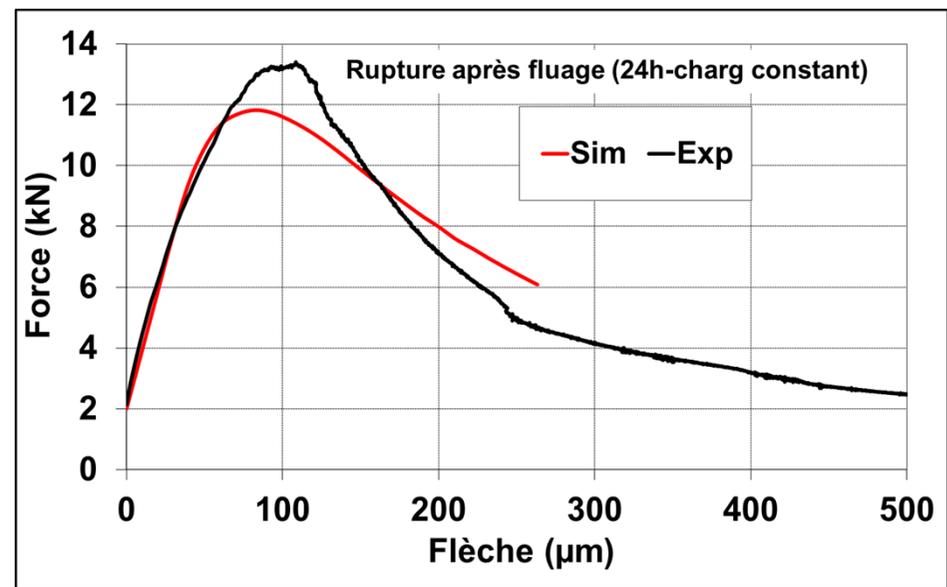
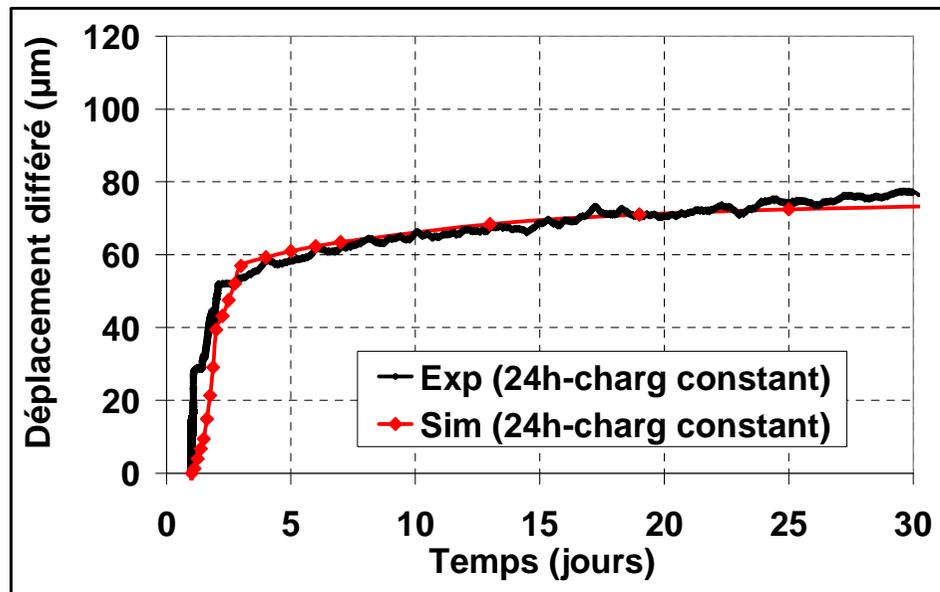
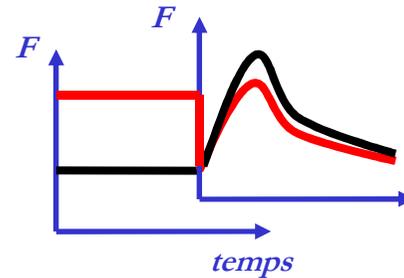
□ La simulation de la déformation différée nécessite la prise en compte d'une force complémentaire :

Force totale = force appliquée + force complémentaire



Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Première comparaison modèle-exp. : 24h force constante

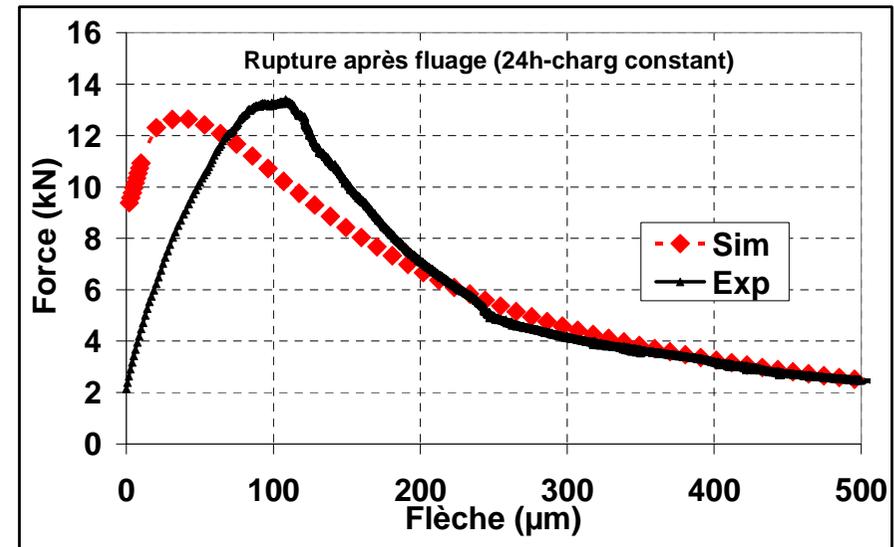
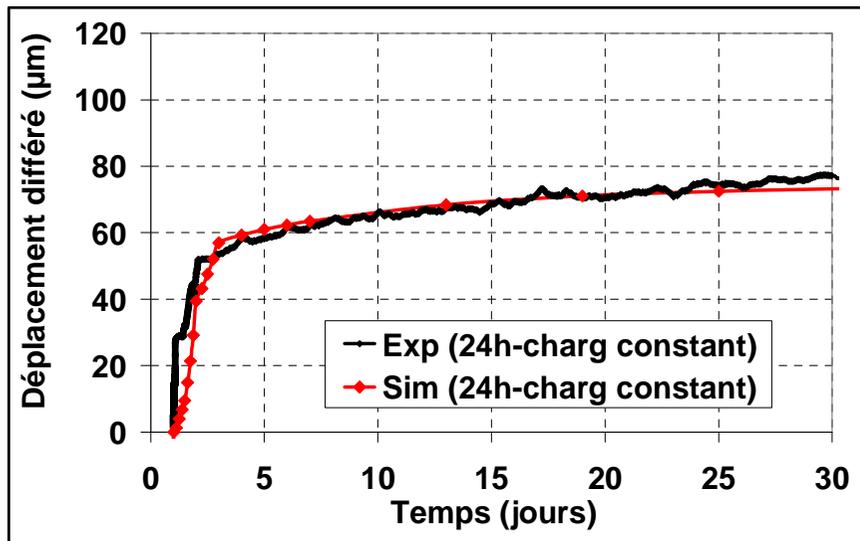
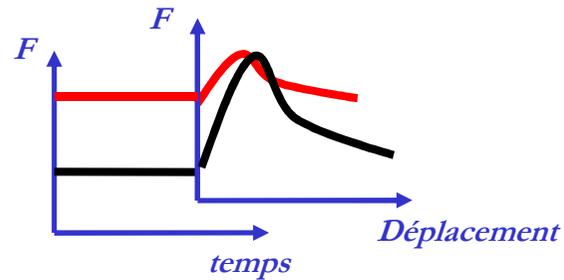


Force complémentaire ~ 7 kN !!!

La simulation du déchargement après fluage entraîne un relâchement des contraintes mais maintient un taux d'endommagement égal à celui généré durant le fluage

Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Force constante

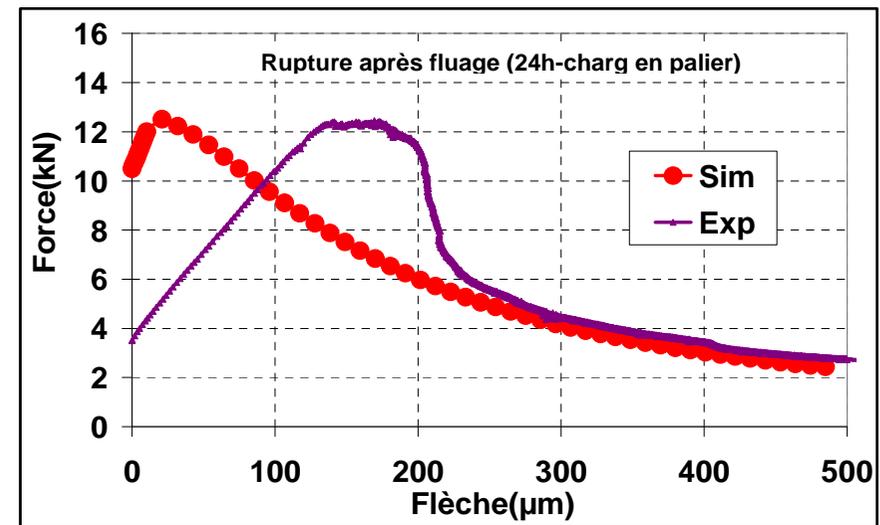
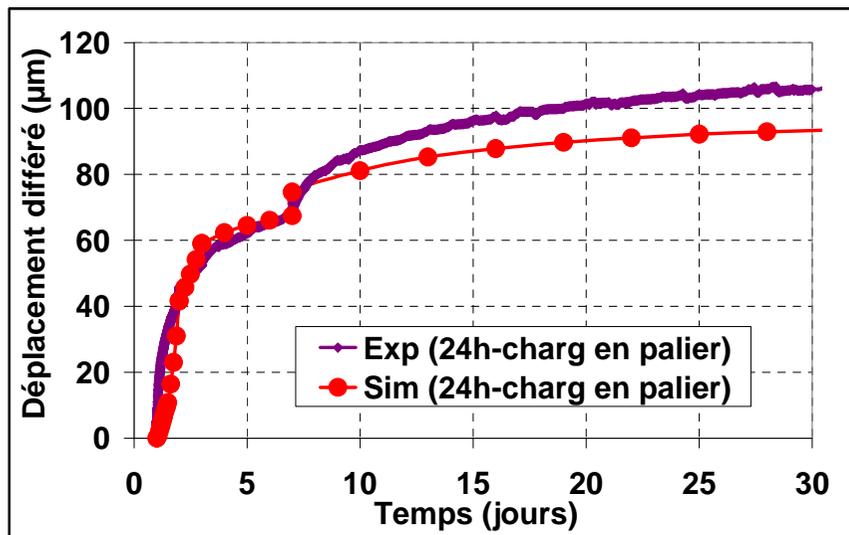
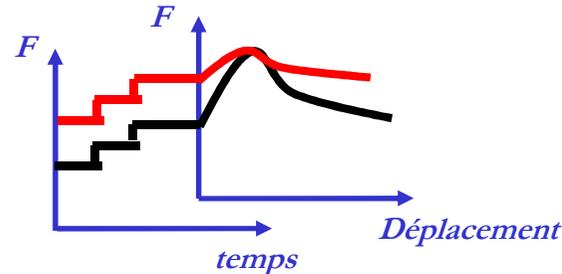


$$\frac{\left(\frac{\Delta F_{28cs}}{\Delta f_{28cs}}\right)}{\left(\frac{\Delta F_{28ce}}{\Delta f_{28ce}}\right)} = \frac{\left(\frac{48E_{28cs}I}{l}\right)}{\left(\frac{48E_{28ce}I}{l}\right)} = \frac{E_{28cs}}{E_{28ce}} = \frac{0.2}{0.23} = 0.87 \quad \Rightarrow \quad E_{28cs} = 0.87 E_{28ce} = (1 - \Delta d_{28cs}) E_{28ce}$$

$$\Delta d_{28cs} = 0.13$$

Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Force évolutive



$$\frac{\Delta F_{28ps}}{\Delta f_{28ps}} = 0.15 \quad E_{28ce} \Rightarrow \Delta d_{28ps} = 0.35$$

$$\frac{\Delta F_{28pe}}{\Delta f_{28pe}} = 0.08 \quad E_{28ce} \Rightarrow \Delta d_{28pe} = 0.65$$

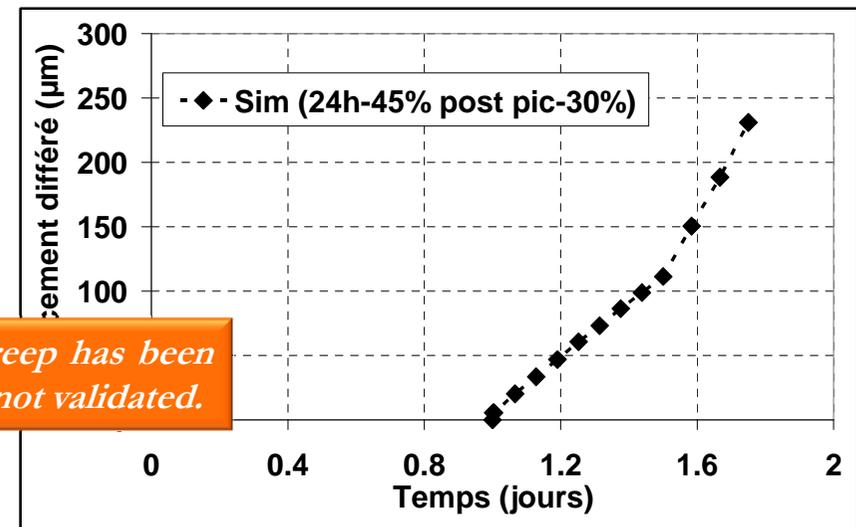
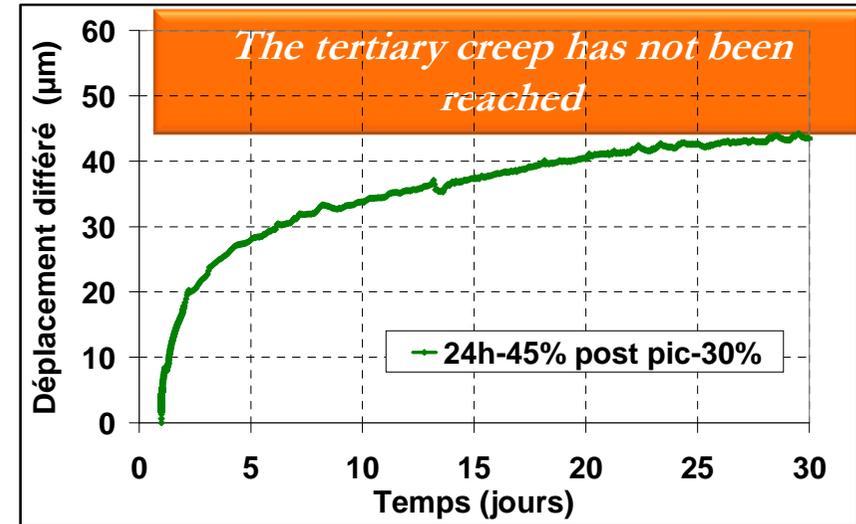
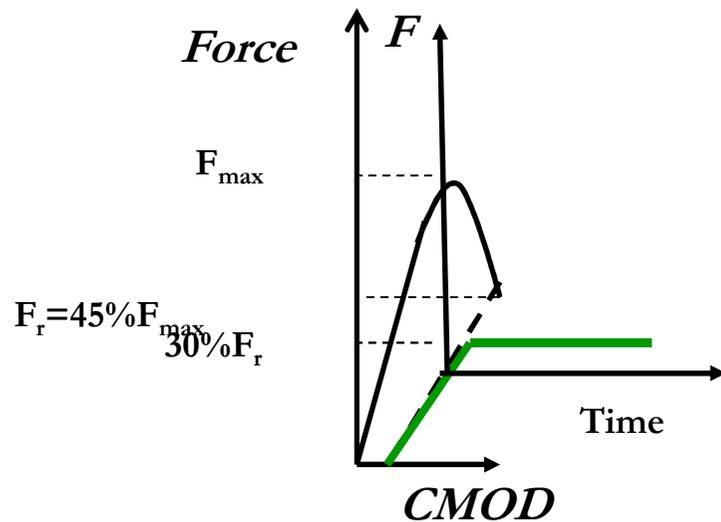
Comment expliqué cette différence ?

- Hypothèse 1 : l'endommagement est sous-estimé par le modèle.
- Hypothèse 2 : un endommagement est créé par la mise en charge dans l'expérience qui est accentué par les rechargements lors des paliers.

Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Hypothèse 1 : sous-estimation de l'endommagement ?

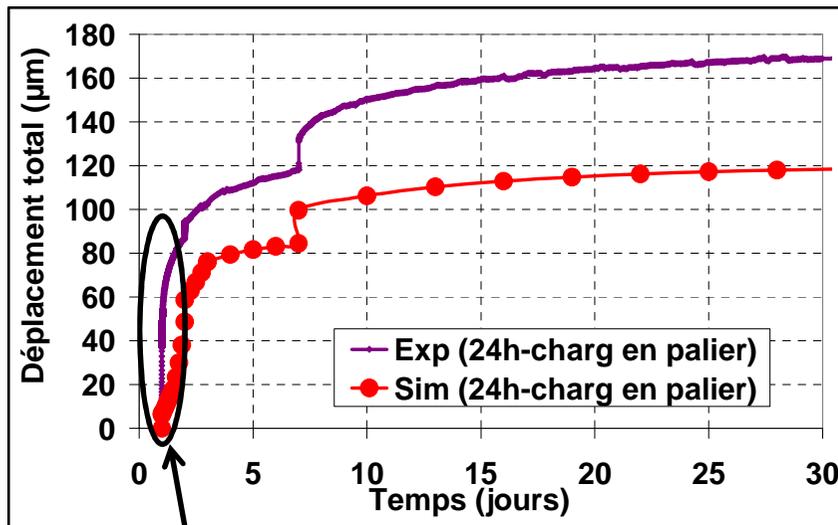
Essais de fluage sur poutres pré-endommagées (24h-45% post-pic)



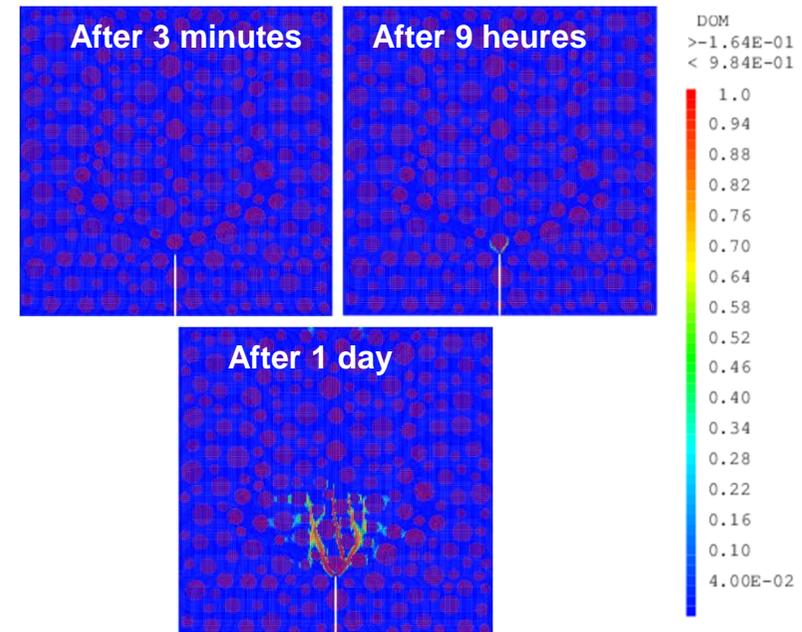
Modèle multi-échelles viscoélastique des matériaux durcissants

Hypothèse 2 : un endommagement est provoqué par la mise en charge dans l'expérience ?

Comparaison des déplacements expérimentaux et calculés au moment de la mise en charge



La part élastique dans l'expérience est plus importante que dans la simulation

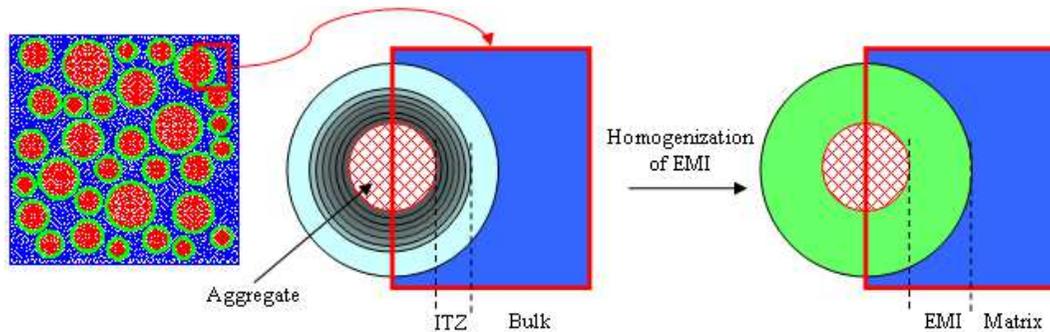


Conclusions

- Multiscale models have been developed to analyze the micromechanisms into concrete during creep
- The creep-damage coupling has showed that damage occur in mortar due to the interaction with aggregates in mature concrete
- The creep of concrete at early ages depends on the porosity volume and on the CSH volume
- The difficulty to compare the creep model to experiments at early ages is due to the experimental loading method which leads cracking

Perspectives

- The multiscale model will be improved by introducing the ITZ



Grondin, Matallah, Cement Concrete Res, 2014

- The experimental method for creep at early ages will be improved by modifying the loading method
- The damage model will be modified in order to be more significant at microscale

MERCI