

Soirée-débat AFGC

La réaction sulfatique interne dans les bétons : du laboratoire au patrimoine d'ouvrages

Modélisation thermo-chemo-mécanique
des structures atteintes de RSI

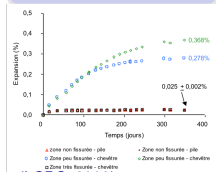
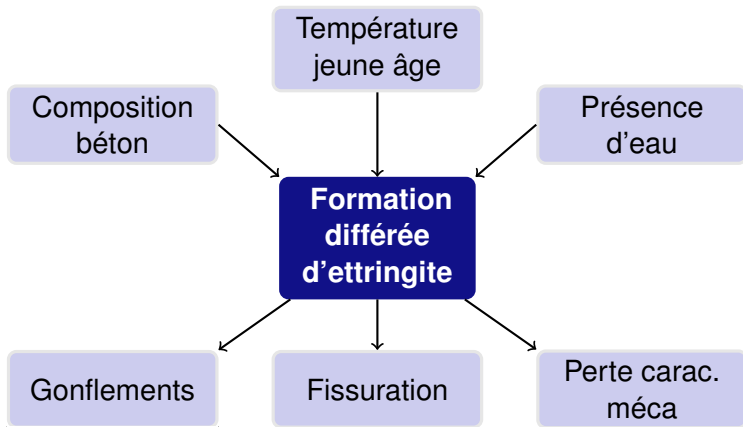


LABORATOIRE EMGCU
EXPÉRIMENTATION
ET MODÉLISATION POUR
LE GÉNIE CIVIL ET URBAIN

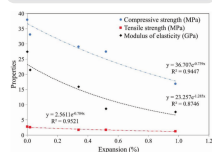
Jean-François Seignol
1^{er}/07/2021

Plan de la présentation

- 1 Modéliser la RSI
- 2 Applications
- 3 Ajustement des modèles



(LCPC, 2009)



(Schovanz *et al.* 2021)

Pourquoi modéliser ?

- Connaître l'état actuel (contraintes de gonflement gêné, sur-tensions dans les armatures...)
- Prédire l'évolution de l'aptitude au service (évolution des déformations, des fissures...)
- Prédire l'évolution de la capacité portante (baisse des carac. mécaniques)
- Tester la pertinence des réparations, les dimensionner

Modélisation des structures

À l'échelle microscopique

Pour mémoire : modéliser la réaction chimique, la formation d'ettringite dans la PCD. (Exemple : [Salgues et al., 2014])

À l'échelle de la structure

Nombreux modèles pour la réaction alcali-granulats (voir [Esposito and Hendriks, 2017]) ; certains ont été adaptés au cas de la RSI.

Modélisation des structures

Modèles poromécaniques

- Formation de l'ettringite dans la PCD
- Conséquences mécaniques au sein du réseau poreux
- Conséquences à l'échelle macroscopique

[Salgues, 2013, Morenon, 2017, Thiebaut, 2018]

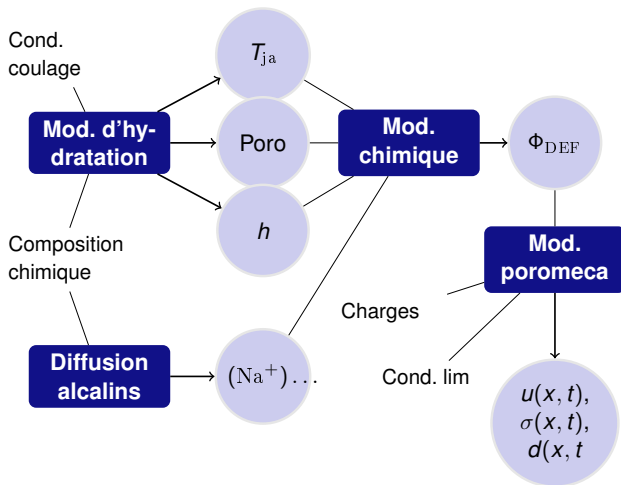
Modèles phénoménologiques

- RSI = gonflement et perte de carac. mécanique
- Mesurés sur éprouvettes représentatives
- Déformations imposées dans modèle mécanique

[Seignol et al., 2012, Malbois et al., 2018, Thiebaut et al., 2018, Regnicoli Benitez et al., 2021]

Les modèles

Modèle poromécanique du LMDC



(D'après [Thiebaut, 2018].)

Les modèles

MCCB : Évolution du modèle RGIB

- Meilleure prise en compte de la teneur en eau du béton
- Modification de la loi de fluage (chaîne de modèles Kelvin-Voigt)

(Voir [Malbois et al., 2018, Regnicoli Benitez et al., 2021].)

Plan de la présentation

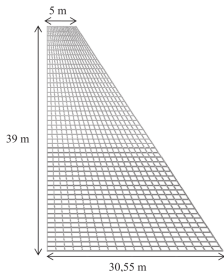
- 1 Modéliser la RSI
- 2 Applications
- 3 Ajustement des modèles

Quelques applications

- Barrage poids (voir [Salgues, 2013])
- Pile de pont routier (voir [Thiebaut, 2018])
- Écluse des Fontinettes (voir [Seignol et al., 2019b])
- Pont de Seyssel (voir [Spataro et al., 2017])
- Passage supérieur à poutres PRAD (voir [Seignol et al., 2019a])

Barrage

a)

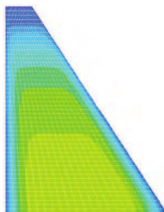


Modèle 2D d'une section de
barrage-poids

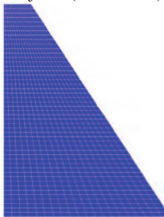
a) maillage, b) temp. après coulage,
c) ettringite formée (mol/m^3)
d) endommagement

(Source : [Salgues, 2013])

b)

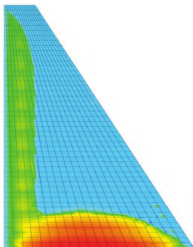


60 jours (12 couches)

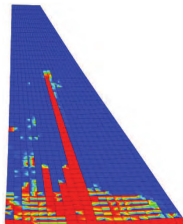


15000 jours (40 ans)

c)



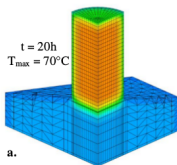
d)



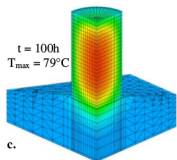
sité
re Eiffel

Pile de pont

b)



a.



c.

Pile-marteau.

a) maillage,

b) temp. après coulage,

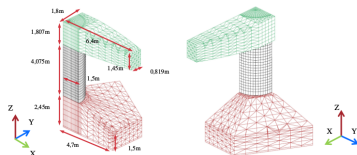
c) ettringite formée

(1=51,6 mol/m³)

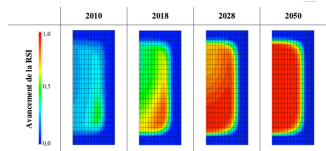
d) ouv. fissures

(Source : [Thiebaut, 2018])

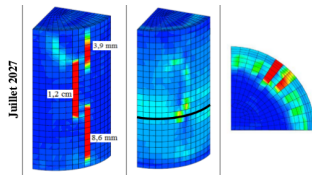
a)

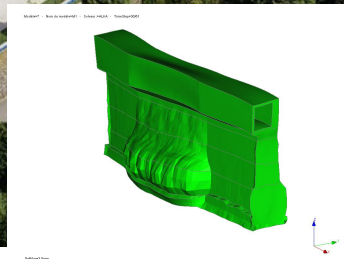
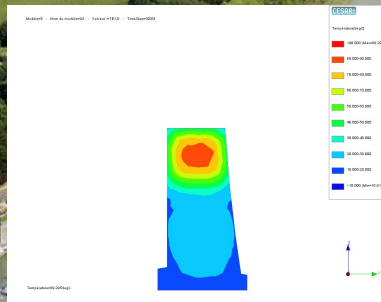
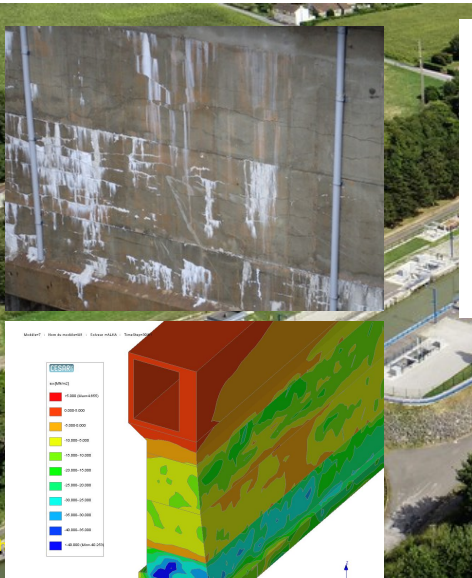


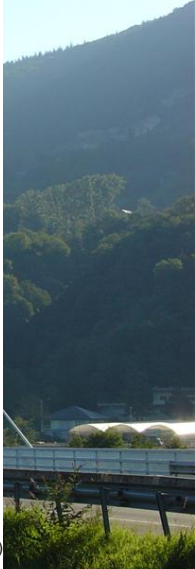
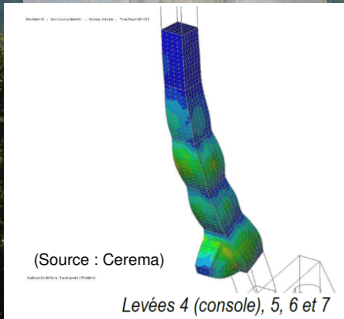
c)

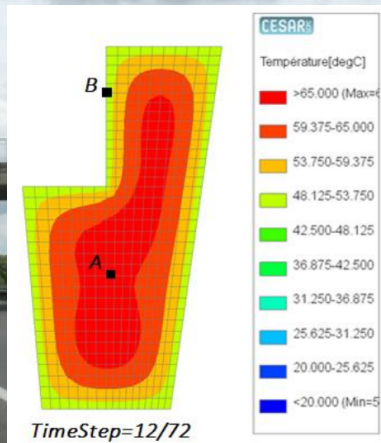


d)









Plan de la présentation

- 1 Modéliser la RSI
- 2 Applications
- 3 Ajustement des modèles

Reconstitution de l'histoire thermique au jeune âge

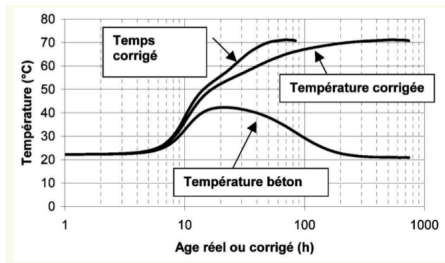
Essais quasi-adiabatiques

À partir de l'équation de la chaleur et de modèle de l'hydratation du ciment.

Dépend des caractéristiques thermochimiques du ciment et de la formulation du béton



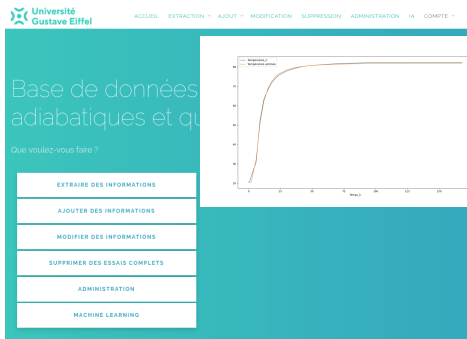
(Source : [Boulay et al., 2010b]. Voir aussi [Boulay et al., 2010a].)



Reconstitution de l'histoire thermique au jeune âge

Base Calobeton

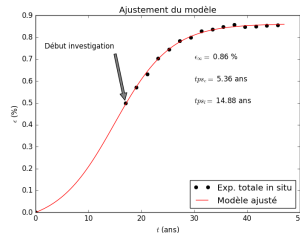
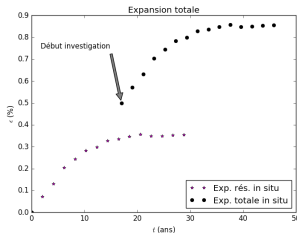
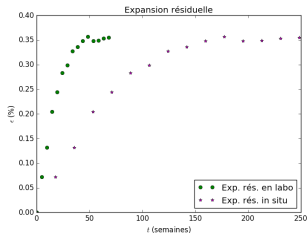
Calobeton = base de données des essais existants, associée à un modèle prédictif construit par *Machine learning*.



Voir [Lapertot et al., 2021].

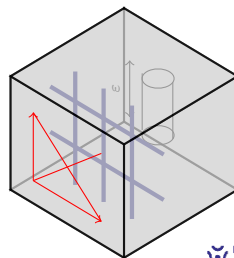
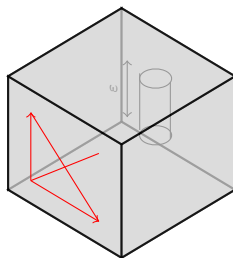
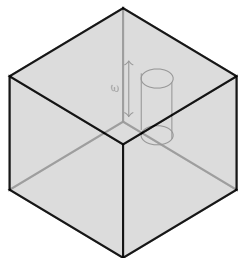
Contact calobeton@univ-eiffel.fr pour accès à Calobeton.

Ajustement de la loi de gonflement



Passage éprouvette – ouvrage

- Essai accéléré / évolution in-situ
- Effet d'échelle
- Gonflement à cœur / dégradations visibles en parement
- Gonflements libres / contraintes et armatures



Conclusion

Modèles numériques : Des outils utiles

Pour comprendre les pathologies, leurs conséquences sur le fonctionnement des structures.

Pour estimer la durée de vie, concevoir des solutions de réparation.

Modèles existants

Deux approches (poromécanique / phénoménologique)

Développements en cours

Complexité des modèles (multi-physique, passage micro/macro)

Ajustement des modèles

Aussi important que le modèle pour avoir de bons résultats

Liens avec essais labo, mesures in situ

Merci pour votre attention



Questions ?

jean-francois.seignol@univ-eiffel.fr

Bibliographie I



Boulay, C., Torrenti, J.-M., and André, J.-L. (2010a).

Projet de mode opératoire pour la détermination de la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment d'un béton placé dans un calorimètre quasi adiabatique pour béton (QAB).

Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, (278) :37–42.



Boulay, C., Torrenti, J.-M., André, J.-L., and Saintilan, R. (2010b).

Calorimétrie quasi-adiabatique pour bétons : facteurs d'influence.

Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, (278) :19–47.



Esposito, R. and Hendriks, M. A. N. (2017).

Literature review of modelling approaches for ASR in concrete : a new perspective.

European Journal of Environmental and Civil Engineering, (189).



Lapertot, R., Seignol, J.-F., Torrenti, J.-M., and Bercher, J.-F. (2021).

Apport de l'apprentissage automatique pour la prediction de l'élévation de température dans les structures massives en béton au jeune âge.

In *Journées techniques GC'2021 – Le génie civil face au défi de la croissance verte*, page 8 p. AFGC.



Malbois, M., Nedjar, B., Divet, L., Lavaud, S., and Torrenti, J. (2018).

A finite element implementation of delayed ettringite formation in concrete structures.

In *Computational Modelling of Concrete Structures - Euro-C 2018*, Bad-Hofgastein, Austria.



Morenon, P. (2017).

Modélisation des réactions de gonflement interne des bétons avec prise en compte des couplages poromécaniques et chimiques.

PhD thesis, Université de Toulouse.

In French. <http://thesesups.ups-tlse.fr/3603/> consulted Dec. 9th, 2019.

Bibliographie II



Regnicoli Benitez, B. D., Seignol, J.-F., and Nedjar, B. (2021).

Coupled constitutive equations for assessing mechanical effects of Internal Swelling Reactions.
In *Proc. 16th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures, Vol 1*. LNEC.



Salgues, M. (2013).

Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : Application aux barrages en béton.
PhD thesis, Université de Toulouse.



Salgues, M., Sellier, A., Multon, S., Bourdarot, E., and Grimal, E. (2014).

DEF modelling based on thermodynamic equilibria and ionic transfer for structural analysis.
European Journal of Environmental and Civil Engineering, 18(4) :377–402.



Seignol, J.-F. (2021).

Modelling structural effects of DEF : lessons learned from real-case studies.
In IABMAS, editor, *10th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management*.
(to be published).



Seignol, J.-F., Amar, L., Argoul, P., and Nedjar, B. (2019a).

Analyse par plans d'expériences numériques du couplage entre température au jeune âge et risque de RSI.
In *37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil*. AUGC.
In French. https://rugc2019.sciencesconf.org/data/RUGC2019_Actes_Provisaires.pdf (Consulted Dec. 5th, 2019).



Seignol, J.-F., Omikrine-Metalssi, O., and Toutlemonde, F. (2012).

Recent advances in modelling def-effects.

In Sato, R. and Toutlemonde, F., editors, *ConCrack 3 – Rilem-JCI International Workshop on Crack Control in Mass Concrete and Related Issues concerning Early-Age of Concrete Structures*, Champs-sur-Marne, France. IFSTTAR.

Bibliographie III



Seignol, J.-F., Spataro, F., Germain, D., Labourie, L., and Scordia, P.-Y. (2019b).

Def-pathology in concrete supporting a lock-gate : use of numerical modelling to re-assess structural behaviour.

In PIANC, editor, *Proceedings PIANC-SMART Rivers 2019 – B. Inland Waterways, Design and Maintenance.*, Lyon, France.

[https://www.pianc.org/uploads/files/Smart-Rivers/B_](https://www.pianc.org/uploads/files/Smart-Rivers/B_Waterways-design-and-maintenance-SmartRivers2019.pdf)

[Waterways-design-and-maintenance-SmartRivers2019.pdf](https://www.pianc.org/uploads/files/Smart-Rivers/B_Waterways-design-and-maintenance-SmartRivers2019.pdf), consulted Dec. 8th, 2019.



Spataro, F., Seignol, J.-F., Taton, P., Germain, D., Boissouvier, F., and Miezerjewski, C. (2017).

Suivi et modélisation du pylône du pont de Seyssel.

In *Journées techniques Ouvrages d'art*, Metz.



Thiebaut, Y. (2018).

Evaluation de structures en béton armé atteintes de réaction sulfatique interne.

PhD thesis.



Thiebaut, Y., Multon, S., Sellier, A., Lacarrière, L., Boutillon, L., Belili, D., Linger, L., Cussigh, F., and Hadji, S.

(2018).

Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation.

Construction and Building Materials, 183 :626–641.