



CEOS.fr

Modélisation du comportement Thermo-Hydro-Mécanique

A.Sellier

04/06/2015



Liberté • Égalité • Fraternité
REPUBLIQUE FRANÇAISE



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



- ▶ Intégration des phénomènes importants dans les modèles
 - Mise au point d'une méthode pour prendre en compte la dépendance de R_t au volume sollicité
 - Perfectionnement d'autres aspects des modèles numériques
 - Dépendance du fluage à T et H
 - Formulation incrémentale du fluage
 - Auto réparation des fissures au très jeune âge
 - Retrait au très jeune âge (Mefisto)
 - Dépendance adhérence acier béton à l'hydratation
- ▶ Validation des modèles numériques sur les RG
 - Simulation des RG8-9-10
- ▶ Utilisation des modèles pour des études paramétriques
 - Simulation de structures avec des CL « bien maîtrisées »
 - Extension de la base de données expérimentales par les simulations numériques
 - RG8-9-10 re-simulé avec des CL identiques (thermiques notamment)
 - RG11 (faiblement armé et enrobage de 50mm) cas non envisagé lors des essais réels

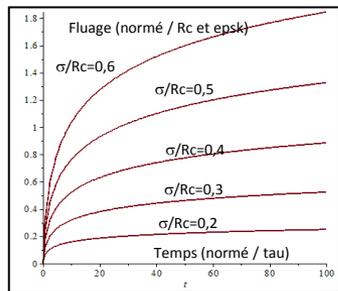
Modèle Thermo-Hydro-Chemo-Mécanique (THCM) du béton

Modèle d'hydratation multiphasique

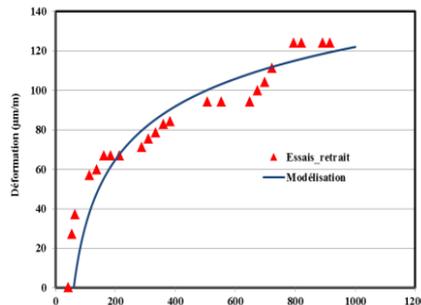
- Bilan d'énergie thermique
- Bilan de masse d'eau

Modèle de comportement poro-mécanique non saturé du béton

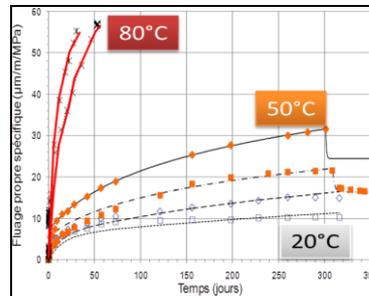
- Fluage THM
 - Non linéaire sous forte contrainte
 - T-H dépendant
- Influence de l'hydratation
 - Formulation incrémentale
 - Dépendance des paramètres mécaniques à l'hydratation



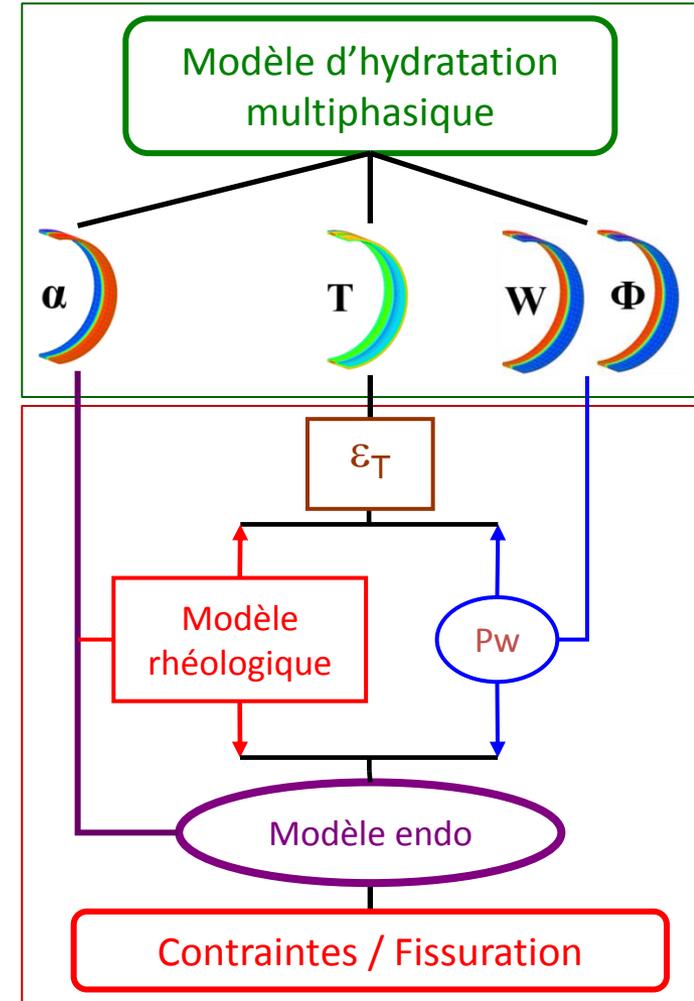
Fluage non linéaire



Retrait et fluage jeune âge



Couplage température/fluage



Principaux couplage considérés dans les modèles THCM du béton

Modèle d'Hydratation multiphasique

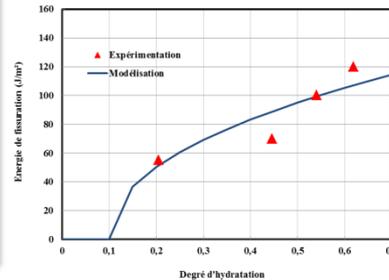
- Bilan d'énergie thermique
 - Thermo activation des réactions d'hydratation
- Bilan de masse d'eau
 - Hydro dépendance des réactions d'hydratation

Modèle de comportement poro-mécanique non saturé du béton

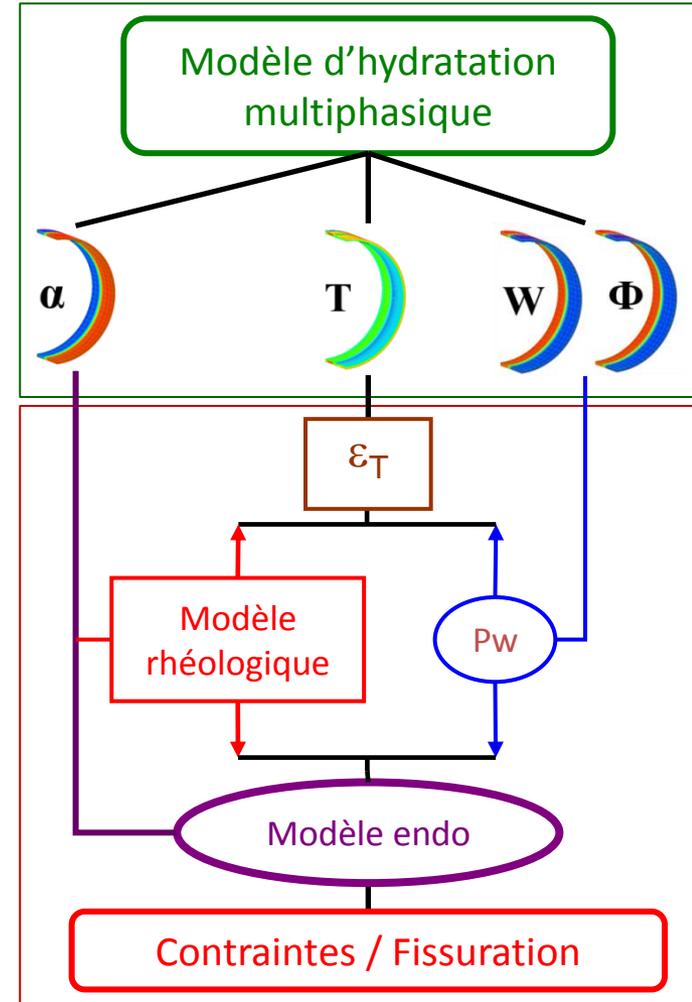
- Formulation incrémentale de la loi de comportement
- Fluage propre multi axial non linéaire thermo et hydro activé
- Retrait par dépression capillaire
- Endommagement

Couplages considérés

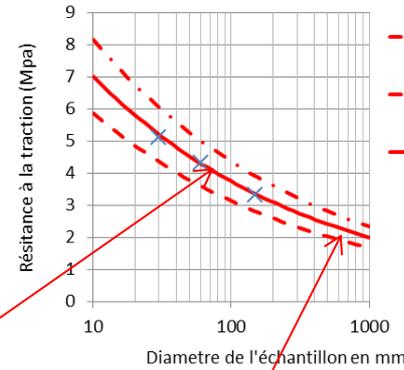
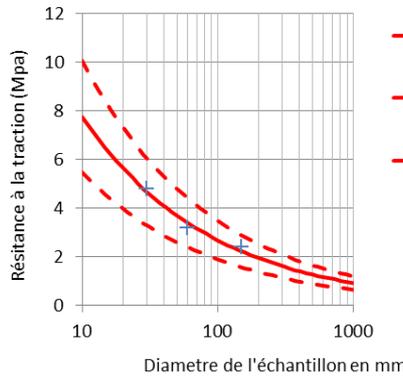
- Hydratation / fluage
- Température / fluage
- Hydratation / endommagement
- Température / endommagement
- R_t / volume sollicité (effet d'échelle)



Energie de fissuration jeune âge

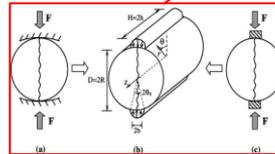


- Dépendance de R_t au volume sollicité (effet d'échelle)



Loi de changement d'échelle de Weibull

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



Volume de référence Split test



Volume sollicité RG

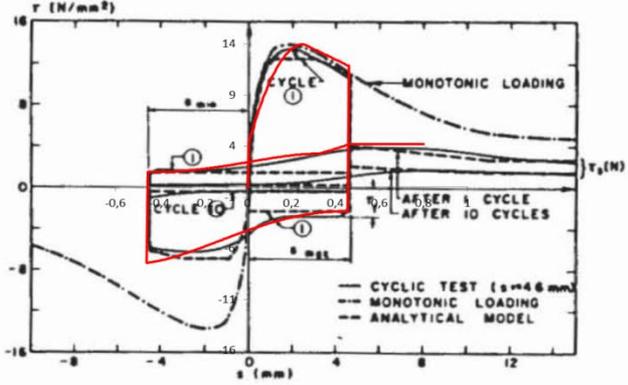
$$V_{eq(M)} = \frac{\int_V \left(\frac{\sigma}{R_{t/Vref}} \right)^m \psi(l/l_c) dV}{\left(\frac{\sigma_{max}}{R_{t/Vref}} \right)^m} \leq V_{max(M)}$$

Méthode d'évaluation du volume sollicité (WL2)

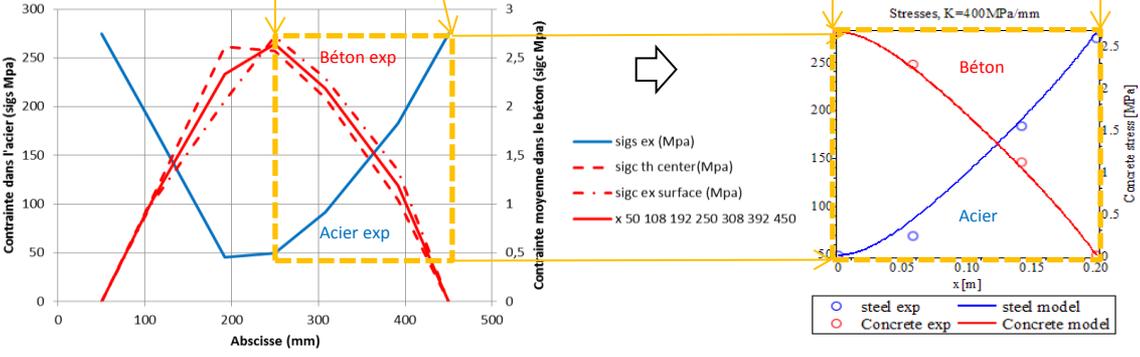
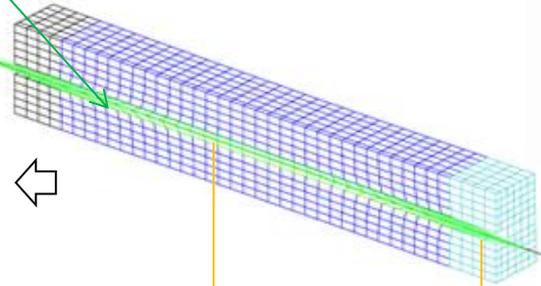
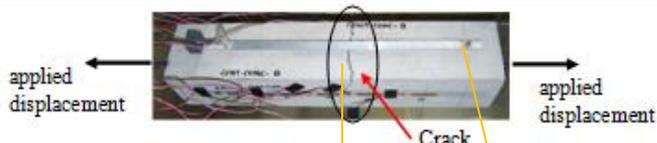
Les modèles considèrent l'effet d'échelle probabiliste (réduction de 50% de r_t moyen dans le cas des RG, cf preuve expérimentale sur RG8)

Interface acier-béton

- Prise en compte du glissement acier béton par éléments d'interface élasto plastique callés sur Pull-out test et Ecrouissage « Eligehausen »
- Validation sur tests de laboratoire (tirant simple)
- Prise en compte de la dépendance à l'hydratation par calage sur Pull out jeune âge



[Eligehausen, Popov, Bertero 1982]



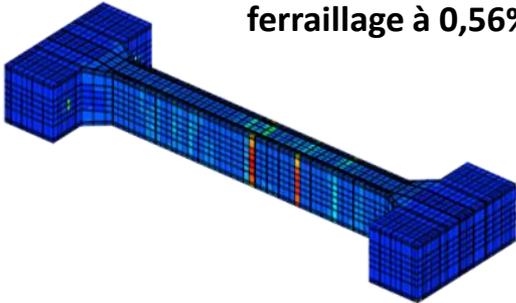
Identification des paramètres de la loi d'interface acier béton par analyse inverse sur tirant instrumenté

- ### Interface élasto-plastique
- Phase de comportement initiale élastique
 - Seuils de cisaillement élastique et seuil de cisaillement maximal issus d'un essai pull out
 - Couplage à l'hydratation
 - Atténuation de l'angle de frottement
 - Possibilité de prise en compte du confinement
 - Compatible avec le modèle d'Eligehausen

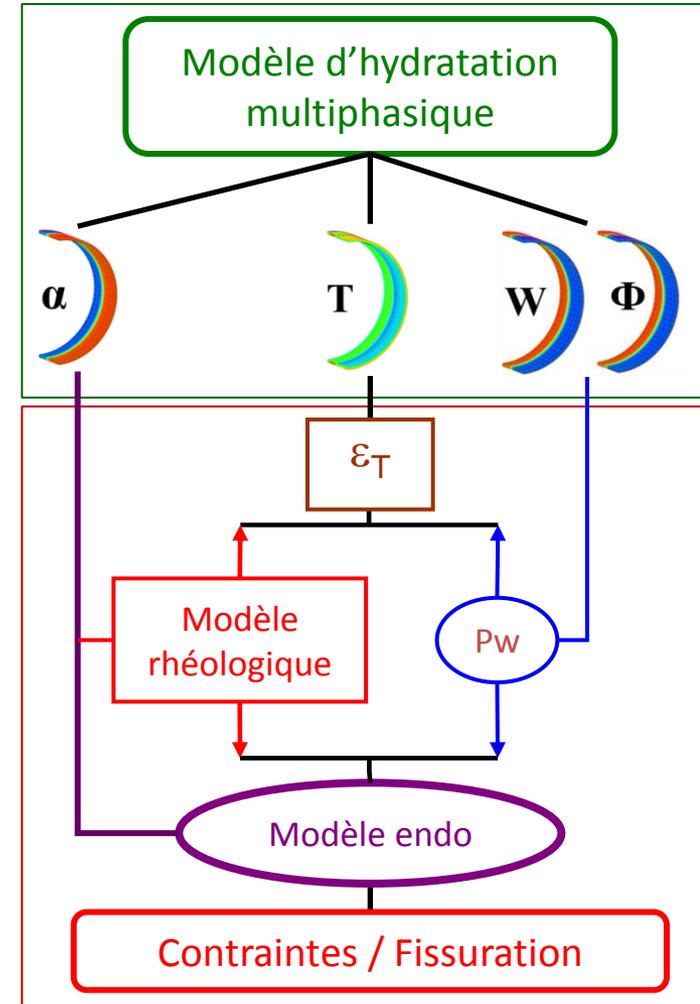
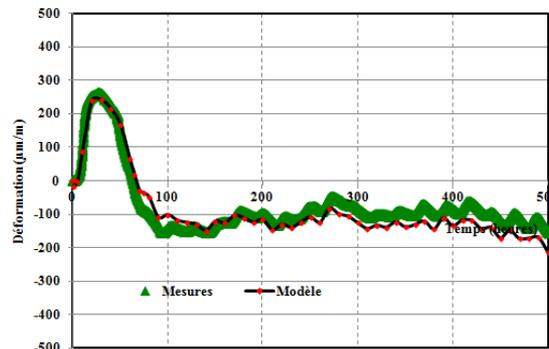
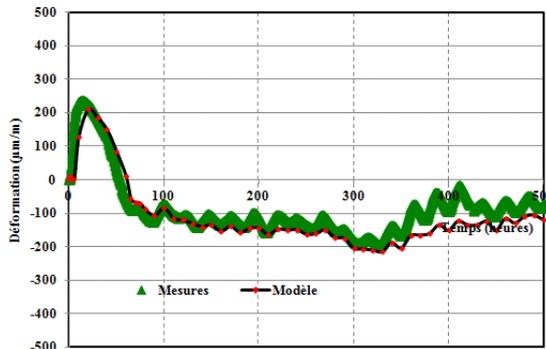
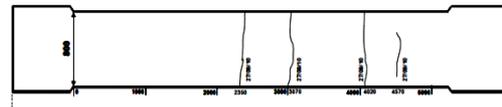
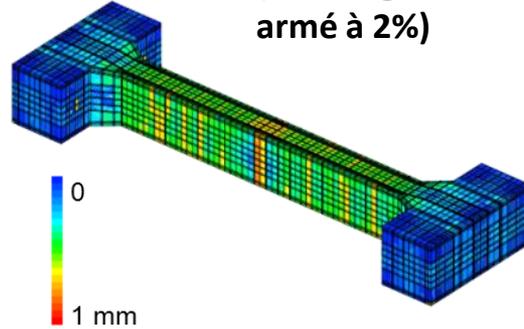
Modélisation réaliste de l'adhérence

Validation des modèles sur les RG réels

RG9 (enrobage 30mm
ferrailage à 0,56%)



RG10 (enrobage 50mm
armé à 2%)



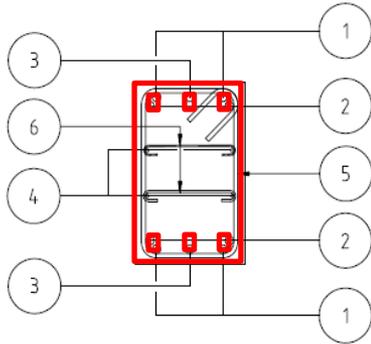
Modèle THCM validée sur RG8-RG9-RG10:

- Confirmation des hypothèses de calcul (fluage jeune âge, effet d'échelle)
- Utilisation possible pour extrapoler les résultats expérimentaux sur des cas virtuels



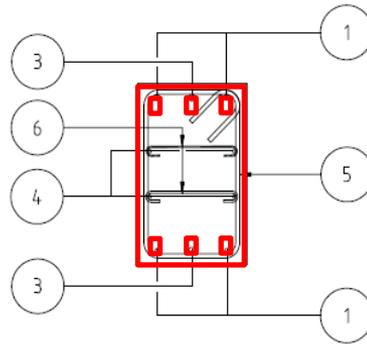
4 RG « virtuels » en conditions THCM identiques

BLOC n°8
2% ARMATURE



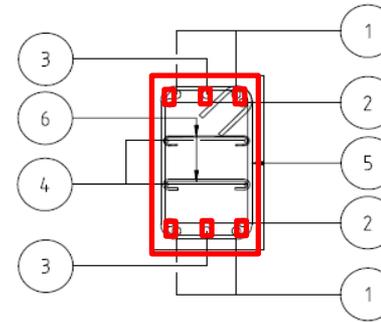
- %Armature = 2%(10-HA32)
- Enrobage = 30 mm
- Béton = C50/60

BLOC n°9
0.6% ARMATURE



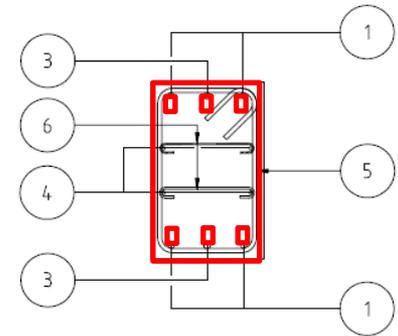
- %Armature = 0.6%(4-HA20 + 2-HA25)
- Enrobage = 30 mm
- Béton = C50/60

BLOC n°10
2% ARMATURE
50mm d'enrobage
dans tirant uniquement



- %Armature = 2%(10-HA32)
- Enrobage = 50 mm
- Béton = C50/60

BLOC n°11
0,6% d'armature
50 mm enrobage



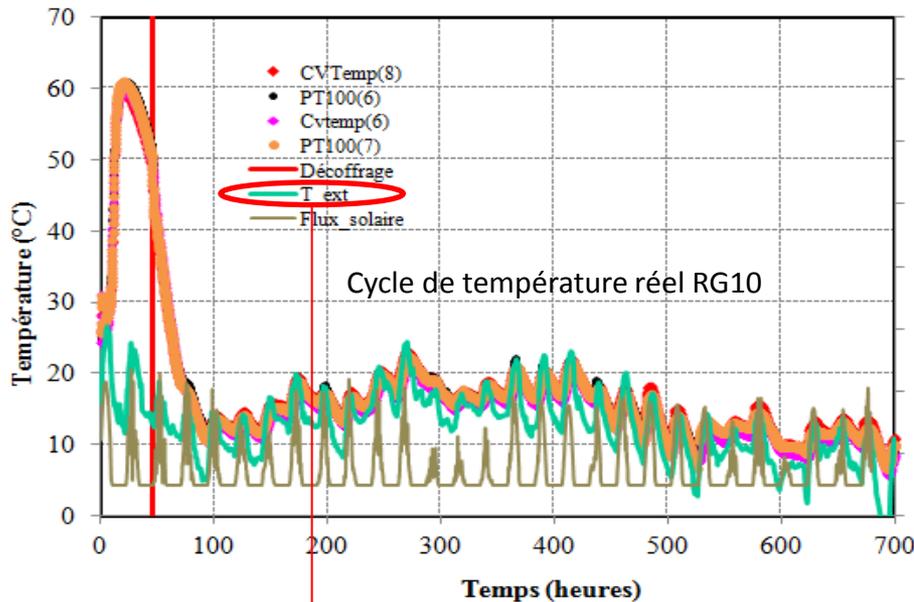
- % Armature = 0,6% (4-HA10+2-HA25)
- Enrobage 50 mm
- Béton C50/60

Géométrie réelle des RG 8-9-10 simplifié* mais **cycle thermique virtuel identique pour tous les cas**

Géométrie virtuelle et cycle thermique virtuel identique aux 3 autres

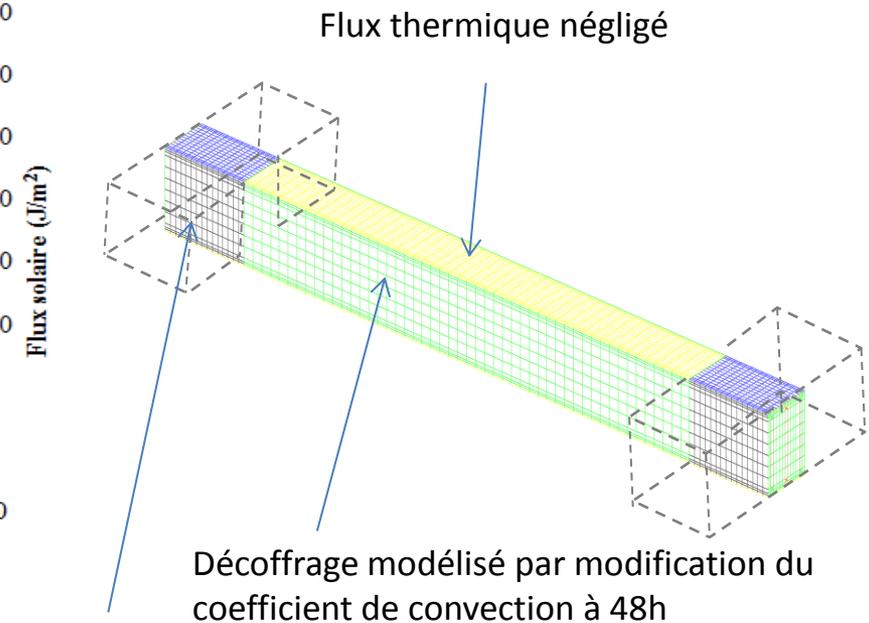
(*têtes non endommageables; ancrage des butons parfait; cadres, épingles armatures secondaires non modélisées, armatures concentrées sur 3 paquets hauts et bas)

Simplifications : cycle thermique unique et géométrie



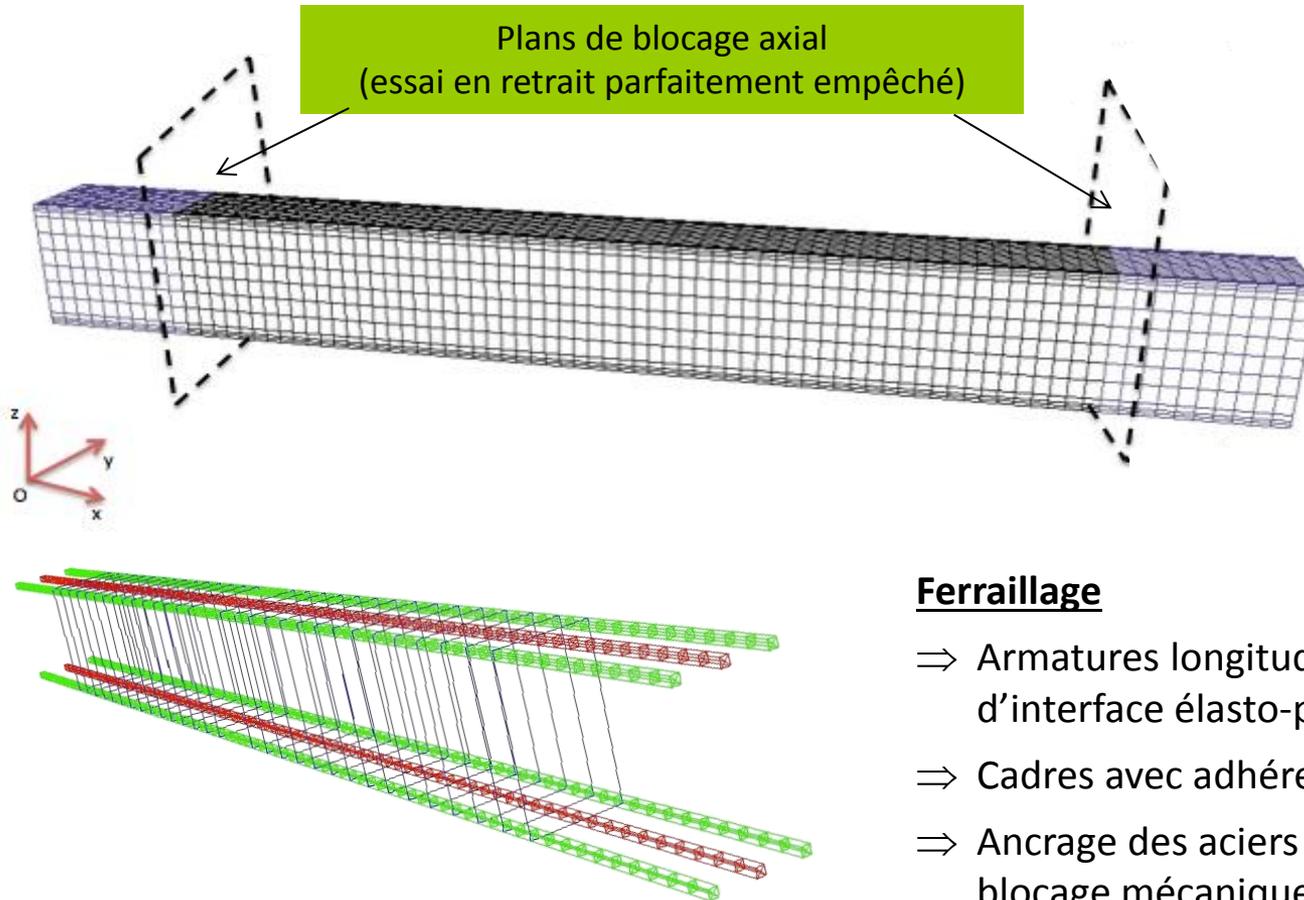
Température extérieure idéalisée pour les essais virtuels « RG8v »
« RG9v » « RG10v » « RG11v »

Température extérieure virtuelle constante = 12°C



Chevêtre remplacé par isolation thermique latérale

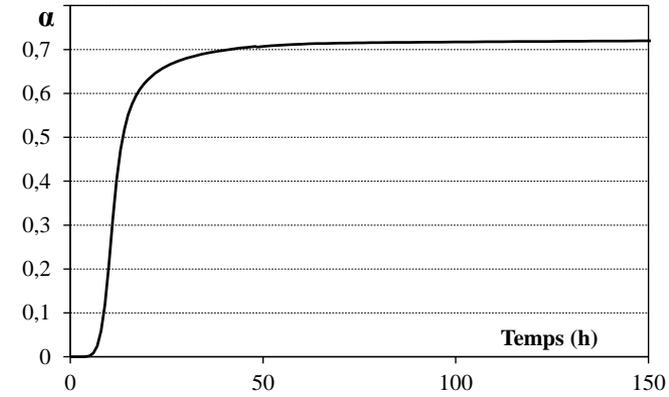
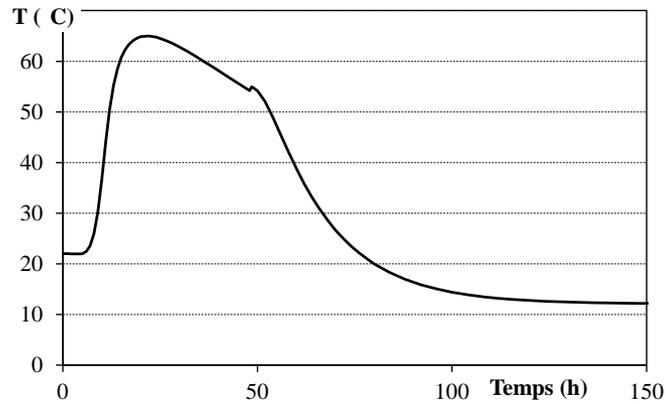
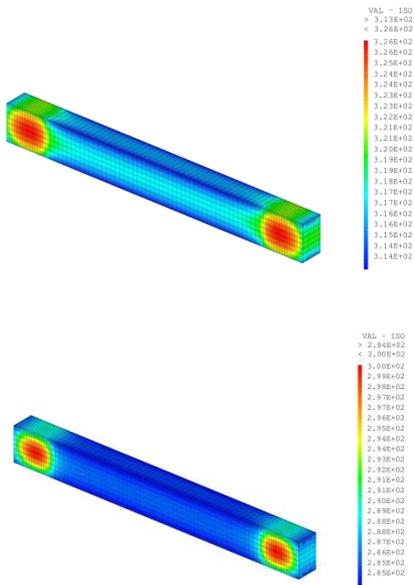
Simulations mécaniques



Ferrailage

- ⇒ Armatures longitudinales avec éléments d'interface élasto-plastique
- ⇒ Cadres avec adhérence parfaite (simplification)
- ⇒ Ancrage des aciers au delà de la zone de blocage mécanique du béton

Simulation THC sur le maillage RG virtuel

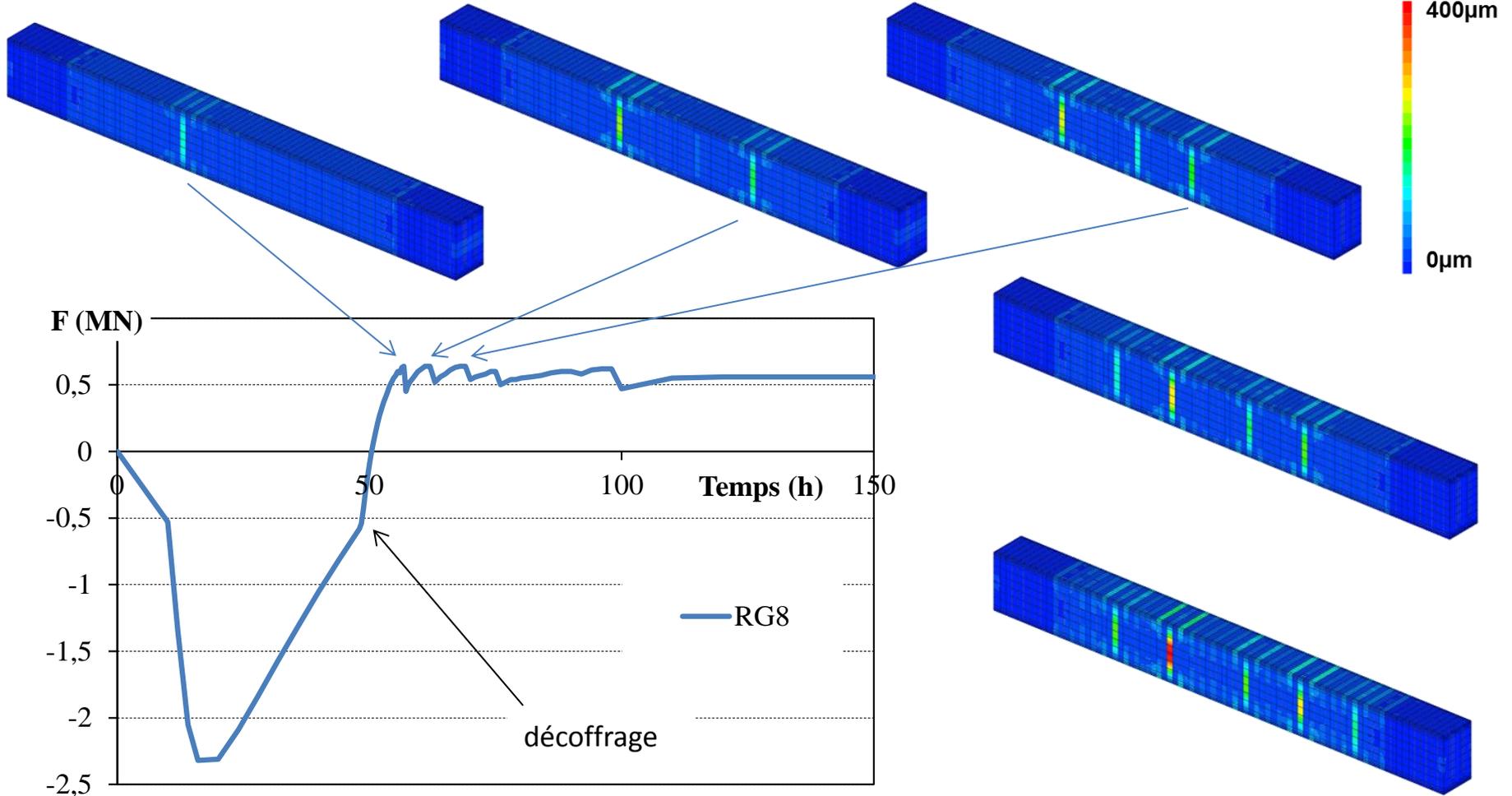


⇒ Elévation de température plus importante que RG8
(+ rappel : blocage en déplacement complet)



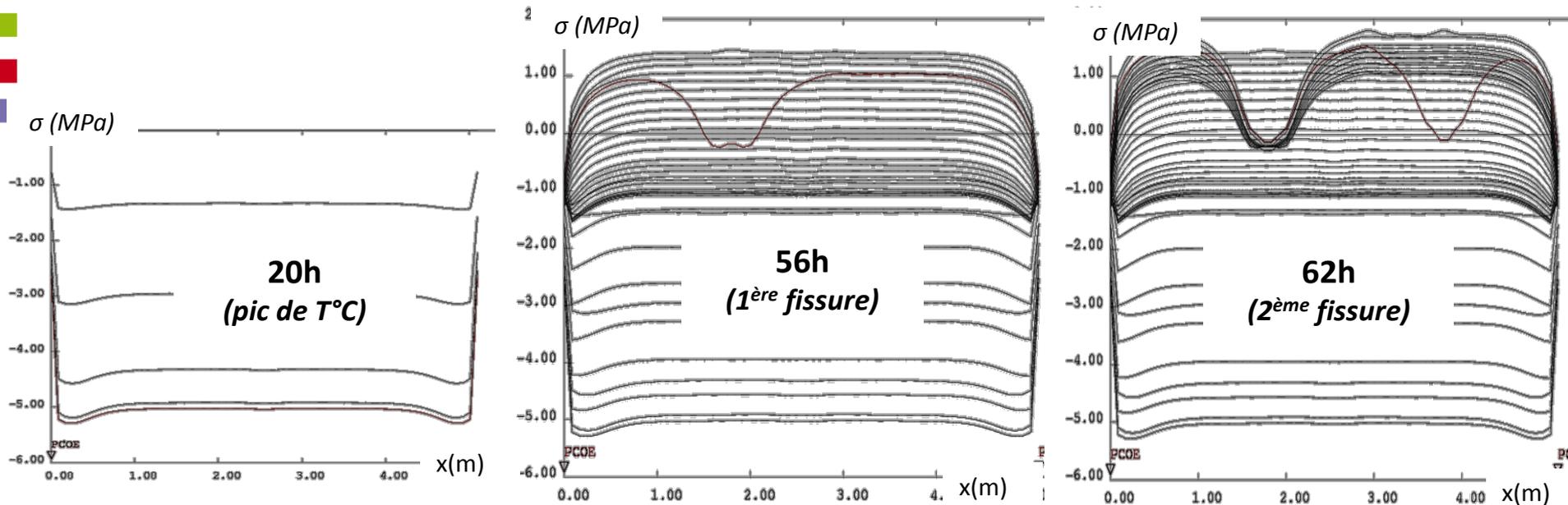
Cas plus « défavorable » que
RG8 réel

Développement fissuration sur RG8 virtuel



Fissuration progressive avec la mise en traction lors du refroidissement

Développement des contraintes dans le béton (au cœur de RG8 virtuel)

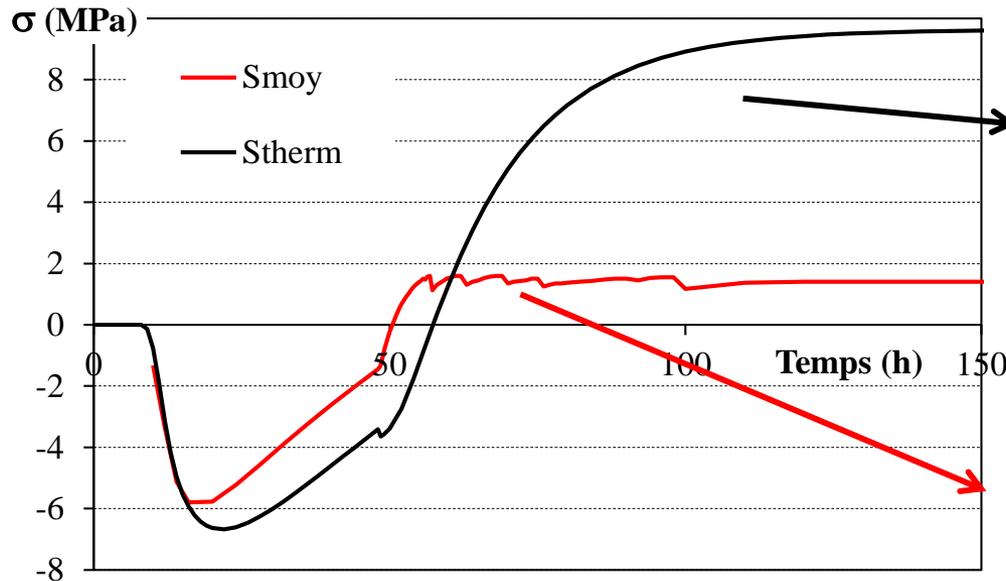


Fissuration pour des contraintes faibles

- ⇒ R_t réduit par effet d'échelle (env 0,5 R_t fendage)
- ⇒ Hydratation incomplète à 56h
- ⇒ Accroissement de la contrainte à 62h grâce à l'hydratation

Le modèle « endommagement +adhérence » permet d'accéder aux distributions de contraintes dans les zones de ré-ancrage

Comparaison calcul élastique



Contrainte théorique issue de la déformation thermique (*calcul en élasticité incrémentale*)

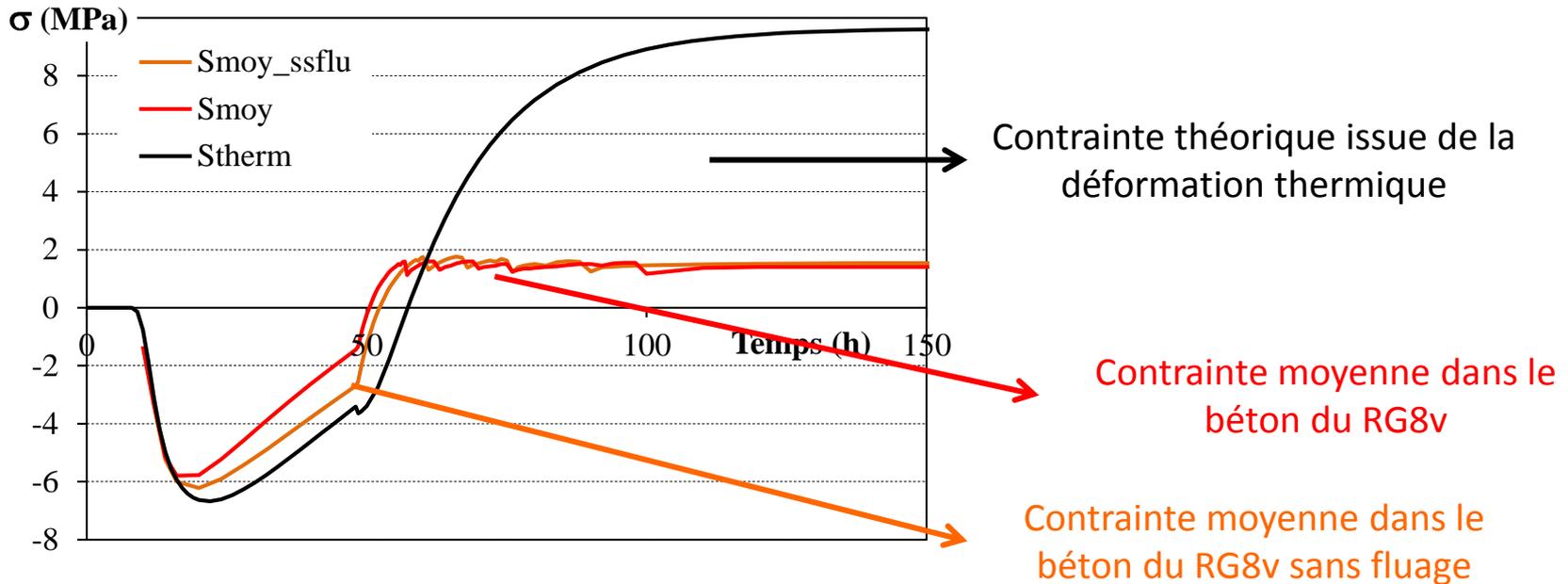
Contrainte moyenne dans le béton du RG8v (*calcul avec le modèle complet*)

Calcul élastique simplifié :

⇒ Sur-estimation de la contrainte de compression en phase d'échauffement : « Retour en traction » retardé et instant de fissuration retardé (calcul non sécuritaire)

Négliger le fluage et le retrait lors de la phase d'échauffement conduit à retarder l'échéance de fissuration : pour être réaliste il faut laisser fluer le béton au jeune âge sous l'effet de la dilatation thermique empêchée et intégrer le retrait

Comparaison calcul élastique

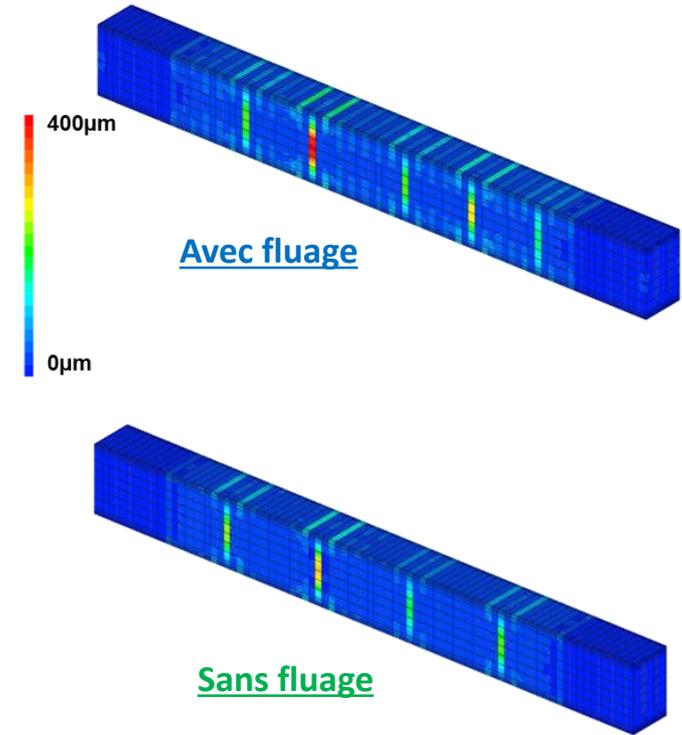
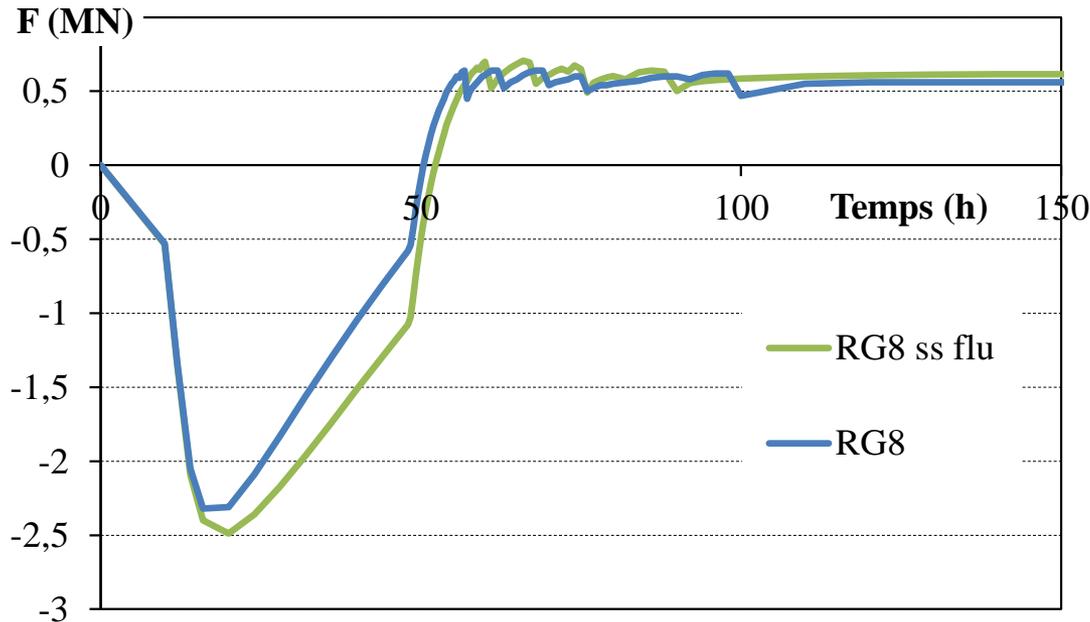


Calcul élastique simplifié :

- ⇒ Effet du fluage non négligeable pour prédire le bon instant de fissuration
- ⇒ Fluage seul insuffisant pour expliquer la différence
- ⇒ **Retrait et fluage joue dans le « même sens » : réduction des contraintes en phase de compression**

Retrait et fluage diminuent le taux de compression lors de l'échauffement, ce qui accroît la fissuration lors du retour en température

Influence de la non prise en compte du fluage

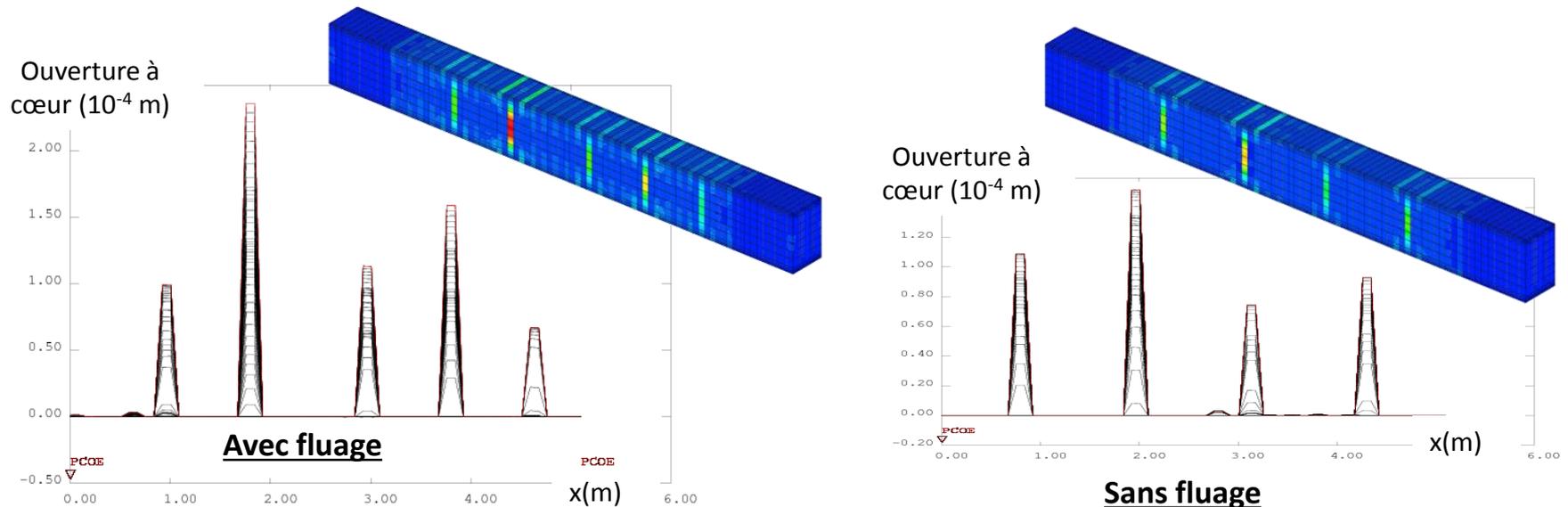


Non prise en compte du fluage :

⇒ Retard sur l'instant de 1^{ère} fissuration (*surestimation contraintes en phase d'échauffement*)

Considérer le fluage et le retrait lors de l'échauffement conduit à créer davantage de fissures au refroidissement, il est donc sécuritaire de les considérer.

Influence de la non prise en compte du fluage

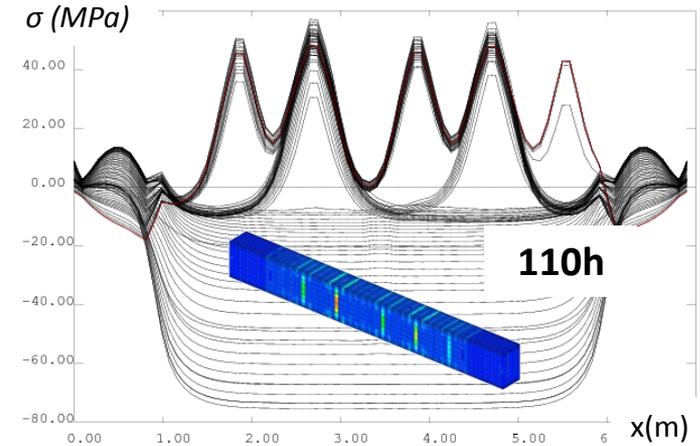
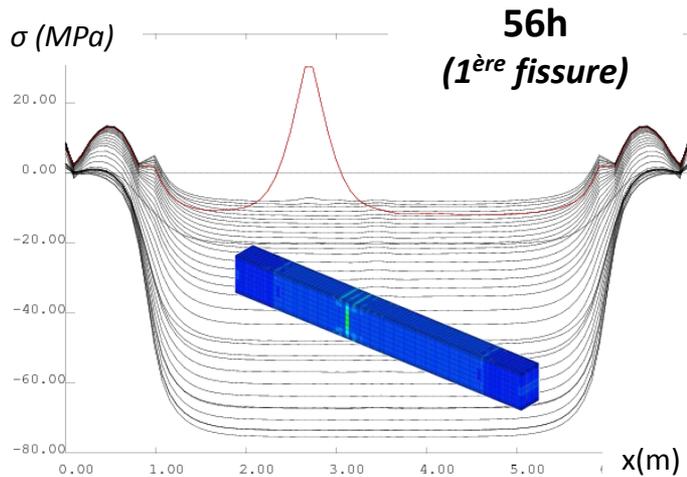


Non prise en compte du fluage :

- ⇒ Retard sur l'instant de 1^{ère} fissuration (*surestimation contraintes en phase d'échauffement*)
- ⇒ **Fissures légèrement moins nombreuses et fissure principale moins ouverte**
- ⇒ **Calcul non sécuritaire si fluage négligé en phase d'échauffement**

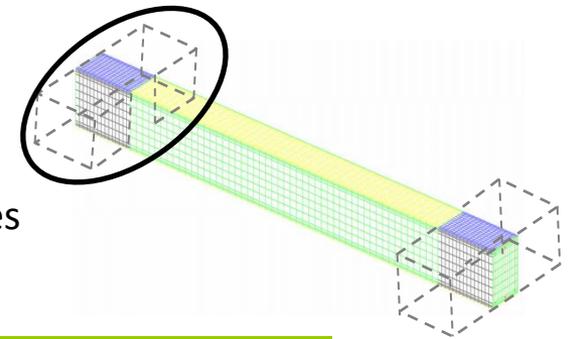
Si le fluage au jeune âge est négligé, le calcul sous-estime non seulement le nombre, mais aussi l'ouverture des fissures

Développement des contraintes dans l'acier (au cœur)



Contraintes de compression en partie « tirant »

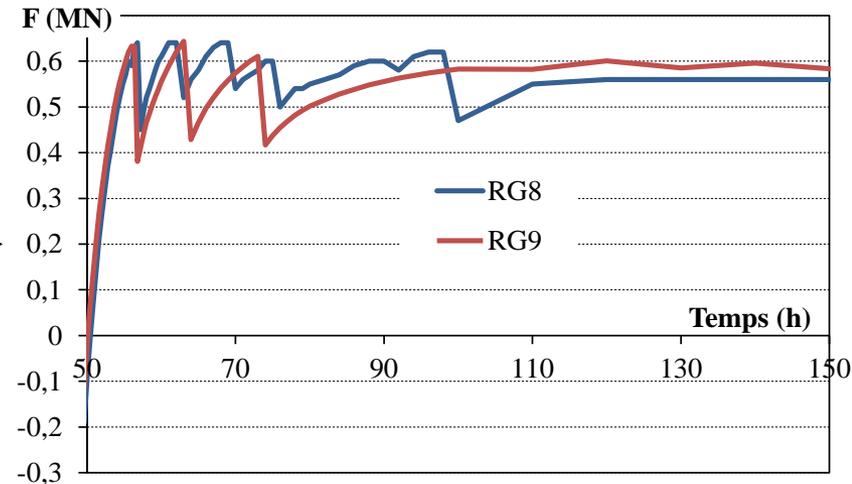
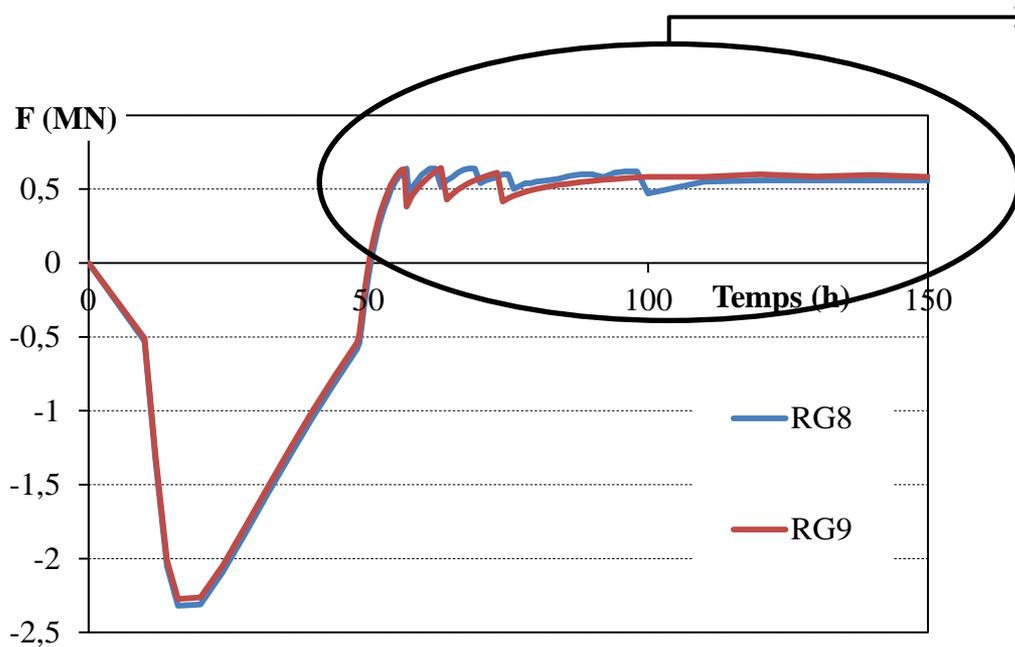
- ⇒ Ancrage précoce des aciers dans les têtes ($T^{\circ}\text{C}$ élevée)
- ⇒ Déformations initiale gênées dans la partie « tirant » des armatures



Les profils de contrainte dans l'acier vont permettre d'accéder à la contrainte de cisaillement acier/béton (par dérivation)

Effet sur le comportement global

Structure	RG8bis	RG9	RG10	RG11v
Armature [%]	2	0,6	2	0,6
Barres d'armature	10HA32	4HA20, 2HA25	10HA32	4HA20, 2HA25
Enrobage [mm]	30	30	50	50
Enrobage de calcul, E [mm]	40	40	60	60
Béton	C50/60	C50/60	C50/60	C50/60



Diminution taux d'armature :

- ⇒ Instant de 1^{ère} fissuration non modifié
- ⇒ Moins de fissures

Effet sur la fissuration

RG8(2%)

60h

70h

80h

110h

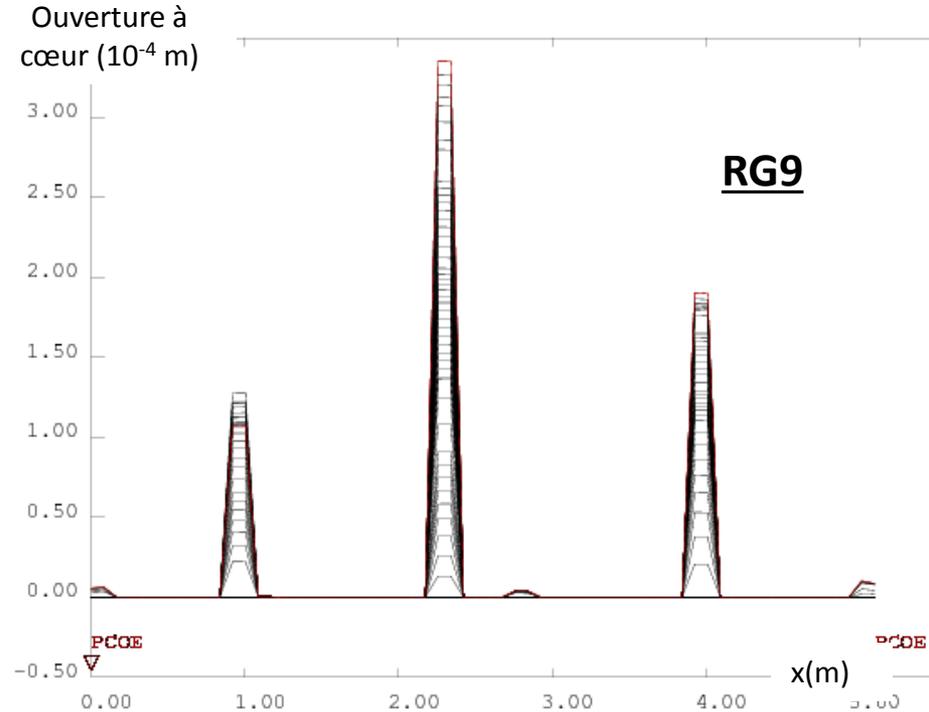
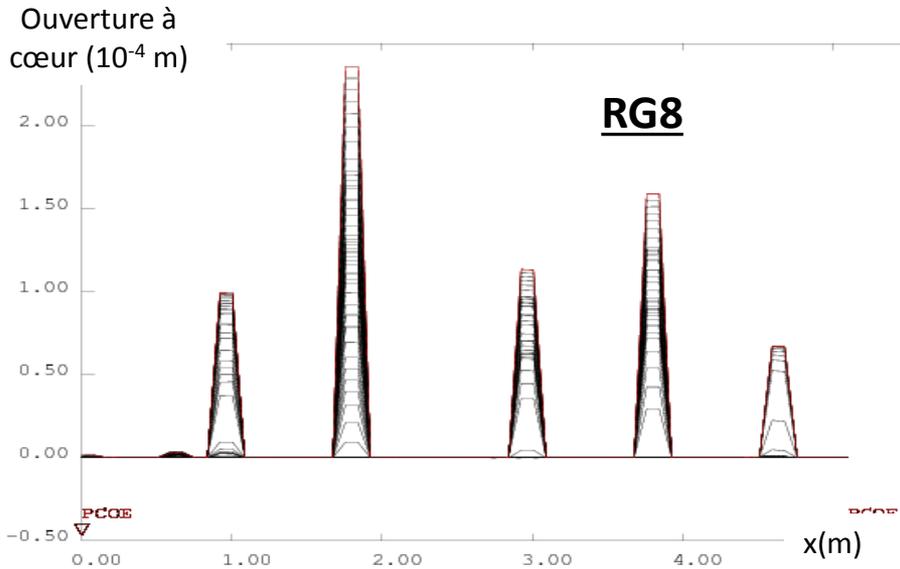
RG9(0,56%)



Diminution taux d'armature :

- ⇒ Moins de fissures
- ⇒ Fissures traversant jusqu'en face sup (non stoppées par les armatures)

Effet sur l'ouverture de fissuration



Diminution taux d'armature :

- ⇒ Moins de fissures
- ⇒ Fissures plus ouvertes

Effet sur les contraintes de cisaillement

Cas des structures fortement ferraillées

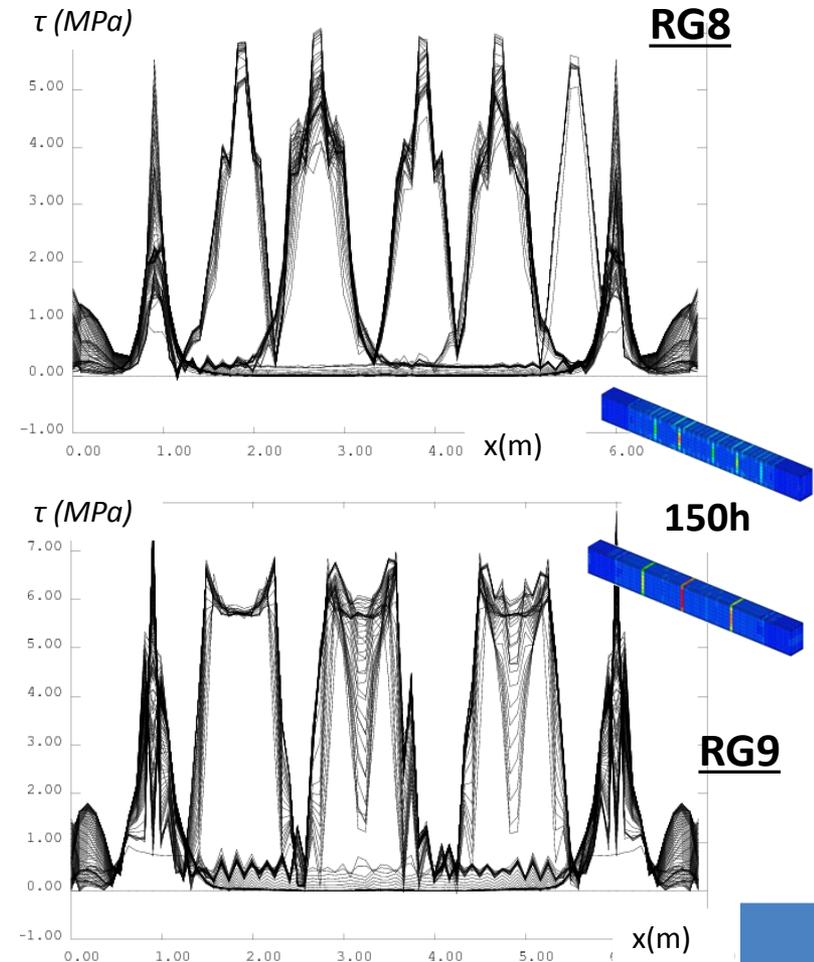
- ⇒ Adhérence sollicitée dans le domaine élastique
- ⇒ Evolution linéaire de la contrainte de cisaillement dans la zone de ré-ancrage

Dans les ouvrages fortement ferraillés, l'hypothèse de la contrainte d'adhérence constante n'est pas exacte car les fissures sont plus nombreuses et moins ouvertes

Cas des structures faiblement ferraillées

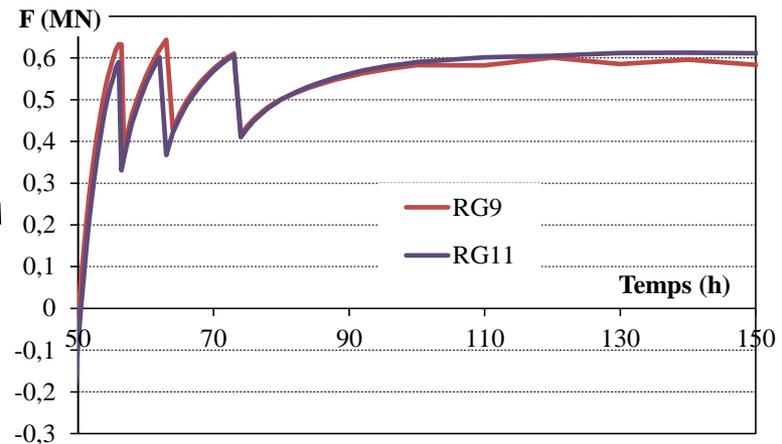
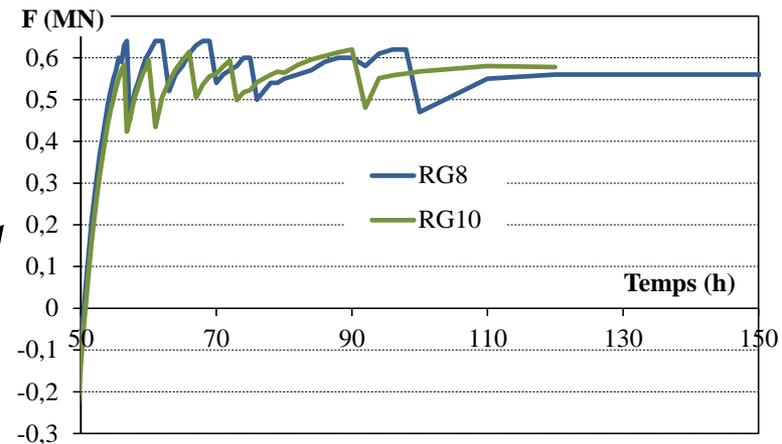
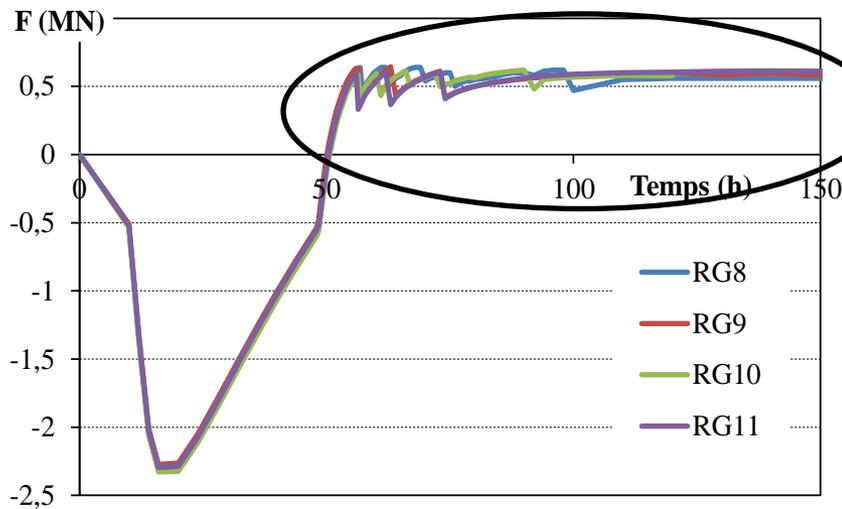
- ⇒ Atteinte du palier plastique
- ⇒ Contrainte de cisaillement constante dans la zone de ré-ancrage

Dans les ouvrages faiblement ferraillés, l'hypothèse de la contrainte d'adhérence constante est admissible car les fissures sont très ouvertes et peu nombreuses



Effet sur le comportement global

Structure	RG8bis	RG9	RG10	RG11v
Armature [%]	2	0,6	2	0,6
Barres d'armature	10HA32	4HA20, 2HA25	10HA32	4HA20, 2HA25
Enrobage [mm]	30	30	50	50
Enrobage de calcul, E [mm]	40	40	60	60
Béton	C50/60	C50/60	C50/60	C50/60

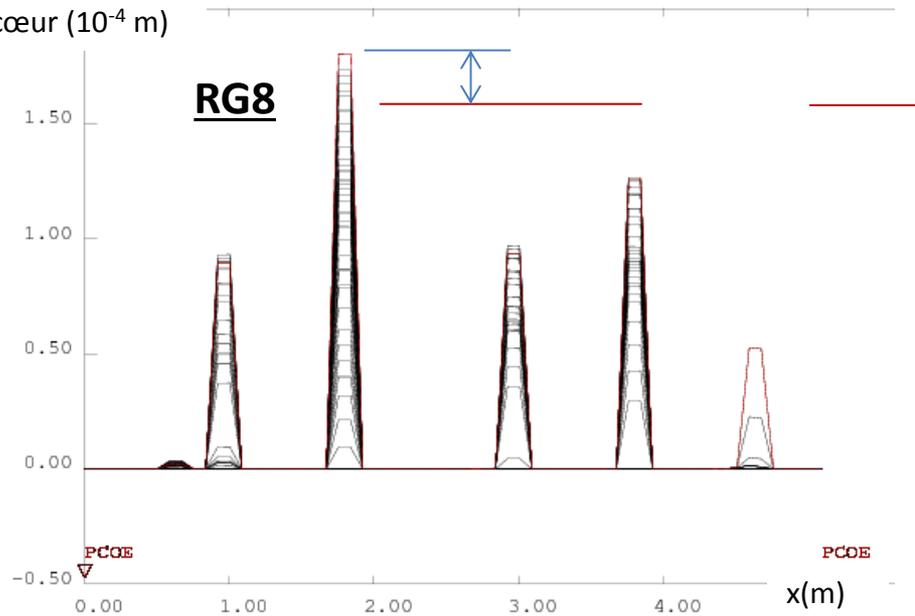


Augmentation de l'enrobage :

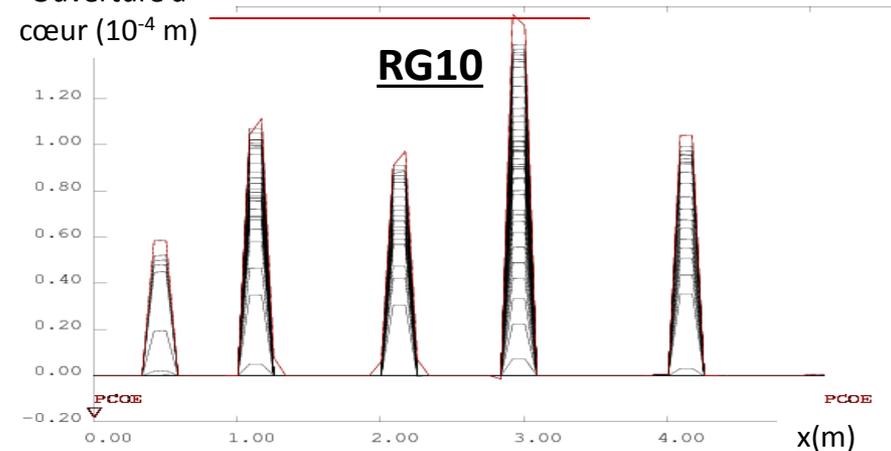
⇒ Influence notable seulement pour les tirants fortement armés

Effet sur l'ouverture de fissuration

Ouverture à cœur (10^{-4} m)



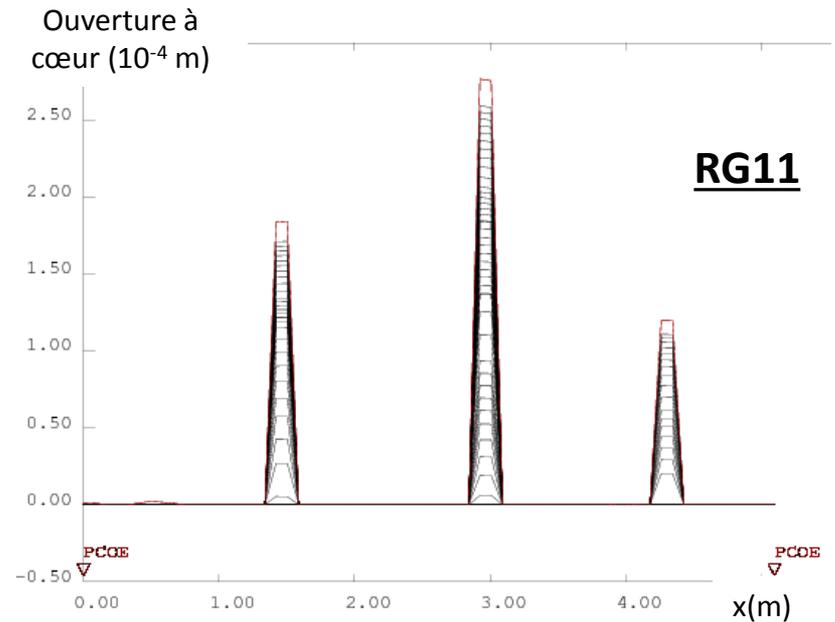
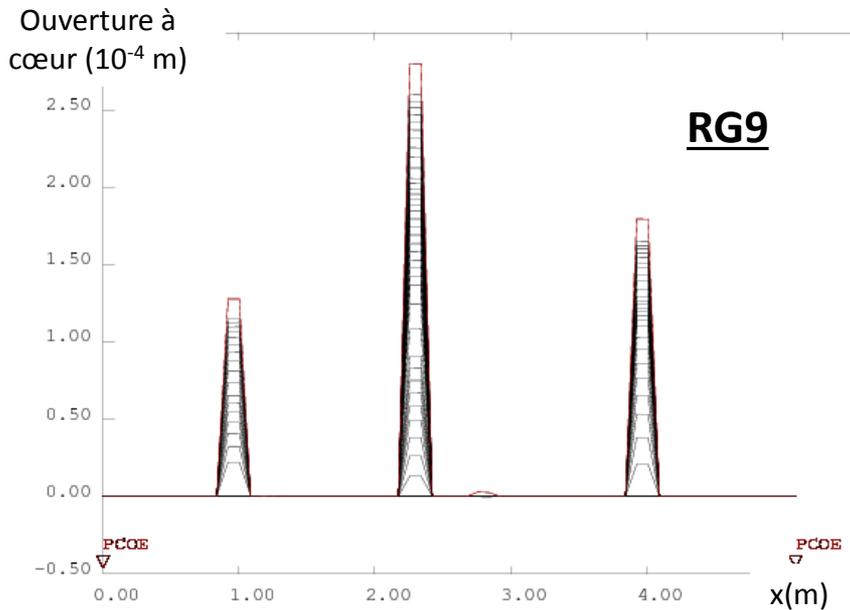
Ouverture à cœur (10^{-4} m)



Augmentation de l'enrobage:

⇒ Légère diminution de l'ouverture des 2 fissures les + ouvertes (pour le % armatures fort) due à une 5^{ème} fissure plus ouverte (car ré-ancrage plus rapide si enrobage fort)

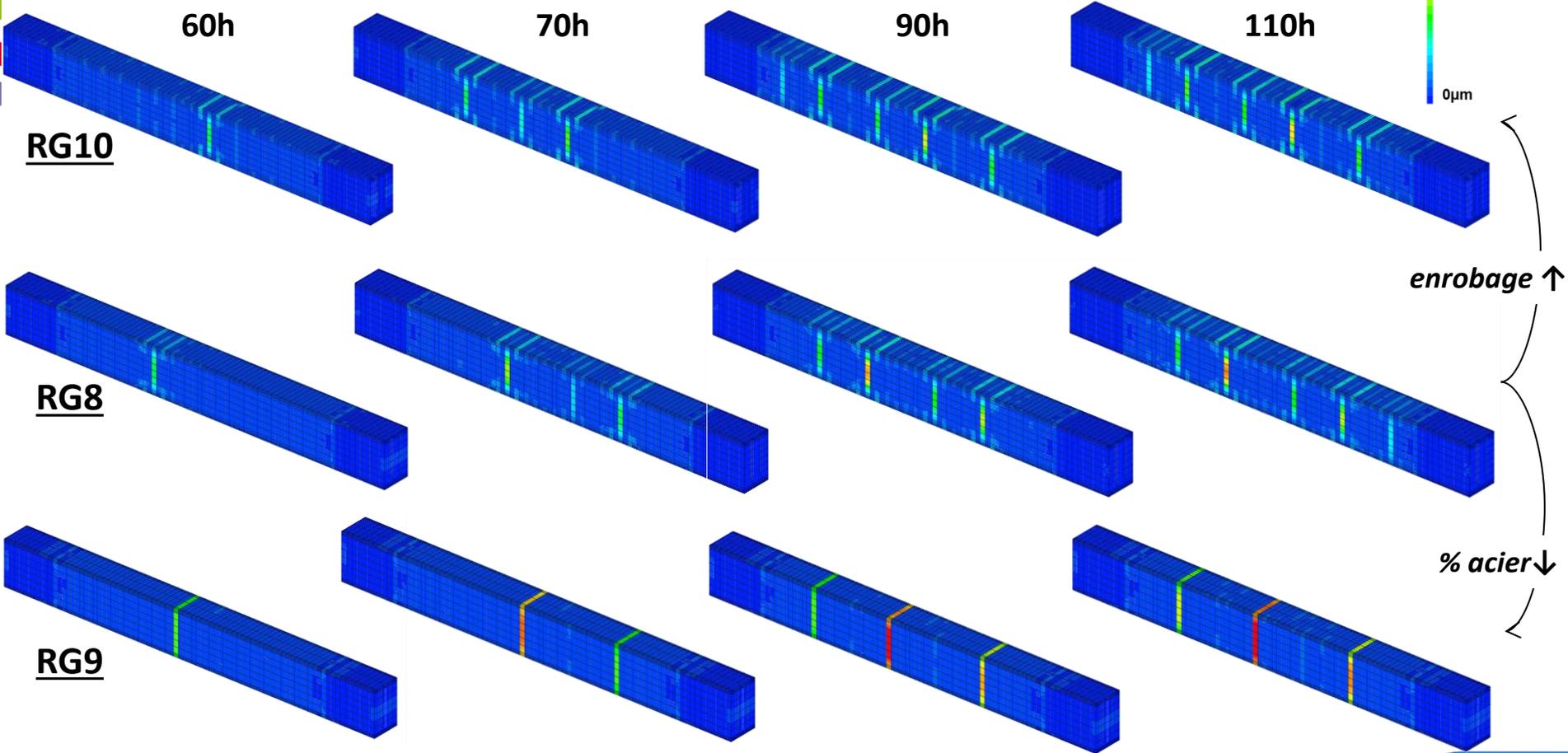
Effet sur l'ouverture de fissuration



Augmentation de l'enrobage:

⇒ Pas d'effet pour le % armatures faible car ré-ancrage limité par la contrainte de cisaillement « plastique », pas par l'enrobage

Effet sur la fissuration



Etude paramétrique

Si non prise en compte du fluage et du retrait :

- ⇒ Surestimation de la contrainte en phase d'échauffement
- ⇒ Retard sur l'instant de 1^{ère} fissuration
- ⇒ Fissures moins nombreuses et fissure principale moins ouverte

**Calcul non
sécuritaire**

Diminution taux d'armature :

- ⇒ Instant de 1^{ère} fissuration non modifié
- ⇒ Moins de fissures et fissures plus ouvertes

Augmentation de l'enrobage:

- ⇒ Instant de 1^{ère} fissuration et nombre de fissures non modifiés
- ⇒ Pas d'effet pour le % armatures faible
- ⇒ Légère diminution de l'ouverture des 2 fissures les + ouvertes pour le % armatures fort

Etude générale des résultats numériques

Contrainte dans le béton :

- ⇒ Prise en compte de l'effet d'échelle sur la résistance à la traction
- ⇒ Fissuration pour contrainte de traction faible

Contraintes de cisaillement dans les interfaces acier-béton :

- ⇒ Cas des RG fortement armés : contrainte de cisaillement avec évolution autour de la fissuration
=> le seuil de plasticité en cisaillement n'est pas atteint, l'ancrage ne peut pas être évalué avec un taux de cisaillement constant
- ⇒ Cas des RG faiblement armés : contrainte de cisaillement plastique atteinte dans la zone de ré-ancrage autour de la fissuration, l'approximation par contrainte de cisaillement constante est admissible



CEOS.fr

Modélisation du comportement Thermo-Hydro-Mécanique

Merci pour votre attention



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

04/06/2015

