



Laboratoire
Matériaux et Durabilité des Constructions

INSA - Université Paul Sabatier - Toulouse - France

IMPACT DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES EN BETON SENSIBLES AU FLUAGE

Vidal T.¹, Ladaoui W.¹, Sellier A.¹, Bourbon X.²

¹Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions,
INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

²Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs



135, Avenue de Rangueil 31077 Toulouse Cedex 4 France - <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr>

Contexte et Objectifs

Programme expérimental

Résultats expérimentaux

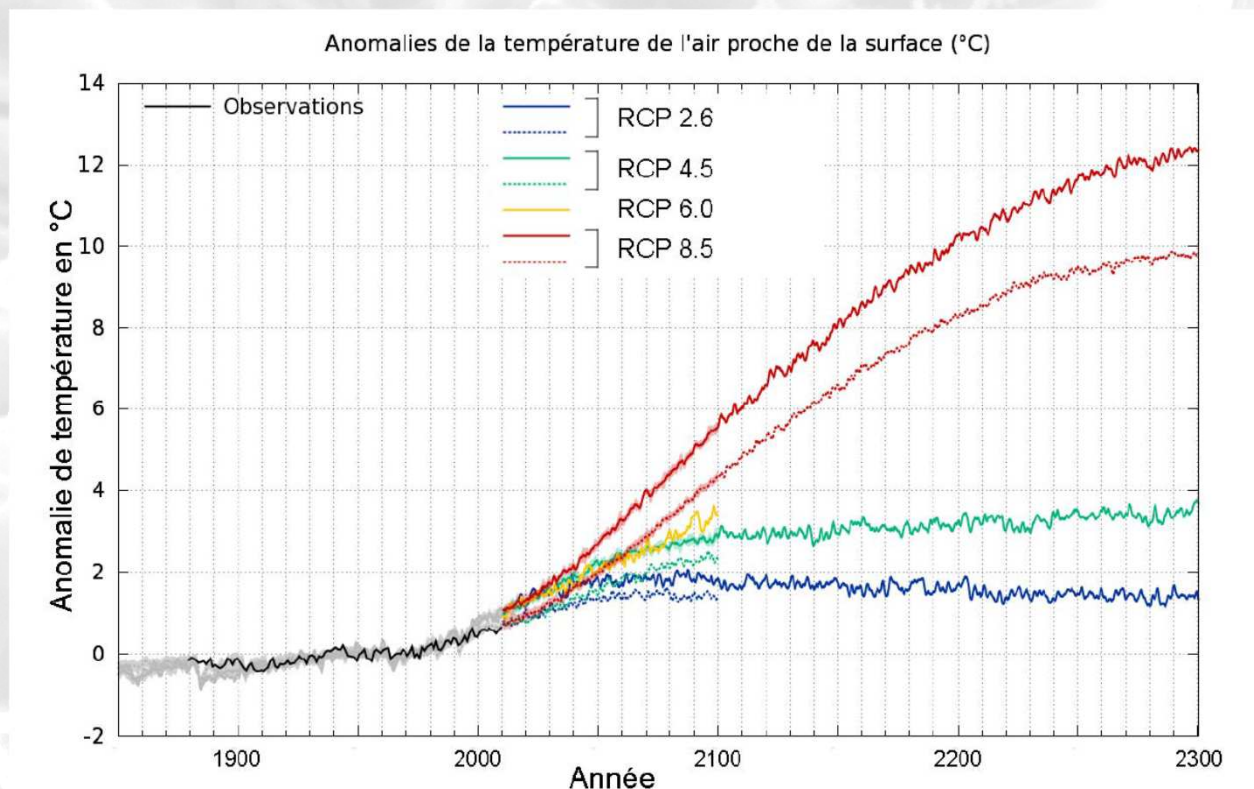
Présentation du modèle rhéologique

Simulations

Conclusions

Réchauffement climatique

Prévisions GIEC : hausse de la température moyenne d'ici 2100 entre 1,1 et 6,4°C suivant modèles simulation du climat + incertitudes sur évolutions des émissions GES



« Changement climatique les nouvelles simulations françaises pour le prochain rapport GIEC »
[Darcher 2012]

Cas structures sensibles aux **déformations différées retrait-fluage** : centrales nucléaires, ouvrages, structures massives, ...

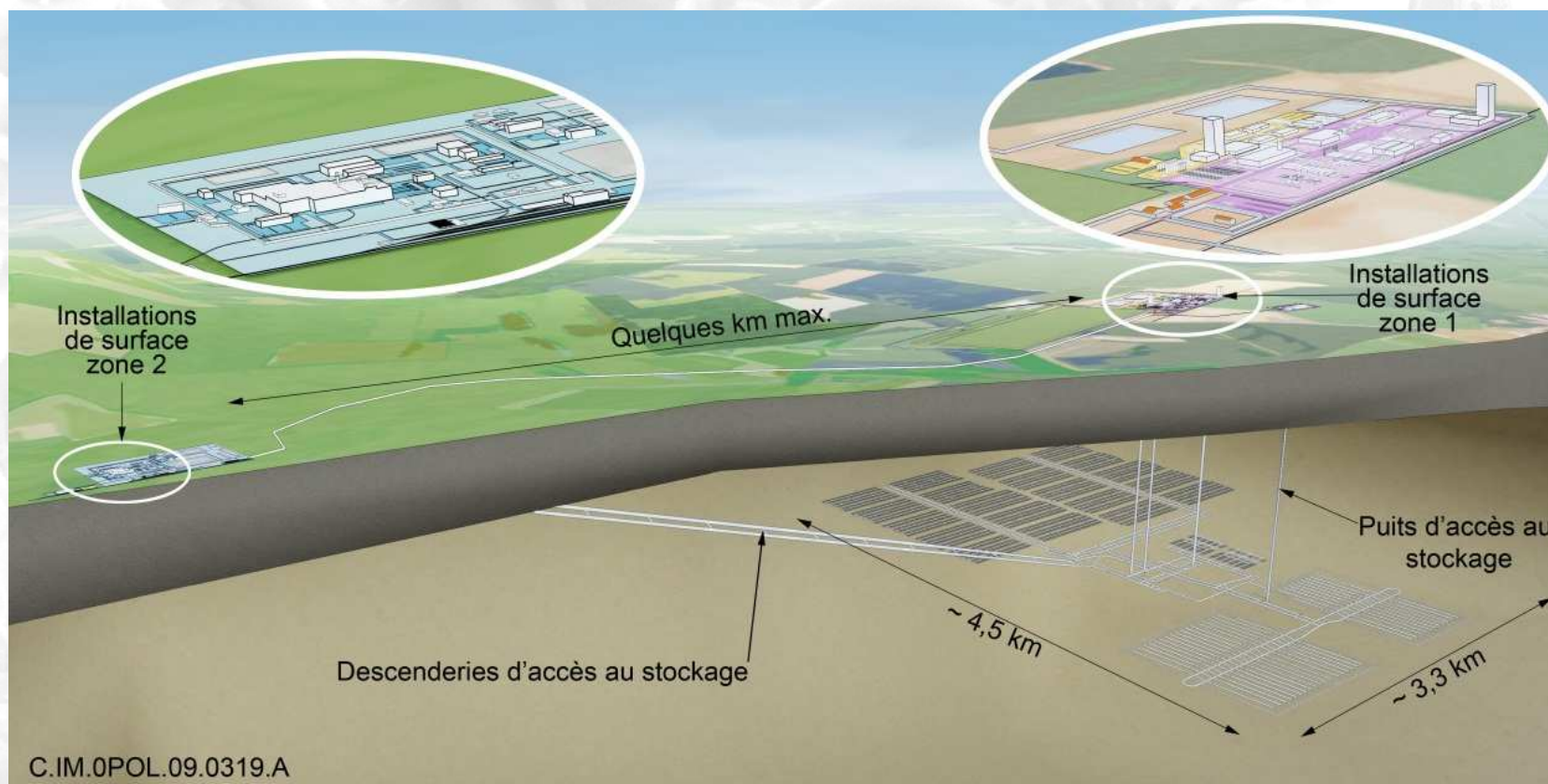


Conditions aux limites : gammes de températures modérées (exothermie due la radioactivité, hydratation, etc.)

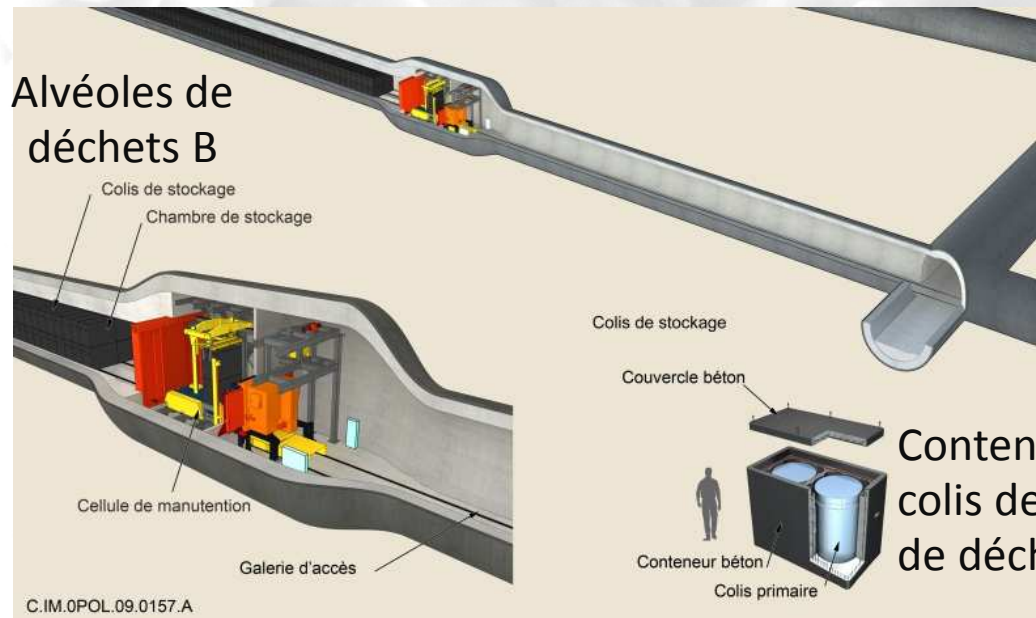
Règles de dimensionnement (EN1992-1-2, 2005 Eurocode2 Comportement au feu) :

⇒ **Pas de prise en compte de l'impact de $T^{\circ}\text{C} < 100^{\circ}\text{C}$**

Projet Andra : réalisation des ouvrages de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde (500 mètres)



Évolution des déformations différées en T°C à long terme des BHP utilisés pour la réalisation de la barrière ouvragée: alvéoles et conteneurs de stockage de déchets B (Ladaoui 2010)



Déchets radioactifs :

- Exothermie (60°C à 70°C)
- Très lente décroissance de T°C

Objectifs

- Quantification des amplitudes de fluage en T°C pour les bétons Andra
- Compréhension des comportements différés des bétons en T°C

Matériaux : 4 BHP

**4 BHP à base de
CEM I et CEM V**

**2 non fibrés
CEM I & CEM V**

Alvéoles de déchets B

**2 fibrés
CEM IF & CEM VF**

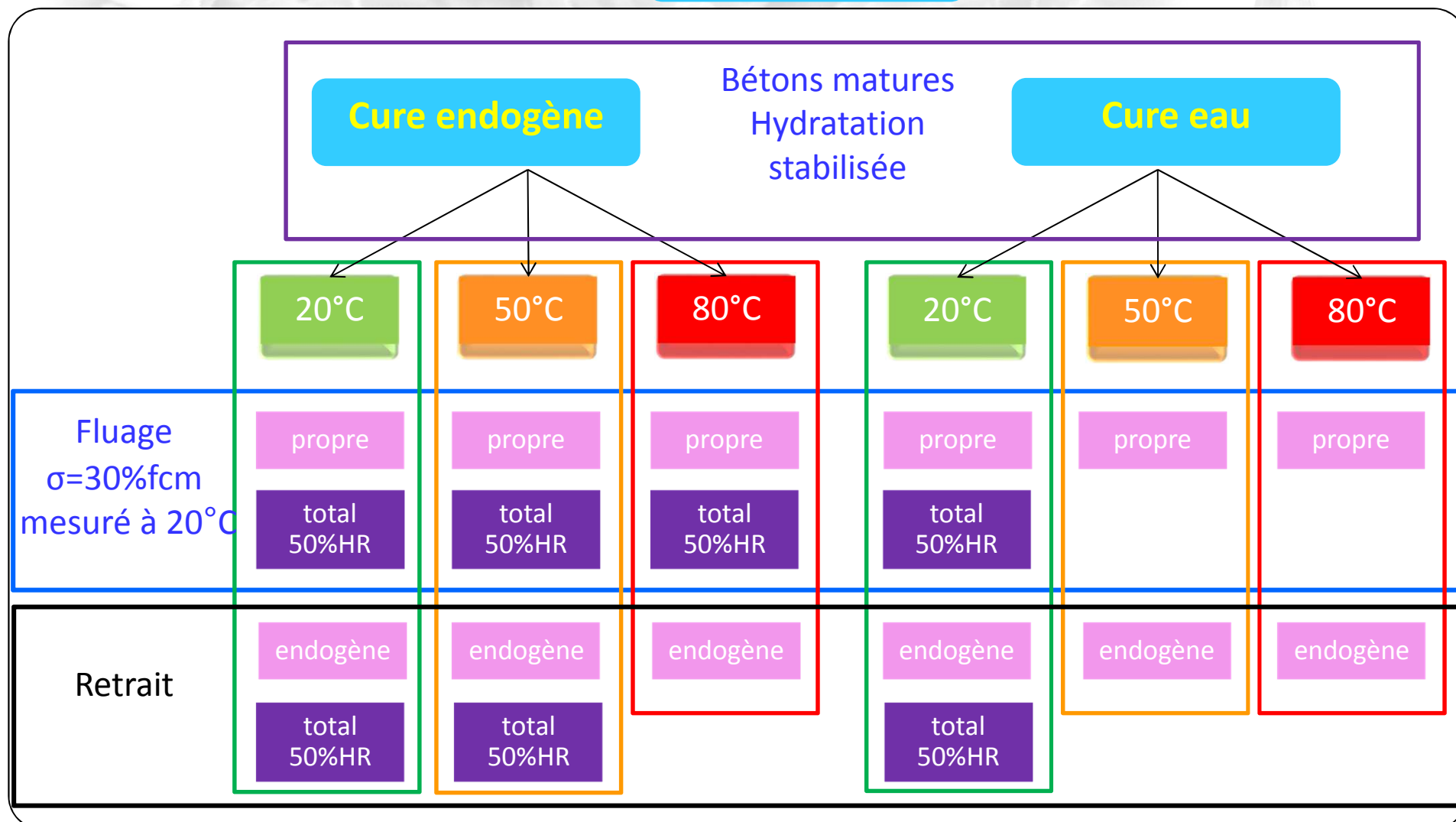
Conteneurs de colis de
stockage de déchets B

Caractérisation des matériaux :

Resistance en compression f_{cm} + Module d'élasticité E_{cm}

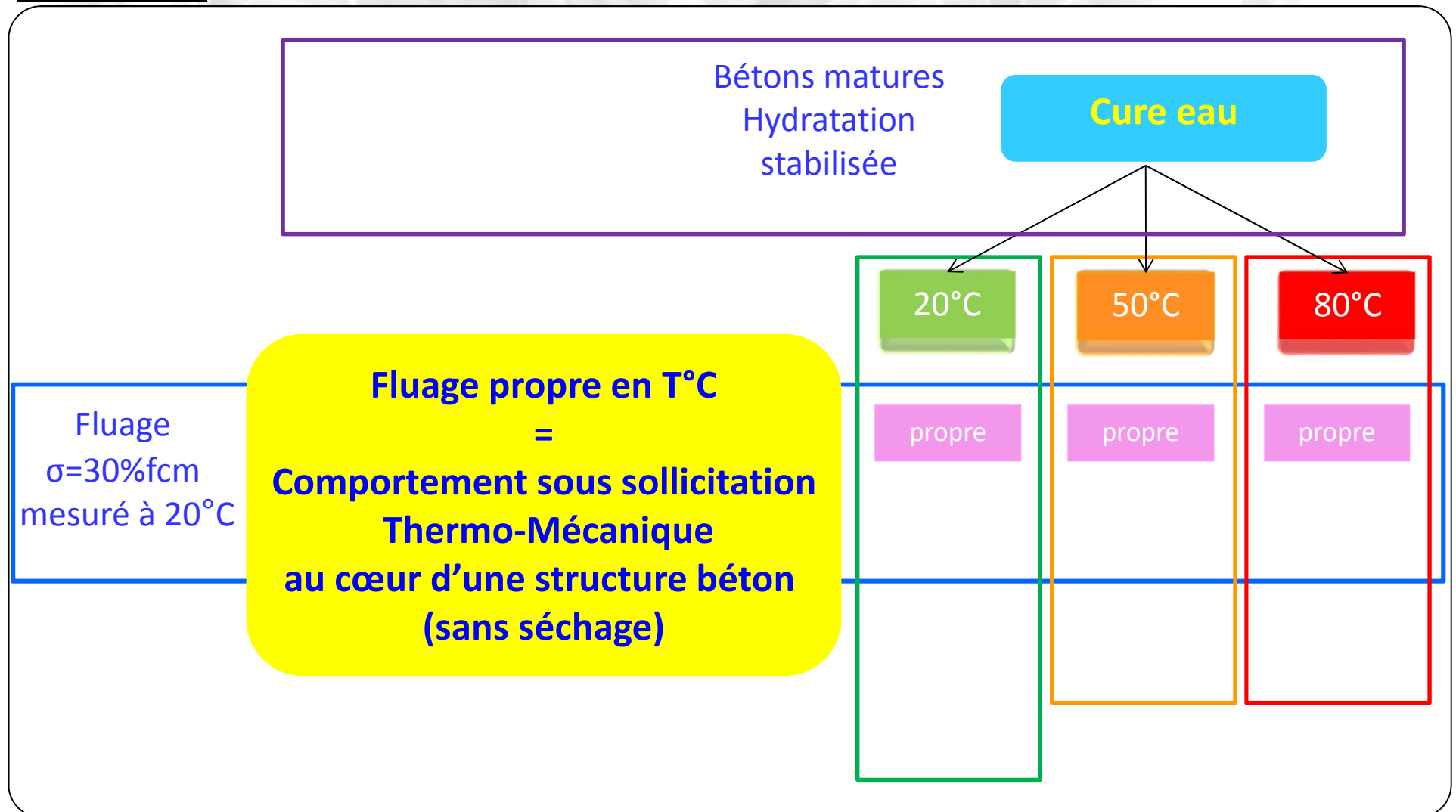
	Propriétés Mécaniques	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
différentes échéances (28 j, 90j, date de mise en charge) et différents coulages	f_{cm} [MPa]	> 74	> 65	> 95	> 83
	E_{cm} [GPa]	> 42,1	> 40,7	> 44,6	> 41,5

4 BHP
CEM I - IF - V - VF



Résultats présentés (dans la perspective des simulations ultérieures)

4 BHP
CEM I - IF - V - VF

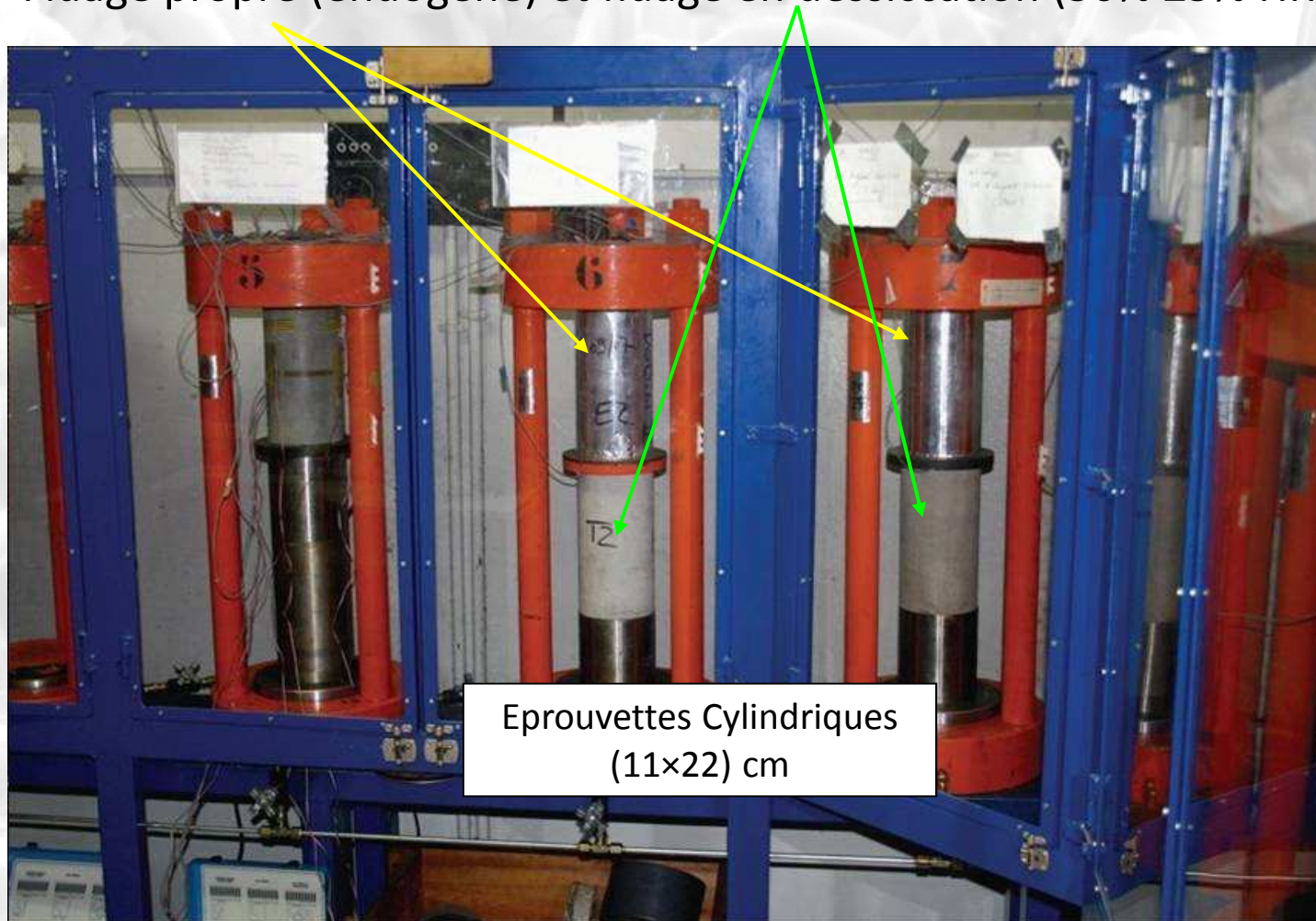


Programme expérimental

Dispositifs de fluage en compression uniaxiale

Fluage propre et en dessiccation à 20°C

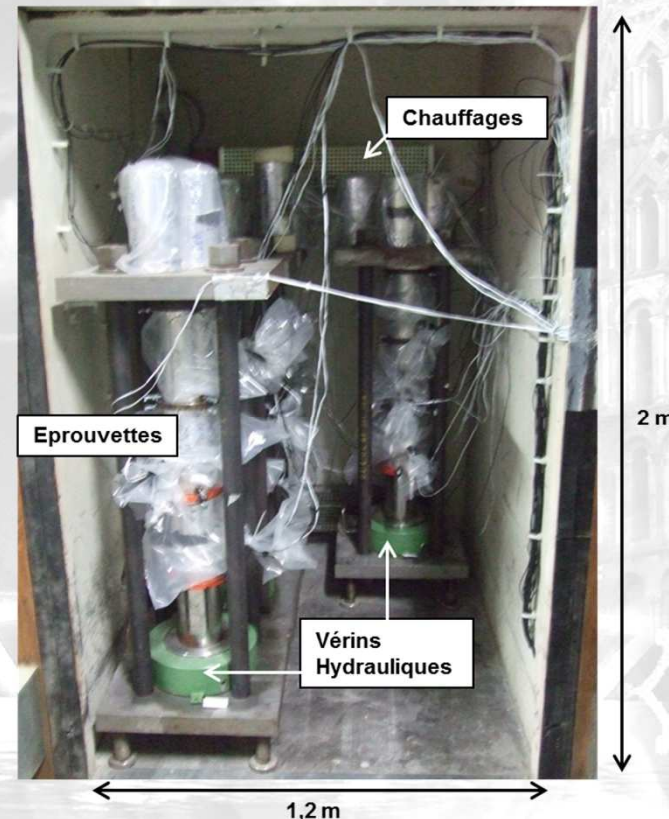
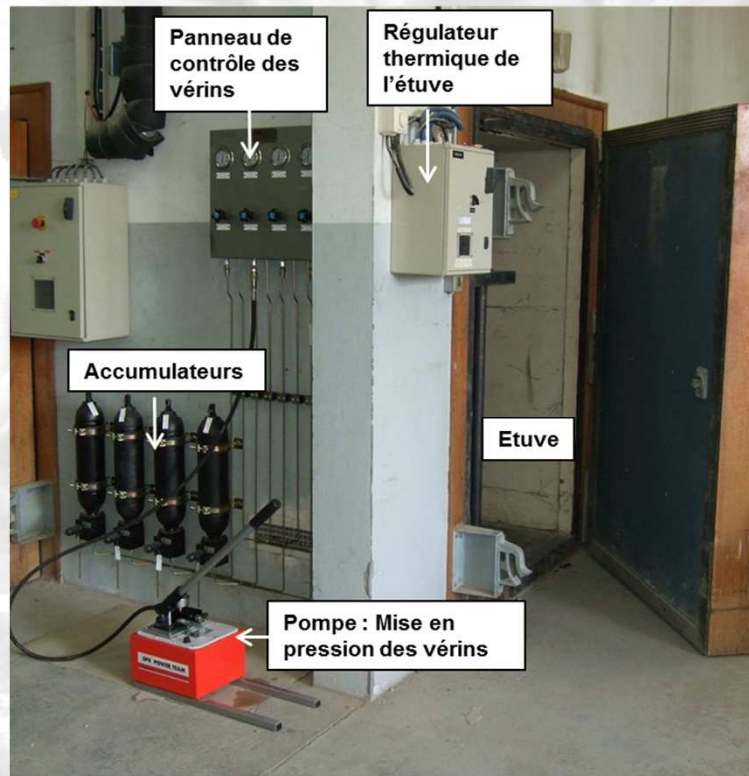
Fluage propre (endogène) et fluage en dessiccation (50% $\pm$ 5% HR)



Chronologie sollicitation thermo-(hydro)-mécanique: mise en T°C puis application fluage

Température ($50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)

Contrainte de compression uniaxiale
constante 30% f_{cm}

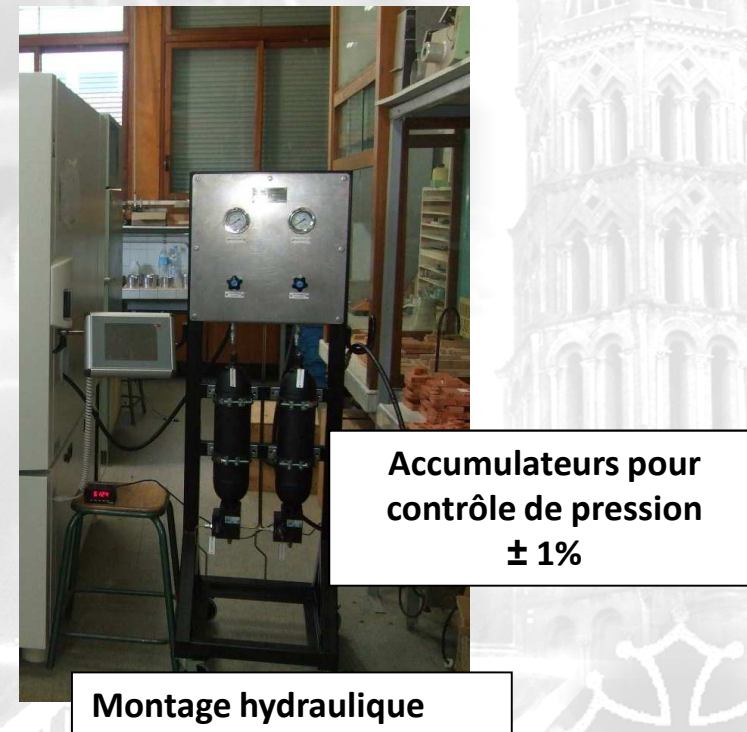
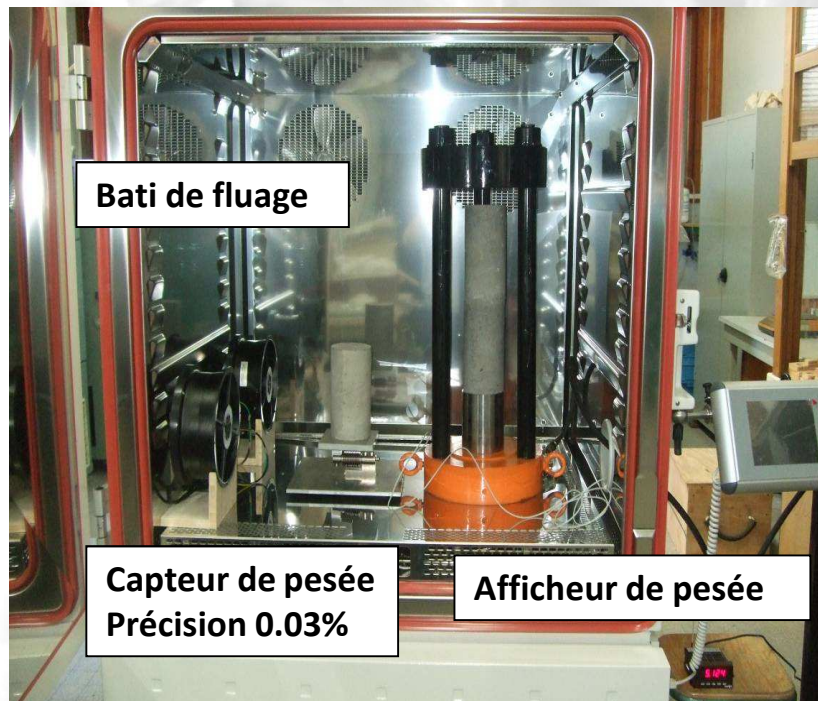


Programme expérimental

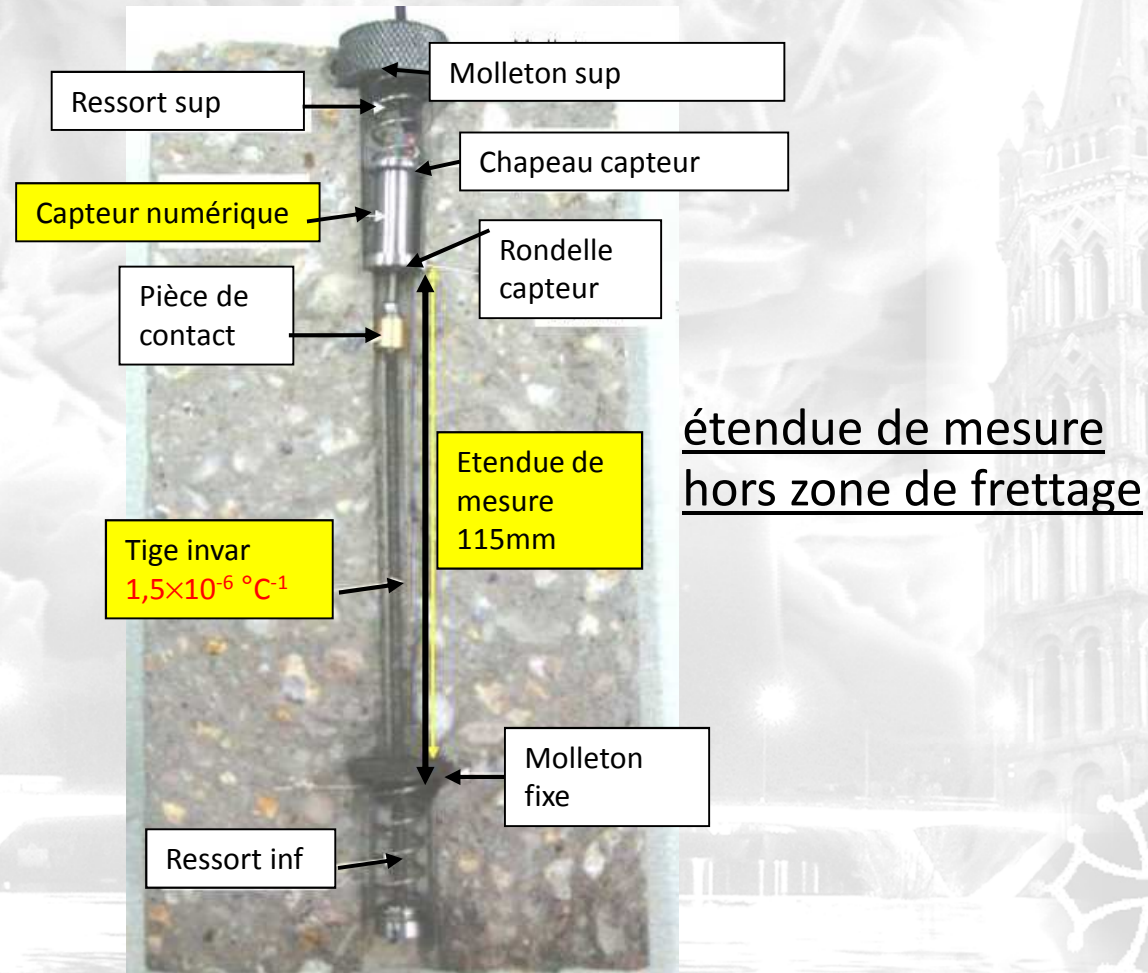
Fluage en dessiccation en température (50 et 80°C)

Température (50°C $\pm$ 2°C et 80°C $\pm$ 2°C) et Humidité relative variable

Enceinte climatique
T: +10°C à +90°C, $\pm 0,1^\circ\text{C}$
HR: 10% à 98%, $\pm 1\%\text{HR}$



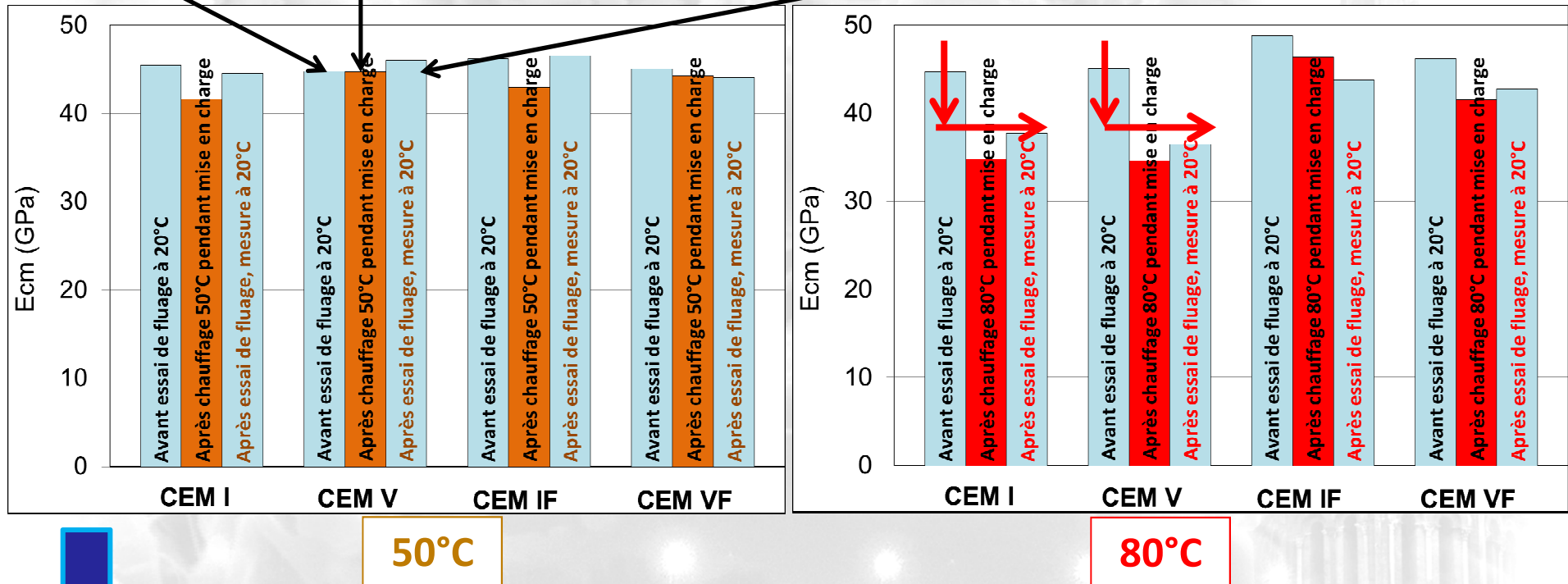
Systèmes de mesure : capteurs de déplacement internes à l'éprouvette



Résultats expérimentaux

Comparaison modules d'élasticité 20°C et après 50°C et 80°C :

Avant fluage/pendant mise en fluage (en T°C) /après fluage (mesure à 20°C)



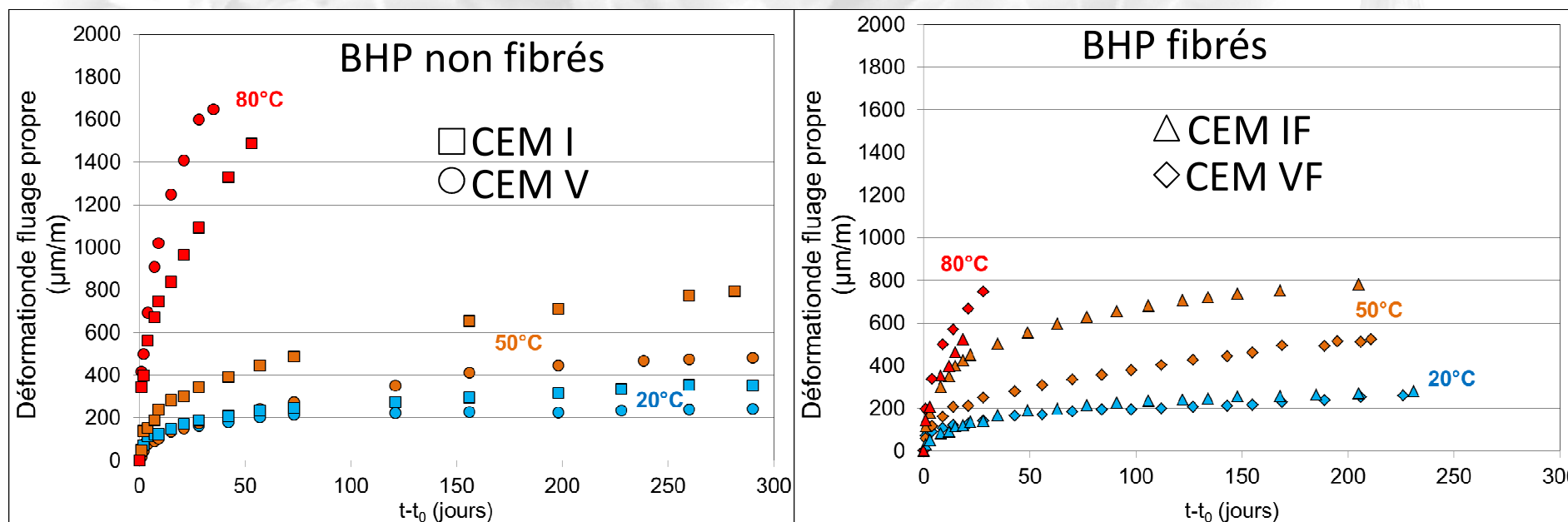
Endommagement d'origine thermique

Hypothèses :

dilatation différentielle entre pâte et granulat,
surpression dans les pores due à la dilatation de l'eau, ...

Action des fibres

Evolution des déformations de fluage propre en température



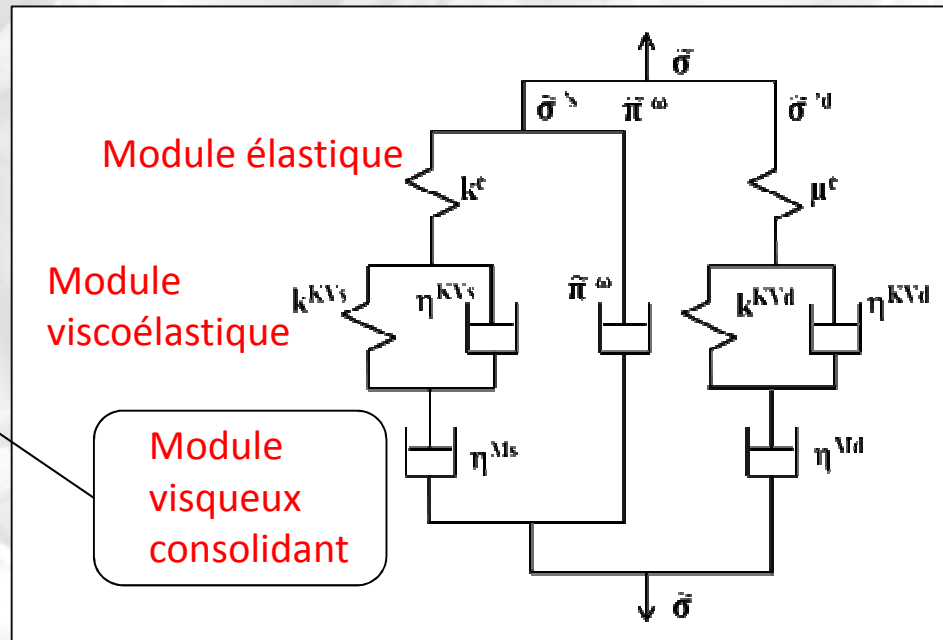
50°C : Amplitudes x 2 à 3,7
80°C : Amplitudes au bout de 20 jours
CEM I : x 5,7 CEM IF : x 4,4
CEM V : x 9,2 CEM VF : x 5,3

Présentation du modèle rhéologique

Modèle rhéologique (Sellier 2006)

Poro-mécanique
visco-élastique
consolidant

ϵ^{Mk} caractéristique
intrinsèque $\rightarrow$ potentiel
de déformation différée



- Prise en compte effets $T^\circ C$

Endommagement thermique

$$D_{th} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T - T_{ref}}{\Delta T_k}\right)\right)$$

$$\sigma = \tilde{\sigma} \cdot (1 - D_c) \cdot (1 - D_{th})$$

Loi d'activation thermique type Arrhenius

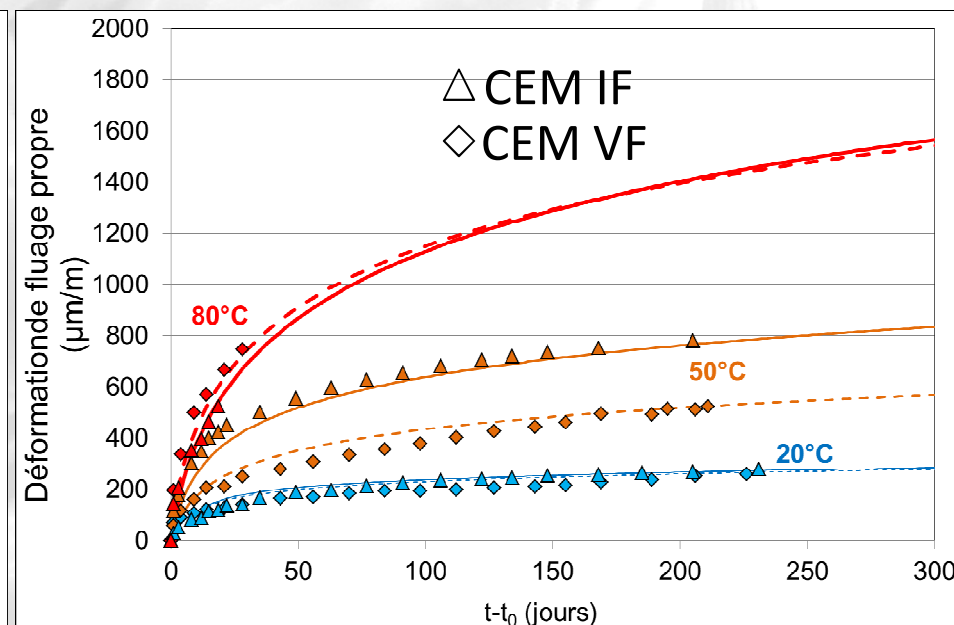
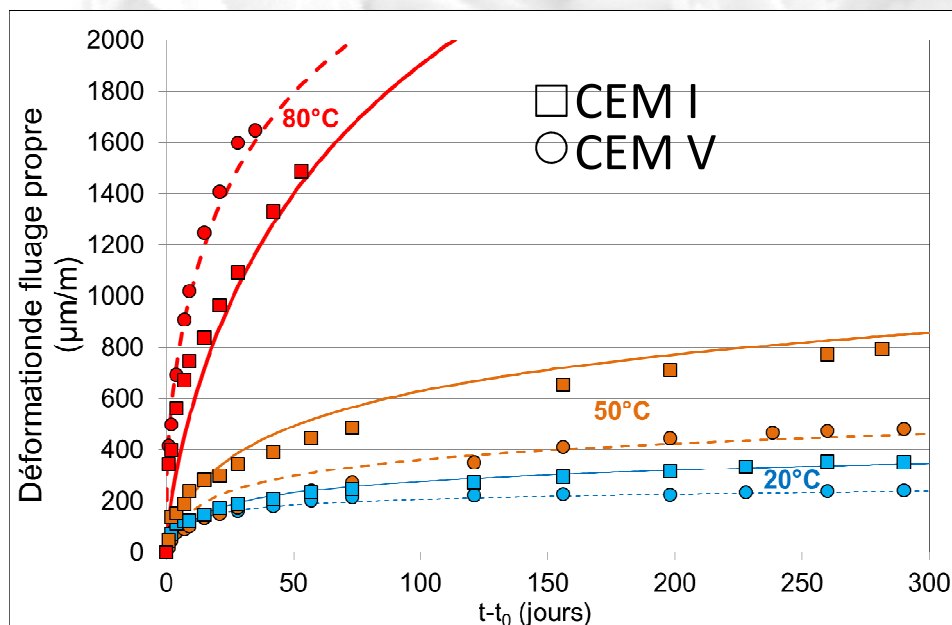
- Toutes les viscosités $\downarrow$ avec T

$$\frac{\eta(T)}{\eta^0(T_{ref})} = \exp\left(\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

$\epsilon^{Mk} \uparrow$ avec T

$$\frac{\epsilon^{Mk}(T)}{\epsilon^{Mk0}(T_{ref})} = \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

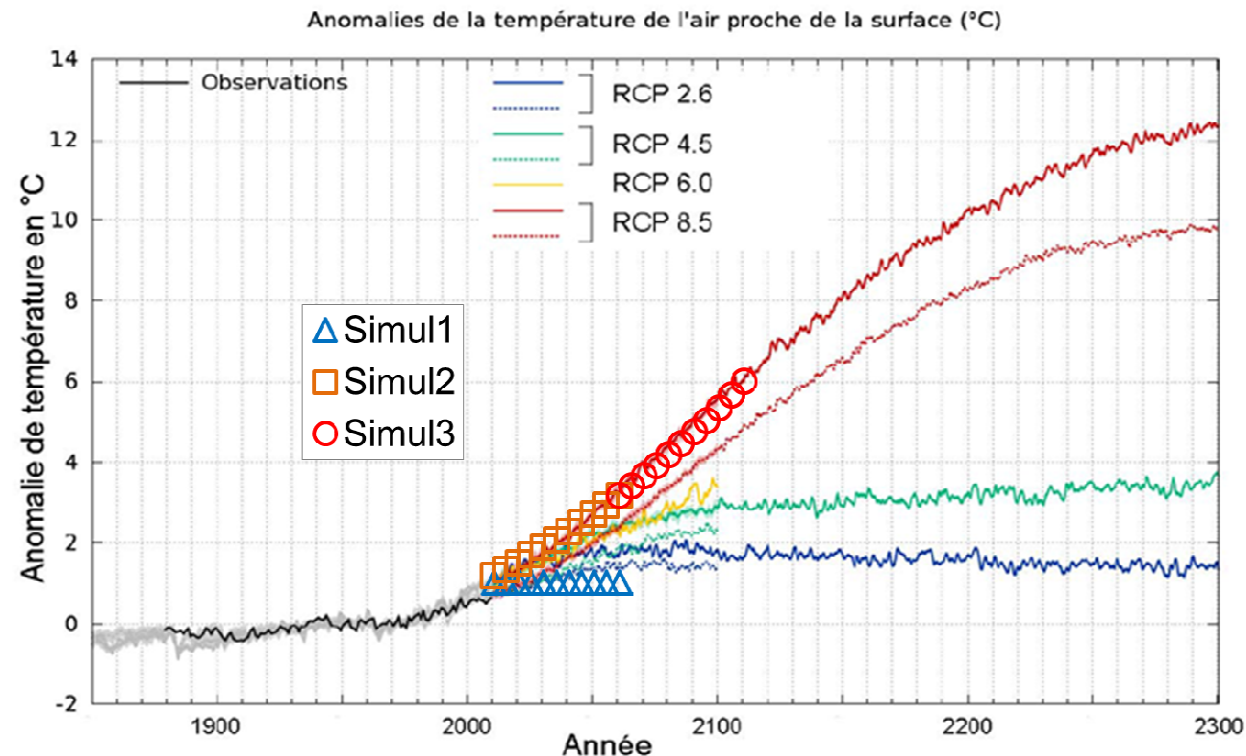
Calage du modèle sur résultats expérimentaux



Paramètres	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
ε^k	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$
Energie activation Q (J/mol)	$1,6 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$1,4 \times 10^4$
$D_{th80^\circ\text{C}}$ expérimental	0,22	0,23	0,05	0,10
$D_{th80^\circ\text{C}}$ modèle	0,28	0,45	0,05	0,15
ΔT_k (K)	91	50	585	185

proche de celle
régissant la
viscosité de l'eau

Simulations Fluage
propre BHP CEMI
fluage sous 30% fcm
au cœur d'un
ouvrage massif en
béton
T°C à Bordeaux



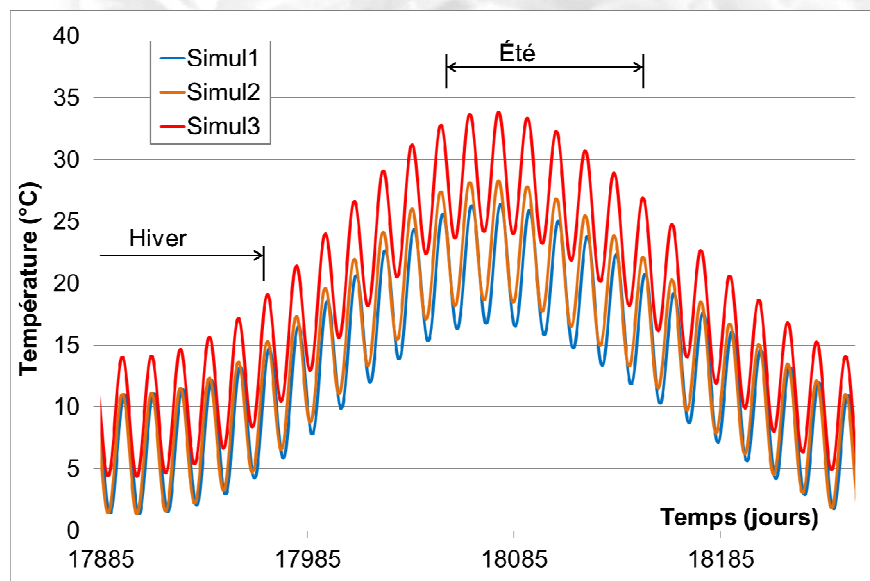
Evolution de la température moyenne (°C) à la surface du globe de 1850 à 2300 par rapport à la moyenne des années 1901-2000 mesurée (en noir) et calculée par différents modèles d'après (Dacher, 2012) et propositions des trois simulations

simulation 1 : Tmoy annuelle = 13,4°C valeur en 2010 (référence Bordeaux)

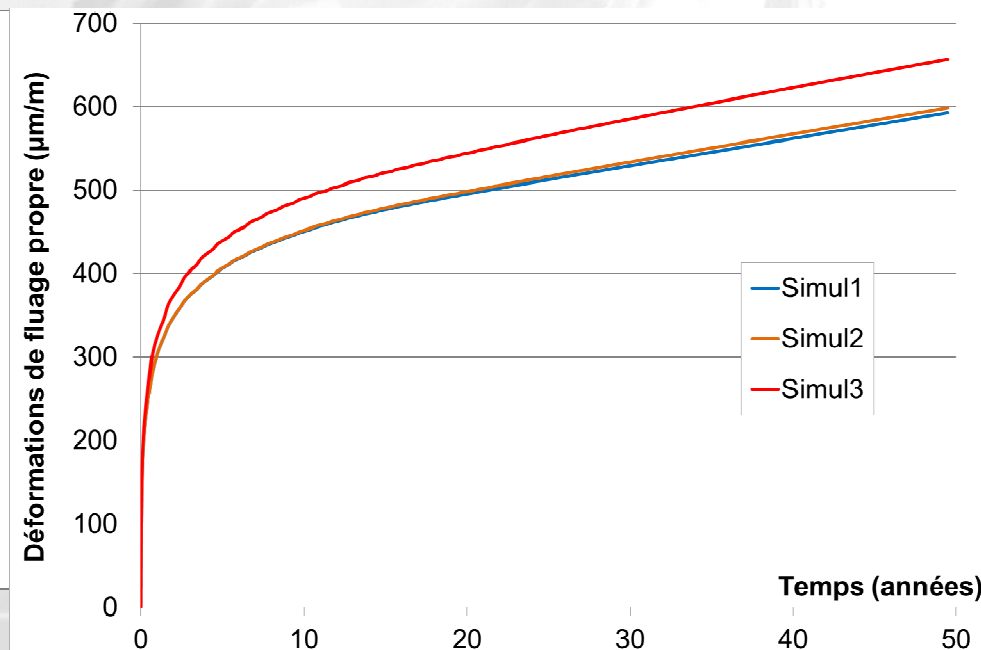
simulation 2 : Tmoy annuelle évolution exponentielle à partir Tmoy 2010 (ouvrage construit à Bordeaux en 2010)

simulation 3 : Tmoy annuelle évolution exponentielle à partir Tmoy 2060 (+3°C)

Simulations T°C dernière année des 50 ans



Fluage propre sur 50 ans



Effet du «changement climatique» négligeable dans cette gamme de T°C + d'effet si T°C s'élève dès le début de l'application du chargement avant que la consolidation du matériau soit avancée $\Rightarrow$ Simul3 : +10,8%

- Effet de la Température 20-50-80°C sur module d'élasticité : **endommagement thermique pour $T > 50^\circ\text{C} \neq$ Eurocode 2**
- Analyse déformation fluage propre en température :
 - de 20°C à **50°C : Amplitudes x 2 à 3,7**
 - de 20°C à **80°C : x 4,4 à 9,2** au bout de 20 jours
- Intégration effets de T°C dans un modèle rhéologique de fluage propre via :
 - loi d'activation thermique appliquée aux viscosités et au paramètre de déformation caractéristique de consolidation
 - endommagement thermique
- Calage du modèle :
 - énergie d'activation quasi identique pour les 4 BHP, proche valeur régissant la viscosité de l'eau : rôle de l'eau dans le phénomène de fluage
- Simulations : 3 scénarii
Le + défavorable = évolutions du fluage propre entre 2060 et 2110 selon scenario le + pessimiste des modèles climatiques $\Rightarrow$ +10,8% déformation fluage propre



*Laboratoire
Matériaux et Durabilité des Constructions*

INSA - Université Paul Sabatier - Toulouse - France

**merci de
votre
attention**



Matériaux : BHP

**4 BHP à base
CEM I et CEM V**

**2 non fibrés
CEM I & CEM V**

Alvéoles de déchets B

**2 fibrés
CEM IF & CEM VF**

Conteneurs de colis de
stockage de déchets B

Constituants	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
CEM I 52.5 R CE PM-ES-CP2 (Lafarge, Val d'Azergues)	400	-	454	-
CEM V/A 42.5 N PM-ES-CP1 (Calcia, Airvault)	-	450	-	454
Sable Calcaire 0/4 mm (Boulonnais)	858	800	984	984
Gravier Calcaire 4/12.5 mm (Boulonnais)	945	984	672	672
Superplastifiant Glénium 27 (MBT)	10	11,25	-	-
Fumée de Silice Condensil S95 DM	-	-	45	45
Fibres inoxydables IFT (L = 30mm Ø=0.6 mm)	-	-	85	85
Superplastifiant SIKA Viscocrete	-	-	13.70	17.25
Eau totale	178	183	172	178
E/C	0,45	0,41	0,32	0,33

Matériaux : BHP

**4 BHP à base
CEM I et CEM V**

**2 non fibrés
CEM I & CEM V**

Alvéoles de déchets B

**2 fibrés
CEM IF & CEM VF**

Conteneurs de colis de
stockage de déchets B

Caractérisation des matériaux :

Resistance en compression f_{cm} + Module d'élasticité E_{cm}

Age	Propriétés Mécaniques	CEM I	CEM V	CEM IF	CEM VF
Série d'essai à 50°C					
28 jours	f_{cm} [MPa]	77	65	95	83
	E_{cm} [GPa]	42,9	40,7	44,6	41,5
date de mise en charge (427 jours)	f_{cm} [MPa]	86	75	113	99
	E_{cm} [GPa]	45,5	44,8	46,2	45,1
Série d'essai à 20°C et 80°C					
28 jours	f_{cm} [MPa]	74	73	115	90,7
	E_{cm} [GPa]	42,1	43,0	46,7	44,7
date de mise en charge (300 jours)	f_{cm} [MPa]	87	99	130	122
	E_{cm} [GPa]	44,7	45,1	48,8	46,2

Modèle rhéologique (Sellier 2006) (Sellier et Buffo-Lacarriere 2009) Poro-mécanique visco-élastique consolidant

- Prise en compte endommagements

$$\sigma = \tilde{\sigma} \cdot (1 - D_c) \cdot (1 - D_{th})$$

- Consolidation

$$\frac{\eta^M}{\eta^{M0}} = C_c$$

$$C_c = \exp\left(\frac{|\epsilon|}{\epsilon^{Mk}}\right)$$

ϵ^k caractéristique intrinsèque $\rightarrow$ potentiel de déformation différée

- Prise en compte effets T°C

$$D_{th} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T - T_{ref}}{\Delta T_k}\right)\right)$$

Loi d'activation thermique type Arrhenius

- Toutes les viscosités $\downarrow$ avec T

$$\frac{\eta(T)}{\eta^0(T_{ref})} = \exp\left(\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

$\epsilon^k \uparrow$ avec T

$$\frac{\epsilon^{Mk}(T)}{\epsilon^{Mk0}(T_{ref})} = \exp\left(-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

