

Club U MFRONT:

Modèle de couplage Fluage-Endommagement-
Réaction Alkali Granulat (RAG) du béton

François Hamon

Farid Benboudjema

Inès Djouadi

EDF R&D



Introduction

Contexte

➡ Projet ARISTHYD : **A**nalyse du **R**isque **S**ismique et **T**hermomécanique des ouvrages de l'**HYD**raulique

- Surveillance accrue des ouvrages hydrauliques

Objectifs

➡ Proposé un modèle simple d'utilisation couplant Fluage-Endommagement-RAG

- Challenger MFront sur des lois de complexité variable : couplage fort entre différents mécanismes
- Monter en compétence sur la RAG
- Utiliser des modèles déjà présents dans Code_Aster sous AQ

Stage

➡ Inès Djouadi

- Ecole Paris 6 Université Pierre et Marie Curie (UPMC)
- Co-Encadrer avec F.Benboudjema du ENS-Cachan
- Durée de 6 mois

Outils



MFRONT



1 Amélioration du modèle de fluage

1-1 Définition du fluage

1-2 Développements

1-3 Validation

2 Couplage Endommagement – Fluage - RAG

2-1 Définition de la RAG

2-2 Modèles

2-2 Validations

3 Application industrielle

2-1 Présentation du barrage

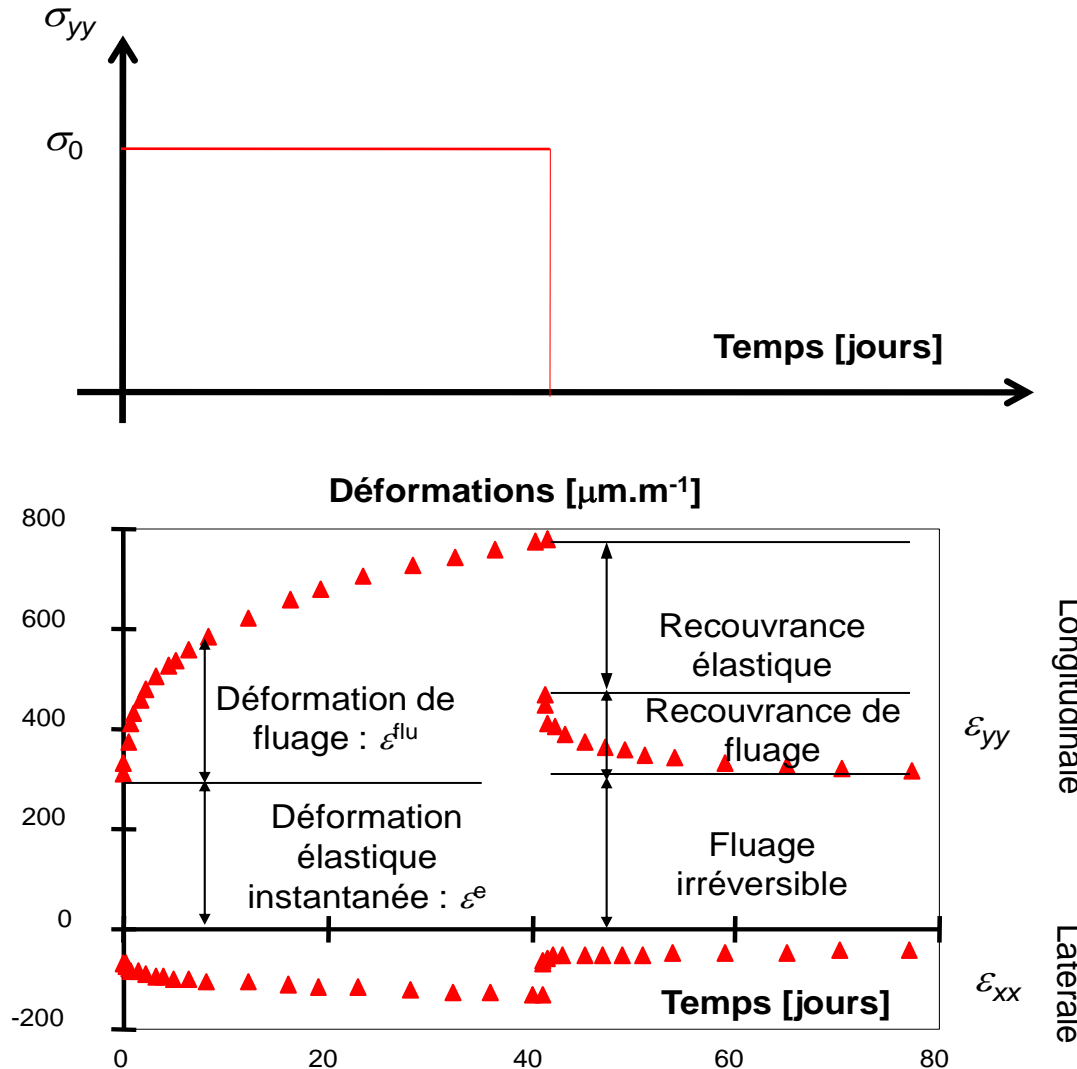
2-2 Calcul hydrique

2-2 Calcul mécanique

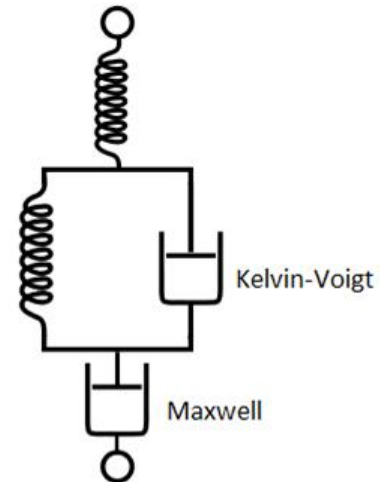
Amélioration du modèle de fluage

Définition

Le Fluage : Déformation différée sous chargement constant



Modélisé par:



Modèle de Burger

Amélioration du modèle de fluage

Définition

Le hypothèses à l'origine du fluage

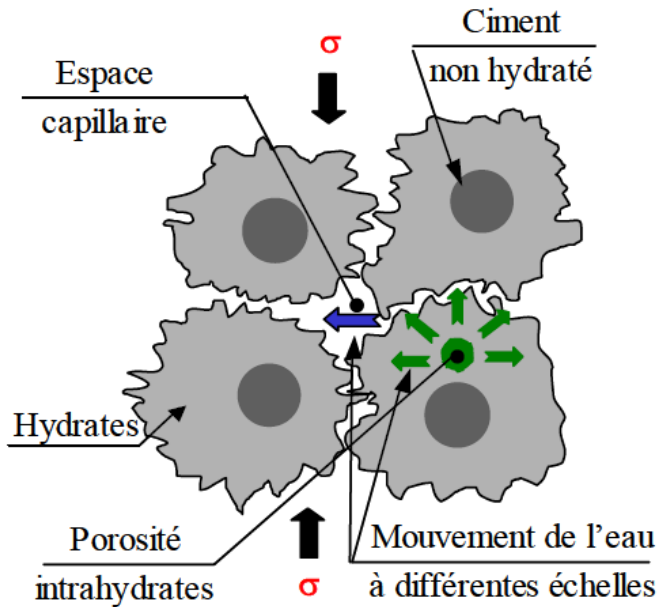
$$\underline{\underline{\varepsilon}}^f$$

Modèle de Burger

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^f = \underline{\underline{\varepsilon}}^{fs} \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{\varepsilon}}^{fd}$$

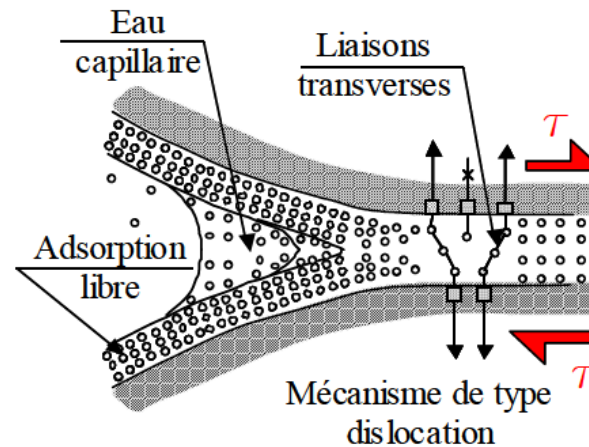
Fluage sphérique $\underline{\underline{\varepsilon}}^{fs}$

Fluage déviatorique $\underline{\underline{\varepsilon}}^{fd}$



Micro-diffusion de l'eau

$$\varepsilon^s = hf(\sigma^s)$$



Glissement des CSH

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^d = hf(\underline{\underline{\sigma}}^d)$$

h : humidité
 σ : Contrainte
 (s : sphérique, d : déviatorique)
 $\underline{\underline{I}}$: Tenseur identité

➡ 7 à 8 fichiers en Fortran sous ASTER

Amélioration du modèle de fluage

Développements

Modèle Burger sous Mfront

● Beaucoup plus simple et lisible (50 lignes)

```
49 /*.Initialize.Lame.coefficients.*/
50 @InitLocalVariables{
51 ..using namespace tfel::material::lame;
52 ..lambda = computeLambda(young,nu);
53 ..mu = computeMu(young,nu);
54 }.
55
56 @TangentOperator{
57 ..using namespace tfel::material::lame;
58 ..if((smt==ELASTIC)|| (smt==SECANTOPERATOR)){
59 ....computeElasticStiffness<N,Type>::exe(Dt,lambda,mu);
60 ..}.else. if(smt==CONSISTENTTANGENTOPERATOR){
61 ....StiffnessTensor.Hooke;
62 ....Stensor4.Je;
63 ....computeElasticStiffness<N,Type>::exe(Hooke,lambda,mu);
64 ....getPartialJacobianInvert(Je);
65 ....Dt = Hooke*Je;
66 ..}.else. {
67 ....return false;
68 ..}
69 }
70
71 @ComputeStress{
72 ....sig = lambda*trace(eel)*Stensor::Id()+2*mu*eel;
73 }.
74
75 @Integrator{
76 ....real.stresP=trace(sig)/3.;
77 ....real.Vsech.=max(0.,dSECH);
78 ....Stensor.stresD=sig-stresP*Stensor::Id();
79 ....real.emax=sqrt(((ESPFI+dESPFI)*Stensor::Id()+(EDEV1+dEDEV1))|((ESPFI+dESPFI)*Stensor::Id()+(EDEV1+dEDEV1)));
80 ....fELIM=ELIM+dELIM-max(ELIM,emax);
81 ....real.eexp=exp((ELIM+dELIM)/KAPPA);
82 ....fESPHR=dESPHR-((SECH/SECHini*stresP-KRS*(ESPHR+dESPHR))/NRS)*dt;
83 ....fEDEV1=dEDEV1-((SECH/SECHini*stresD-KRD*(EDEV1+dEDEV1))/NRD)*dt;
84 ....fESPHI=dESPHI-((SECH/SECHini*stresP/(NIS*eexp))*dt;
85 ....fEDEV1=dEDEV1-((SECH/SECHini*stresD/(NID*eexp))*dt;
86 ....if.(NFD>0.)
87 ....{
88 ....fEdess=dEdess-(1./NFD)*Vsech/SECHini*sig;
89 ....}
90 ....else
91 ....{
92 ....fEdess=dEdess-0.*Vsech/SECHini*sig;
93 ....}
94 ....feel=delel-(deto-dEDEV1-dEDEV1-dEdess-(dESPHR+dESPHI)*Stensor::Id());
95 }
96 @UpdateAuxiliaryStateVariables{
97
98 ..EF=EF+dEDEV1+dEDEV1+(dESPHR+dESPHI)*Stensor::Id();
99 ../.cout.<< "temps = " << t0.<< endl;
100 }.
```

} Initialisation

} Calcul de l'opérateur tangent

} Calcul de la contrainte

} Calcul des évolutions des variables internes

} Mise à jour d'une variable auxiliaire

Amélioration du modèle de fluage

Développements

Influence de l'âge du béton

- Introduction du temps comme variable axillaire

```
@UpdateAuxiliaryStateVariables{  
  t0 = t0+dt;  
}
```

- Modification et simplification de deux équations



Sous Aster cette étape nécessite de changer plusieurs fichiers, ~~la méthode de résolution et la matrice tangente~~

Mfront : calcul de la Jacobienne numérique

Influence de la température

- Introduction de la température moyenne : $T_m = \frac{(T + dT)}{2}$

- Modification des valeurs des paramètre matériaux avec une loi Ahrénus



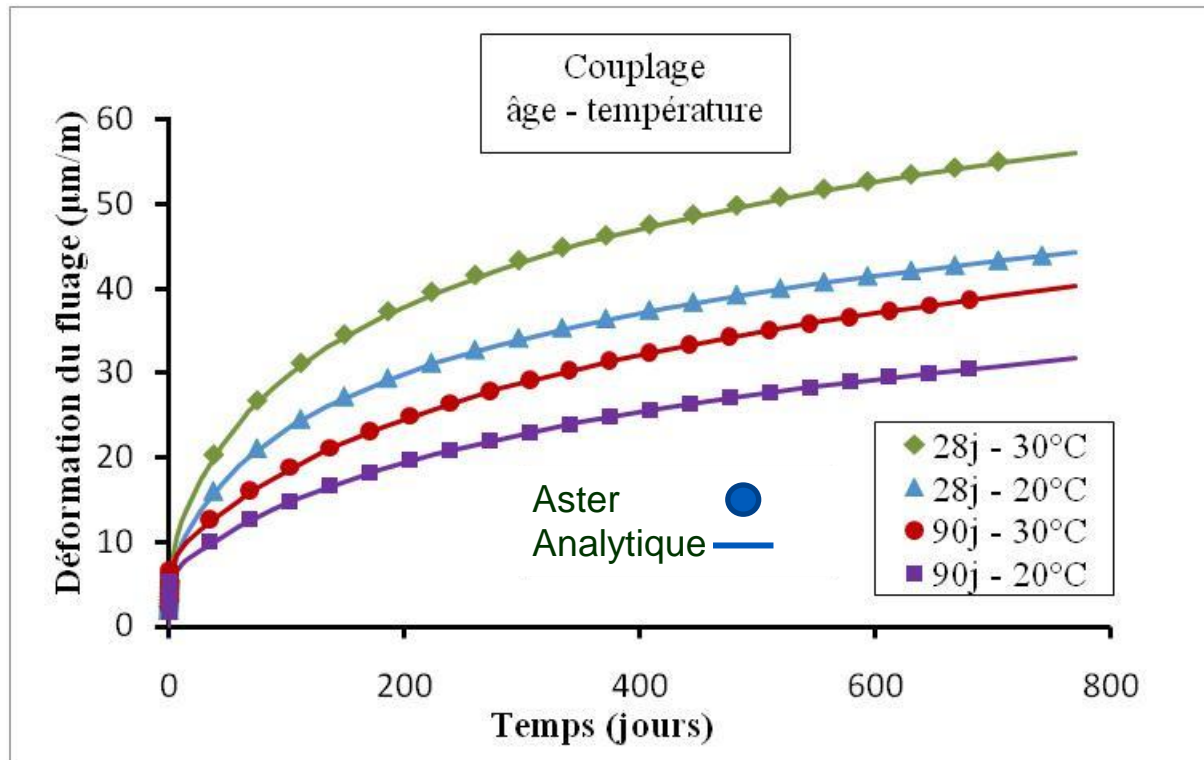
Rapide (une demie journée pour un stagiaire)



Sous ASTER (3 jours)

Amélioration du modèle de fluage

Validation



Essais de fluage propre pour des dates de chargement différent (28 ou 90 jours) et des températures différentes ($T=20^{\circ}\text{C}$ ou $T=40^{\circ}\text{C}$)

● Résultats concordants avec plusieurs essais expérimentaux



Loi appelé BurgerAgeing sous MFRONT

Sommaire

1 Amélioration du modèle de fluage

1-1 Définition du fluage

1-2 Développements

1-3 Validation

2 Couplage Endommagement – Fluage - RAG

2-1 Définition de la RAG

2-2 Modèles

2-2 Validations

3 Application industrielle

2-1 Présentation du barrage

2-2 Calcul hydrique

2-2 Calcul mécanique

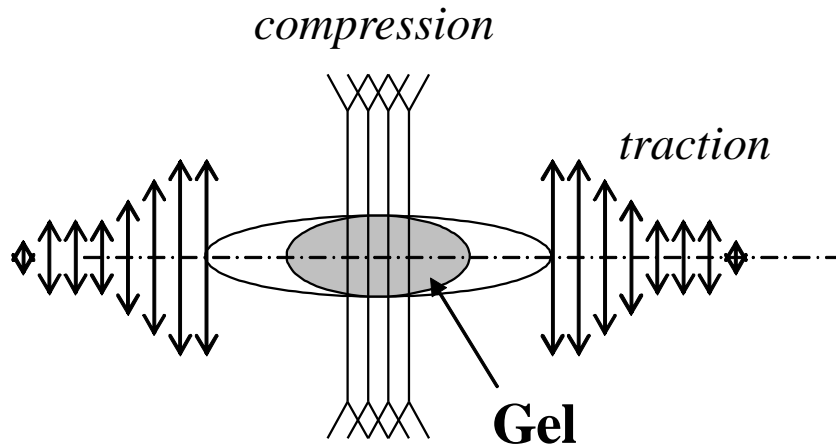
Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Définition

Qu'est ce que la Réaction Alkali-Granulat (RAG)?

réaction interne physico-chimique \Rightarrow endommagement

Ions alcalins solubles + silice réactive + eau \Rightarrow GEL



Création de gel et contraintes internes.

- Fissuration pâte-granulat et au niveau de la matrice cimentaire
- Microfissuration à l'interface béton-armature



→ Création de gel et contraintes internes.

→ Création de contraintes par gradient de déformation.

Gels de silice exposés sur la façade d'un barrage.

Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Modèles

RAG



- Essai de gonflement libre
- Essai de gonflement empêché

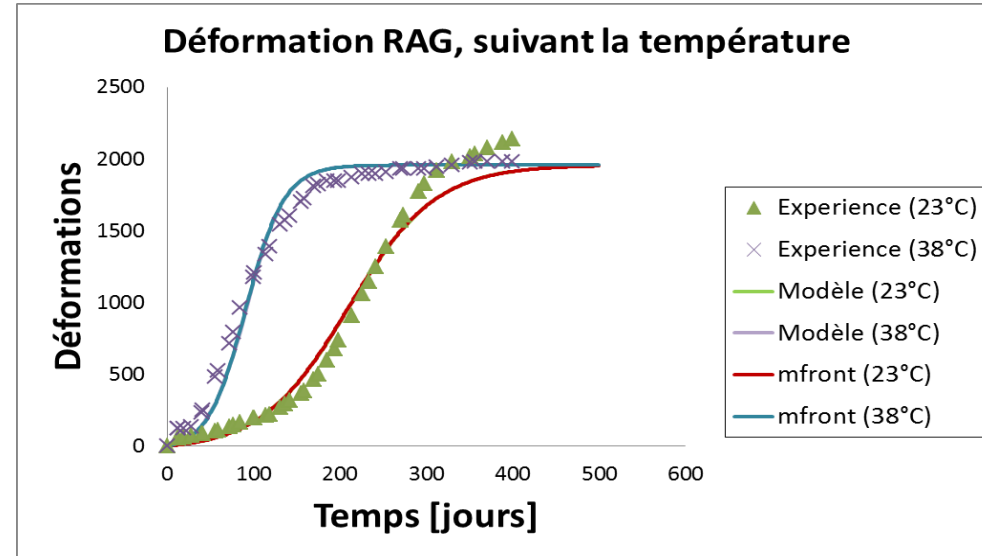
Déformation isotrope:

$$\varepsilon_r(t) \approx \Phi_r < A(t) - A_0 >_+$$

A : Avancement de la réaction(Compris entre 0 et 1)

Φ_r : Volume de granulats réactifs

A_0 : Seuil d'activation



Comparaison du modèle avec les essais de Larive*

Evolution de la réaction:

$$\frac{\partial A(t)}{\partial t} = f(T, S_l, S_{l0}, E_a, \tau_L, \tau_c)$$

S_l : le degrés de saturation

T : la température

S_{l0} : le seuil de référence

E_a : l'énergie d'activation

τ_L et τ_c : paramètres matériaux

*Larive, C. (1997). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*.

Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Modèles

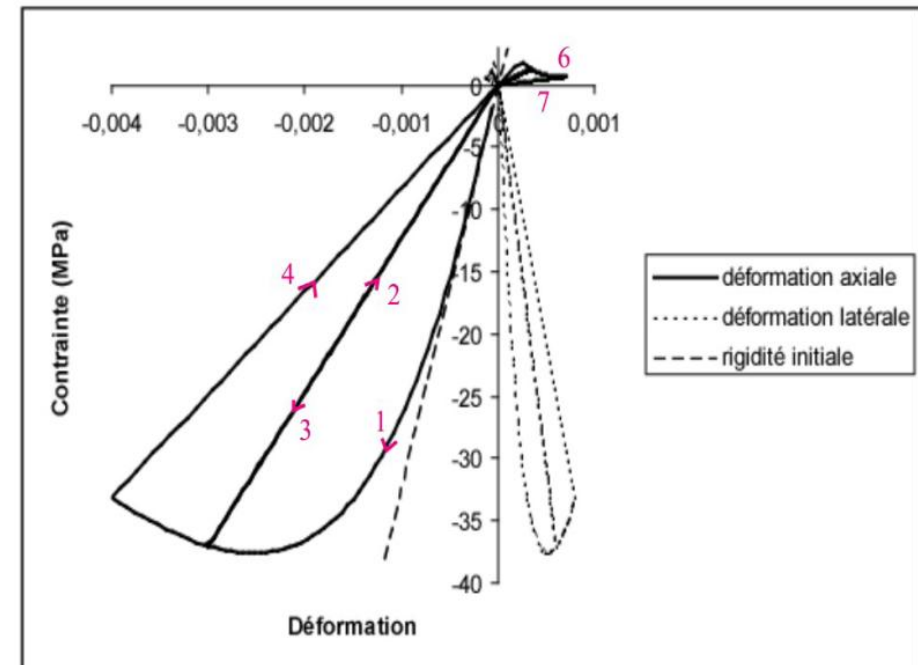
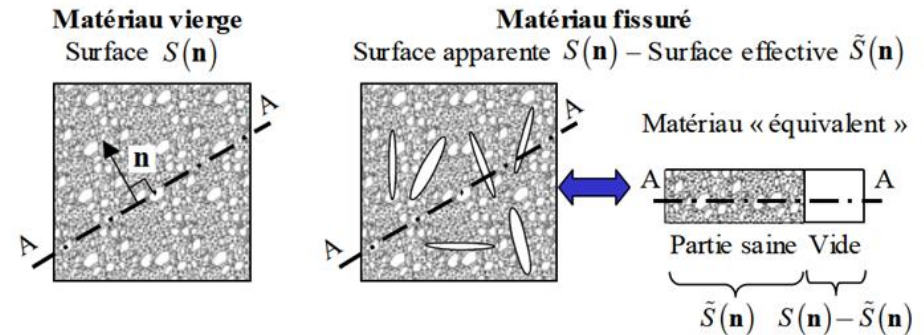
Fluage → BurgerAgeing

Endommagement → MAZARS

L'endommagement $D = \frac{\tilde{S}(\vec{n})}{S(\vec{n})}$

- Modèle elasto-endommageable
- Dissymétrie traction/compression
- Ne prend pas en compte la refermeture de fissures

➤ Critère en déformation : $\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \underline{\underline{\varepsilon}} \rangle_+^2}$

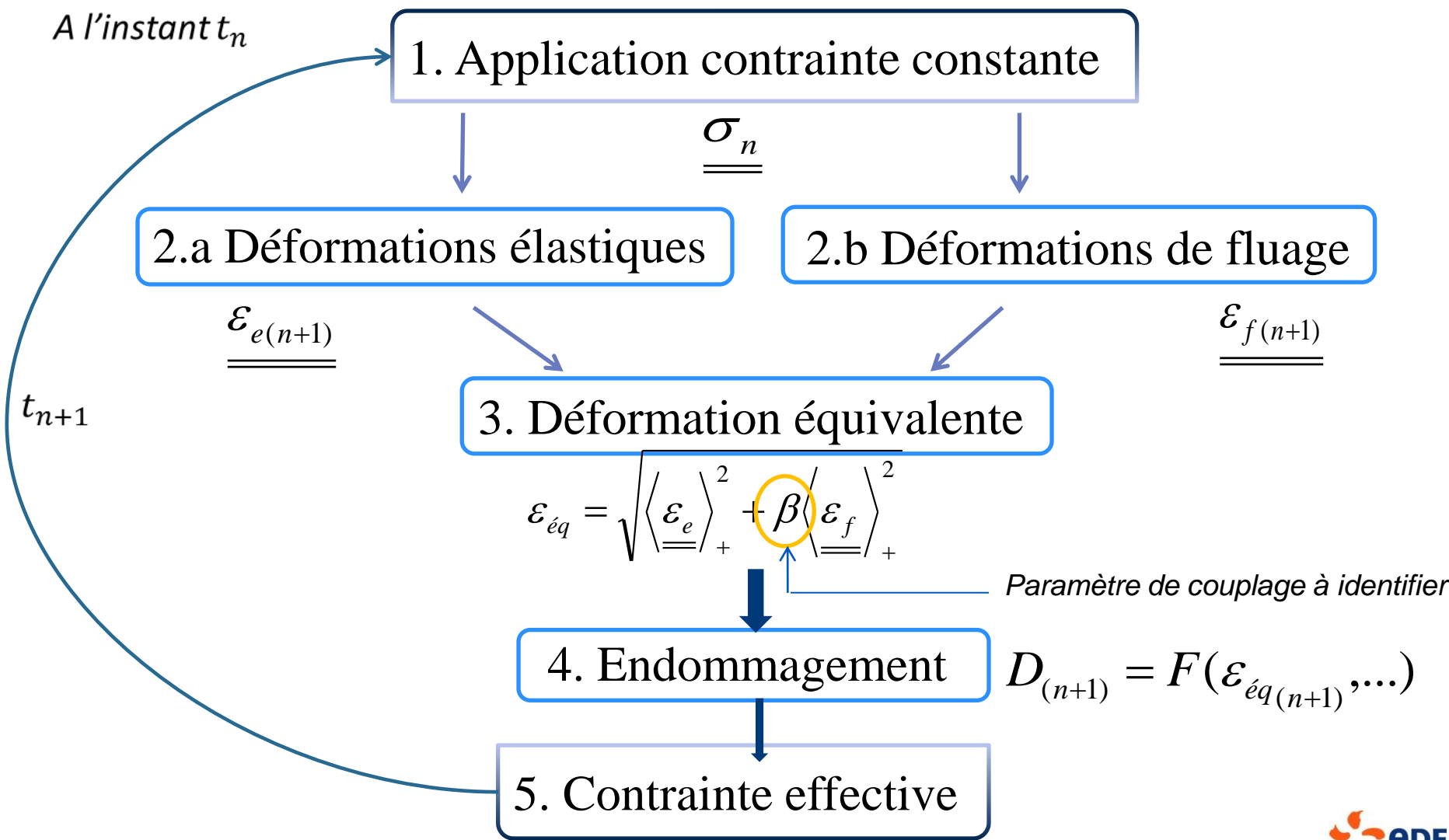


Réponse contrainte-déformation du modèle de Mazars pour une sollicitation 1D.

Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Modèles

Fluage – Endommagement



Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Modèles

Fluage – Endommagement -RAG

↳ Sous MFRONT

- Lister l'ensemble des paramètres matériaux des modèles
- Fusionner les définitions des variables internes / auxiliaires
- Fusionner les sections « integrator » de Mazars et BurgerAgeing
- Remplacer la contrainte par la contrainte effective dans les équation de BurgerAgeing

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D}$$

- Introduire le paramètre de couplage β dans la définition de la déformation équivalente

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\left\langle \varepsilon_e \right\rangle_+^2 + \beta \left\langle \varepsilon_f \right\rangle_+^2}$$

- Calculer la déformation liée à la RAG et la retranchée à la déformation totale

$$\varepsilon_r(t) \approx \Phi_r < A(t) - A_0 >_+$$

● Rapide (une journée pour un stagiaire)



Sous ASTER (??jours)

● Couplage Fort



Sous ASTER (chaînage)

Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Validations

Couplage Fluage-Endommagement

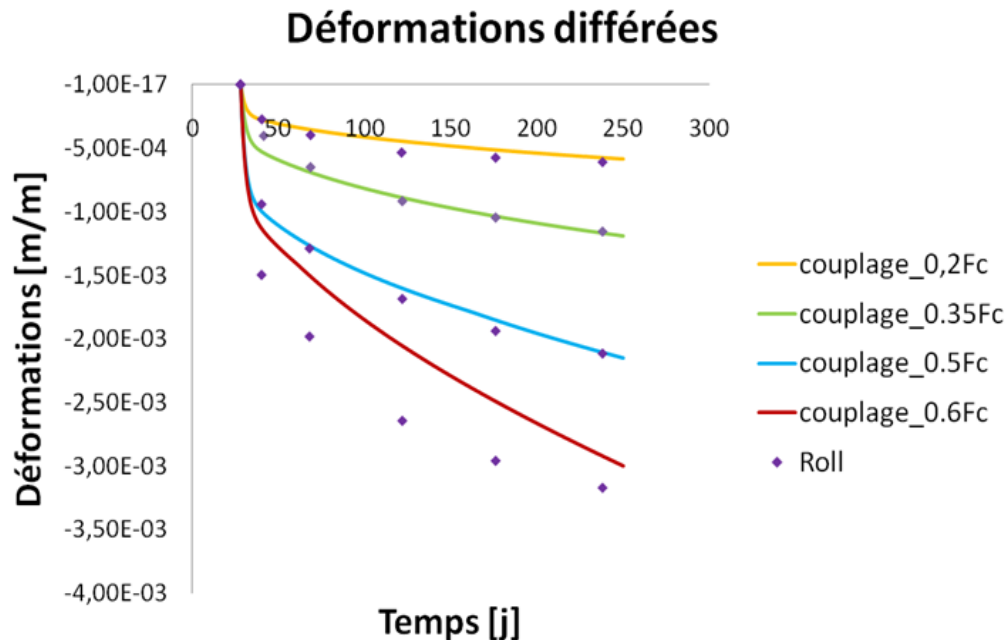


- Essai de Capinterie : Fluage en traction
- Essai de Briffault : Essai de traction à l'anneau
- Essai thermomécanique non homogène
- Essais de Roll : Essais de fluage propre pour différentes charges

6 niveaux de charge étudié: $0.2F_c$, $0.35F_c$, $0.5F_c$ et $0.6F_c$.
(F_c la résistance en compression du béton)



- Résultats proches des essais expérimentaux

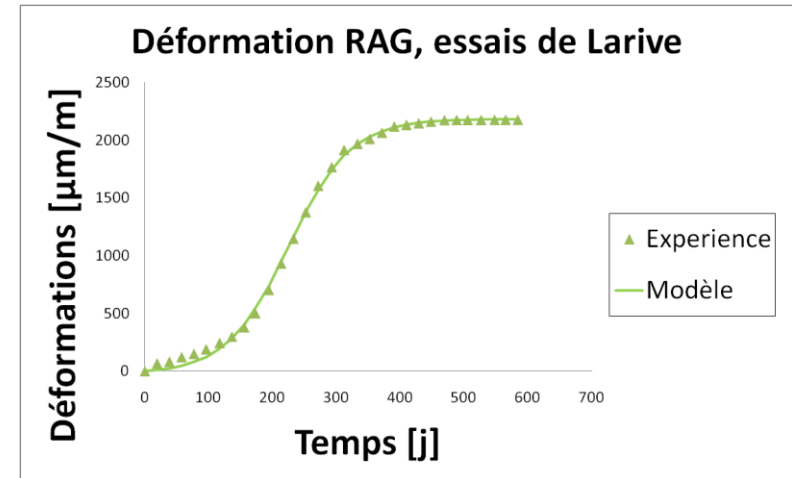
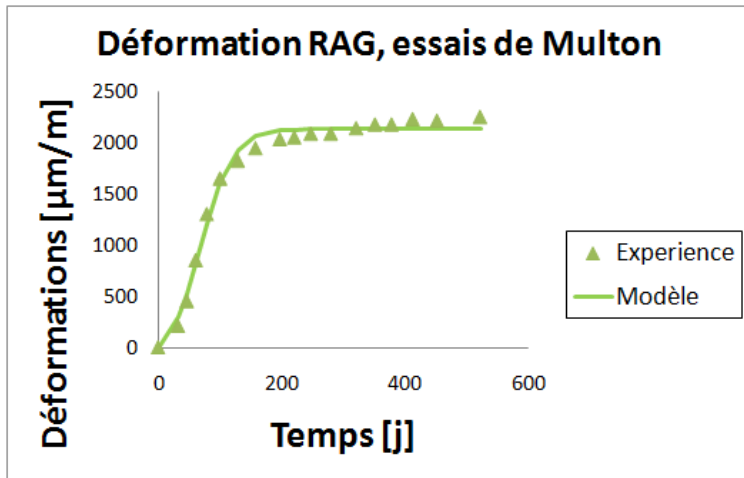


Comparaison des déformations entre simulation et points expérimentaux

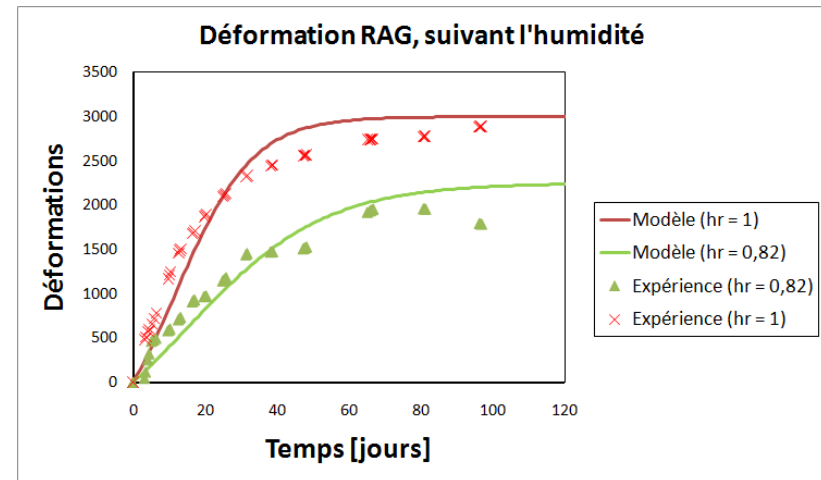
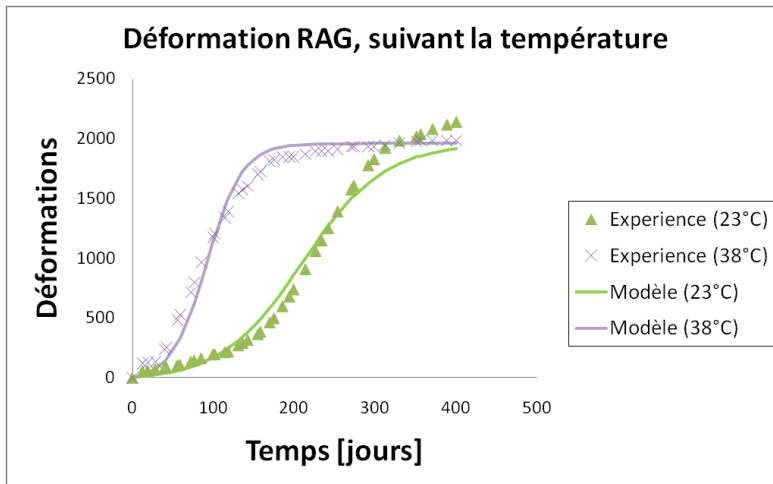
Couplage Fluage-Endommagement-RAG

Validations

RAG



Essais de gonflement à température et humidité constante



Essais de gonflement à température et humidité variables

Sommaire

1 Amélioration du modèle de fluage

1-1 Définition du fluage

1-2 Développements

1-3 Validation

2 Couplage Endommagement – Fluage - RAG

2-1 Définition de la RAG

2-2 Modèles

2-2 Validations

3 Application industrielle

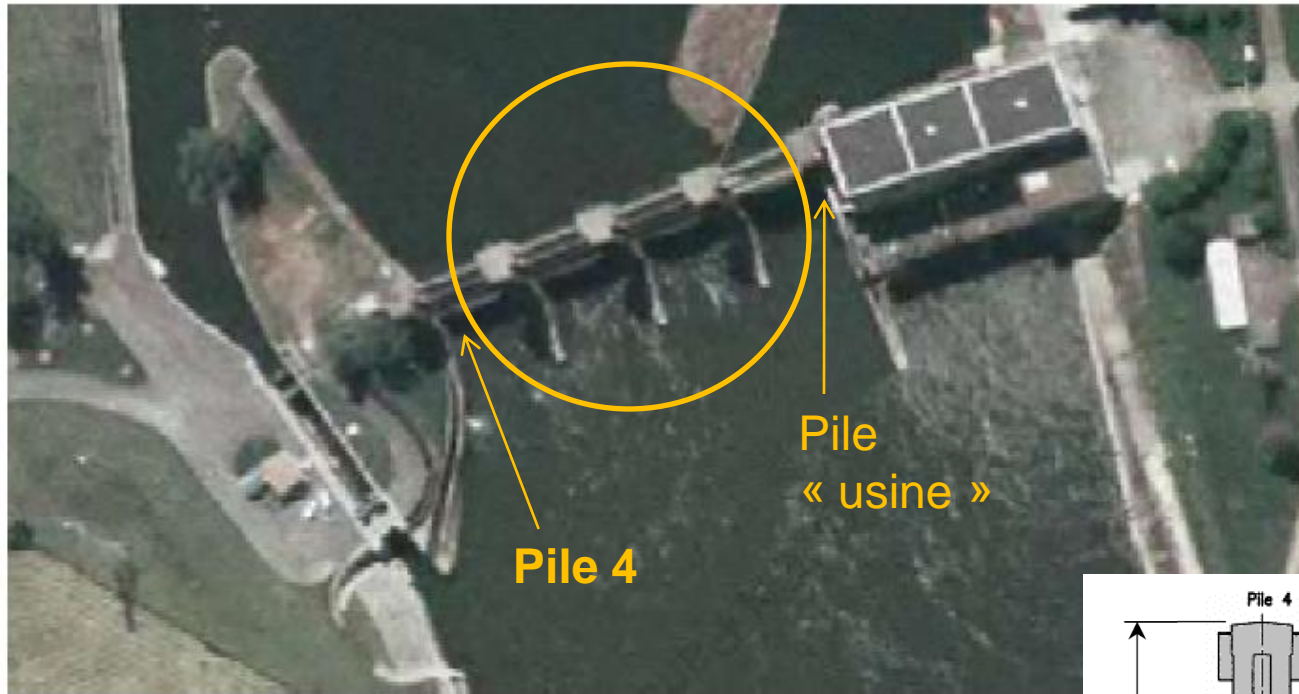
2-1 Présentation du barrage

2-2 Calcul hydrique

2-2 Calcul mécanique

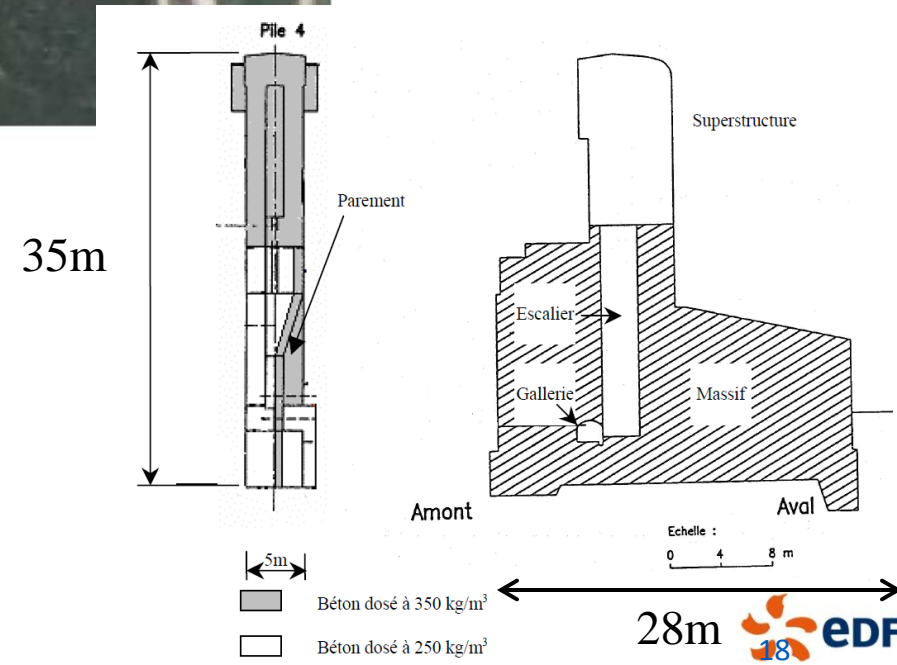
Barrage

Présentation



- 3 piles rivière
- 1 pile « usine » rive gauche
- **1 pile rive droite, la pile 4**

Etude de la pile 4

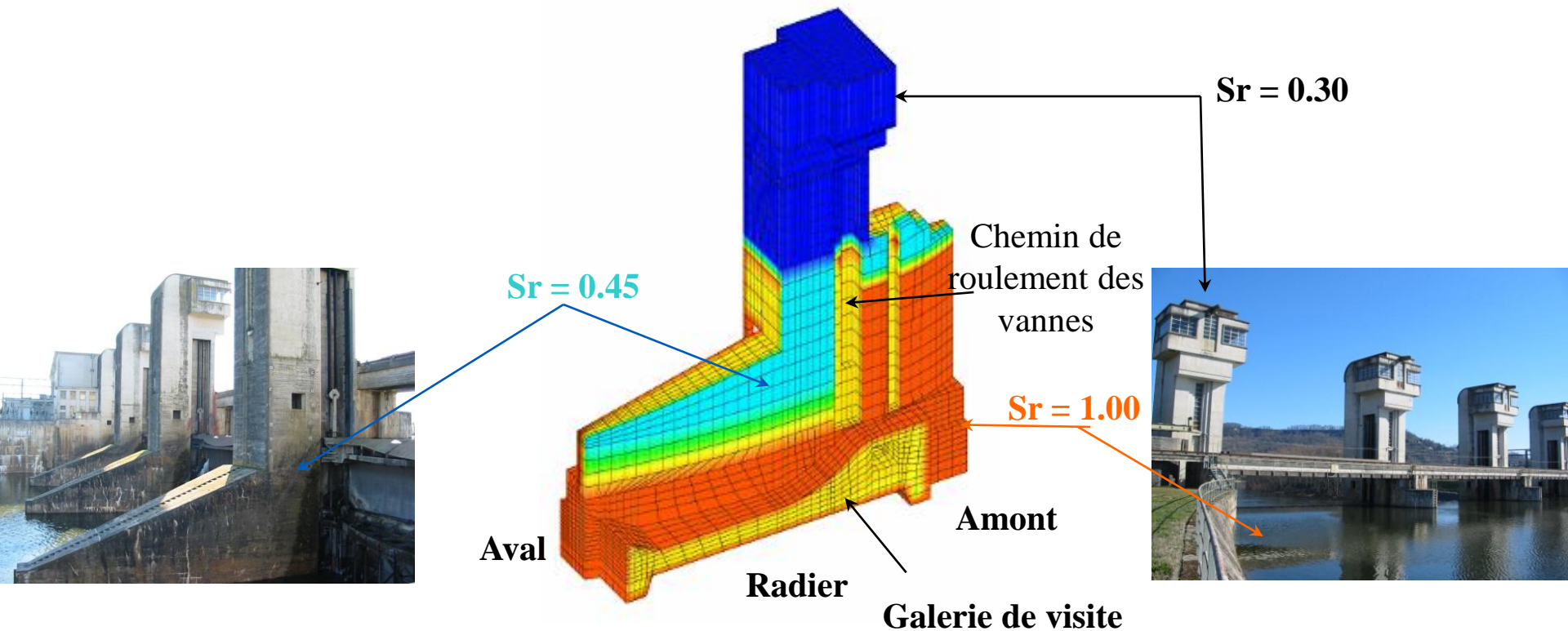


Barrage

Calcul Hydrique

Conditions aux limites

- Température : 20°C
- Degré de saturation initiale : **0,85**
_0,45 dans les zones proches de l'eau, **0,3** en superstructure



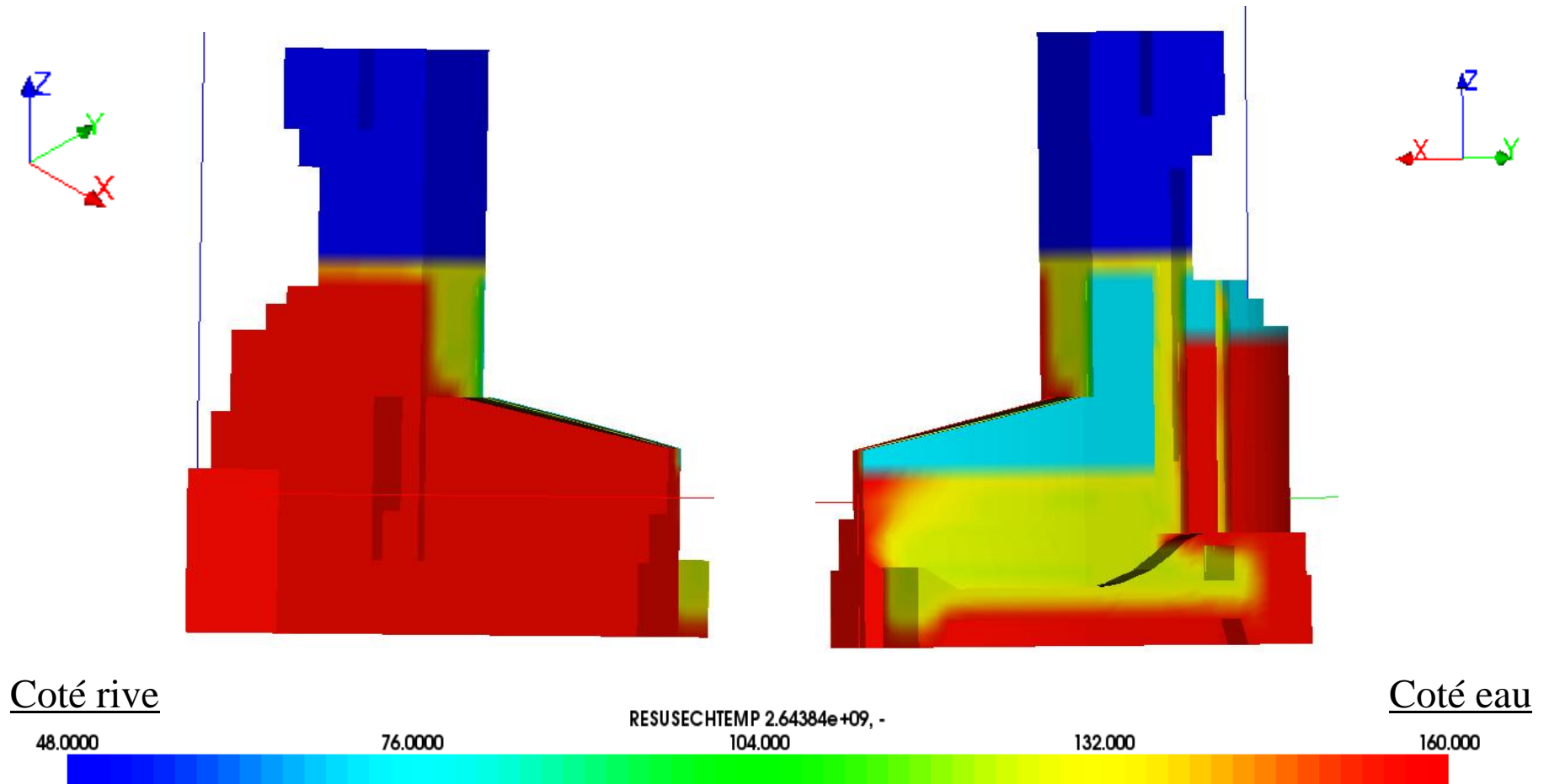
Le calcul se fait sur 81 ans (de 1951 à 2032)

Barrage

Calcul Hydrique

Résultats

➡ Dernier instant (2032)



Barrage

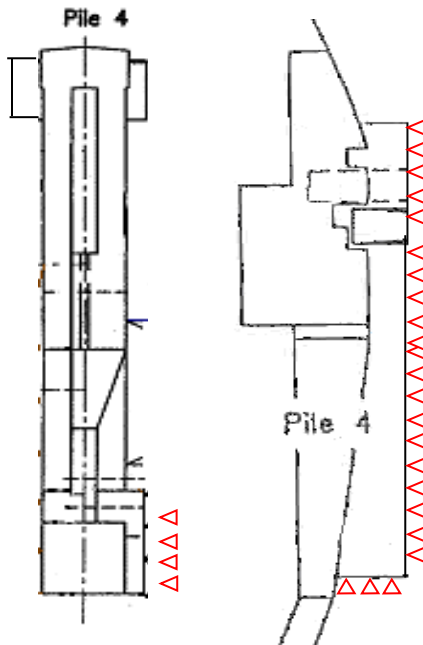
Calcul Mécanique

Conditions aux limites

Blocage du radier

Vue en élévation

Vue en plan



△ Conditions de blocage

Poussées sans eau

Poussée de la terre

$0.0MPa$

Coté terre

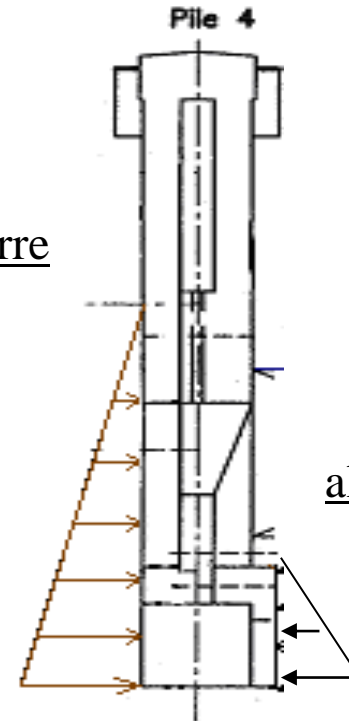
$0.11MPa$

Poussée des
alluvions et sables

$0.0MPa$

$0.03MPa$

⊕ La pesanteur



Barrage

Calcul Mécanique

Résultats

→ Comparaison des résultats avec un modèle de référence (sans RAG et sans eau)

✦ Contrainte

modèle de référence

modèle développé

RESUMECASIEF_ELGA 1001, -

RESUMECASIEF_ELGA 2.59459e+09, -

0.504336

0.519712

-0.457993

-0.466646

-1.42032

-1.45300

-2.38265

-2.43936

-3.34498

-3.42572

SIYY (Instant final :2032)

SIYY (Instant final :2032)



Répartition des contraintes presque identiques entre les deux modèles. Contraintes de retrait induites par des conditions aux limites non physiques

Barrage

Calcul Mécanique

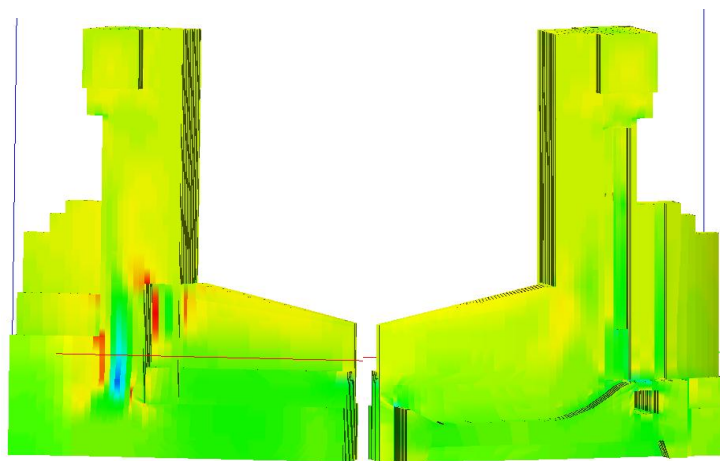
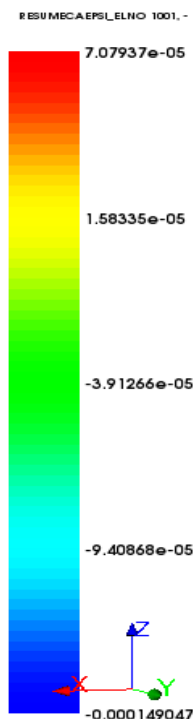
Résultats

→ Comparaison des résultats avec un modèle de référence (sans RAG sans RAG et sans eau)

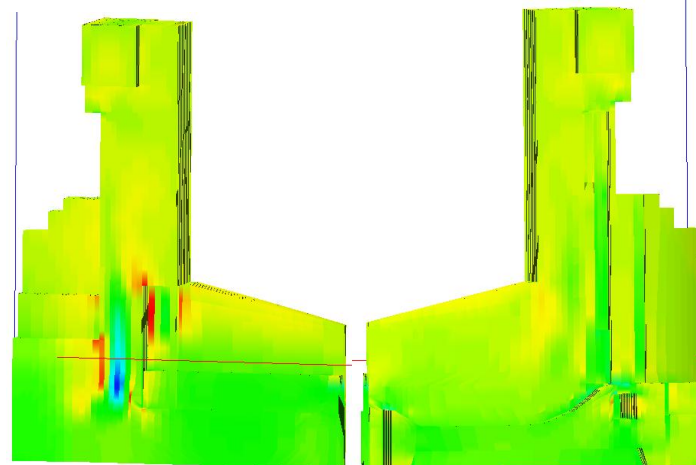
✦ Déformation

modèle de référence

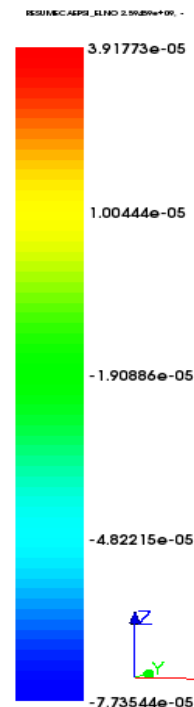
modèle développé



EPXX (Instant final :2032)



EPXX (Instant final :2032)



● Répartition des déformation presque identique entre les deux modèles

Conclusions & Perspectives

Conclusions

- ▶ **Amélioration du modèle de fluage (Effet de l'âge et de la température)**
 - Résultats proches des essais expérimentaux
- ▶ **Possibilité d'un Couplage Fort Fluage-Endommagement-RAG**
 - Chaque modèle est validé sur des essais en laboratoire

MFRONT

Perspectives



Stage 2015

- ▶ **Valider le Couplage Fluage-Endommagement-RAG**
- ▶ **Amélioration du Modèle**
 - Introduction d'un endommagement local lié à la RAG
 - Introduction d'un critère de non localité
- ▶ **Amélioration du modèle d'endommagement (trop simple)**
 - Prise en compte de la refermeture de fissures
 - Prise en compte des déformations résiduelles

Questions

