

# Etat de l'art de l'approche thermique simple pour le béton et contribution numérique à la sensibilité des champs de température du béton sur son comportement thermique à températures élevées

Najib DOUK<sup>1</sup>, Amir SILARBI<sup>1</sup>, Xuan Hong VU<sup>2</sup>, Maxime AUDEBERT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, ENISE, LTDS (UMR 5513 CNRS), 58 rue Jean Parot, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France

<sup>2</sup> Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction LMC2, 82 bd Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, France

## Résumé

*Lors de la modélisation thermique ou thermo-mécanique différentes approches peuvent être choisies pour la partie thermique. Parmi ces approches, l'approche thermique tout simplement. Cette approche bien que très simplificatrice par rapport aux autres approches Thermo-hydrique ou thermo-hydro-chimique, reste très pertinente dans certains cas. Dans le cadre de nos travaux de caractérisation du comportement global des structures en béton armé au feu, l'approche thermique simple a été choisie pour alimenter le modèle thermo-mécanique par les résultats thermiques. Les auteurs sont amenés à traiter une variété de béton dont les compositions physico-chimiques ne seraient pas finement connues. Sachant que l'Eurocode 2 nous fournit que peu d'information par rapport aux caractéristiques thermiques du béton Il serait opportun d'établir une base de donnée plus exhaustive et détaillée ainsi que bien documentée pour choisir des courbes de chaleur massique et de conductivité thermique plus adaptées que celles figurant dans l'Euocode 2 (EC 2). Ce travail est fait dans le but d'éliminer l'erreur commise pendant le calcul thermique ou du moins, d'arriver à limiter l'erreur en température. Cette dernière erreur s'accumule au fil des calculs thermiques puis thermomécaniques et peut entraîner d'autres erreurs considérables dans le cadre d'une étude de stabilité structurelle.*

**Mots clés :** *Modèle thermo-mécanique, béton armé, Feu (ISO-834), Modèle thermique*

## Abstract

*In a thermal or thermo-mechanical modeling many thermal approaches could be used in order to provide the models with accurate thermal results. Among these approaches, the simple thermal approach. Even if the simple the latter approach is very simplifying compared to other approaches like the thermo-hydro or the thermo-hydro-chemo approaches it is still very accurate if used carefully. The research works of the authors concern the thermo-mechanical calculations of structural elements strengthened by Textile Reinforced Concrete (TRC). These works are led to treat a variety of concrete whose physicochemical compositions would not be surely finely known. It would be appropriate to establish a fairly detailed and well-documented data base of appropriate heat capacity and thermal conductivity curves from those in Eurocode 2 (EC 2) This work is done in order to eliminate the error made during the thermal calculation or at least to manage to limit the error in temperature. The latter error accumulates over thermal and thermomechanical calculations and can lead to other significant errors in a structural stability study.*

**Keywords:** *Thermo-mechanical model, reinforced concrete, fire (ISO-834) thermal model.*

## 1. Introduction

Cette étude est une contribution aux approches de modélisation numérique du comportement thermo-mécanique du béton. La simulation numérique du comportement du béton à hautes températures nécessite la représentation la plus précise possible des champs de température dans la section étudiée. En effet, l'évolution de la température est un paramètre clé qui conditionne le comportement mécanique global des composants de la structure. Dans ce papier, la pertinence et les limites de l'approche thermique simplifiée qui consiste à implémenter des courbes de chaleur spécifique et de conductivité thermique variant en fonction de la température telles que celles figurantes dans l'Eurocode 2 pour le calcul des champs de température dans le béton sont discutées. La représentation fidèle de l'état réel des champs de température dans une section en béton armé considérée exige une prédiction correcte de l'état des contraintes thermiques dans la section ainsi que la connaissance de l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des matériaux (béton et acier) en fonction de la température. En effet, une étude de sensibilité de la valeur des champs de température en fonction de la variation des propriétés thermo-physiques du béton (chaleur spécifique et conductivité thermique) est réalisée et montre qu'une erreur dans les caractéristiques thermiques du béton génère des erreurs importantes au niveau des champs de température. Afin d'être réaliste, la modélisation thermique d'une section en béton armé devrait donc

prendre en compte le caractère multiphasique du béton (phase solide, phase liquide et phase gazeuse) [BAR 12]. Les approches multiphasiques du béton, telles que les approches thermo-hydriques ou thermo-hydro-chimiques, sont ainsi plus précises que l'approche thermique simple. Mais elles sont également plus coûteuses en temps de calcul et leur utilisation est surtout réservée pour les modèles à l'échelle structurelle. Dès lors, l'approche thermique simple peut constituer une alternative raisonnable pour effectuer des calculs dans une durée de temps et pour un niveau de précision acceptables.

Les travaux de recherche effectués par cette étude concernent les aspects mentionnés ci-dessous :

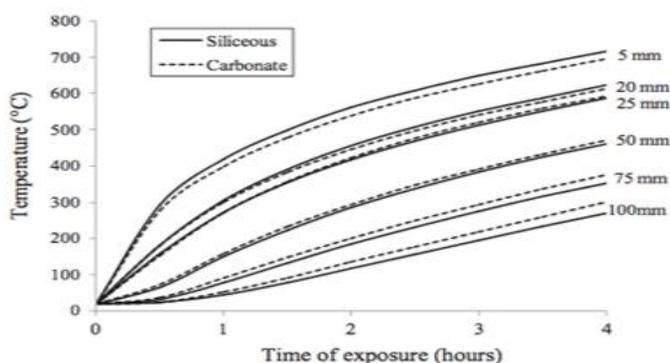
Dans le contexte précédemment présenté, cette étude propose une méthodologie pour le choix des propriétés thermiques du béton permettant d'améliorer les résultats des approches thermiques numériques simplifiées.

Dans un premier temps, une étude bibliographique déclinant les principaux verrous (physico-chimiques, physiques et matériau) et leur influence sur la variation des caractéristiques thermiques intrinsèques du béton est présentée. Cette dernière permet d'établir un organigramme identifiant les verrous actionnant les variations des évolutions des propriétés thermo-physiques intrinsèques du matériau afin de réduire les imprécisions dans la modélisation des champs thermiques. Enfin, une validation numérique-expérimentale des caractéristiques thermo-physiques proposées dans l'EN1992-1-2 [EUR 92] est effectuée par confrontation des champs de température mesurés lors d'un essai d'une poutre béton sous feu normalisé ISO 834 [ISO 14] aux températures calculées par un modèle d'éléments finis.

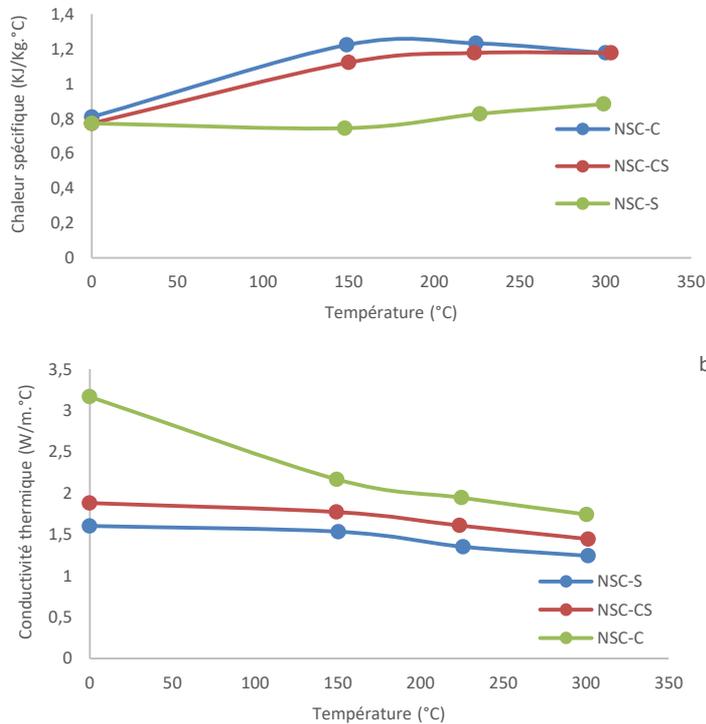
Une validation numérique-expérimentale des caractéristiques thermiques figurant dans l'EC2 par confrontation des champs de température expérimentaux d'une poutre avec un modèle d'éléments finis du même spécimen dont les caractéristiques thermiques sont égales aux caractéristiques thermiques du béton en fonction de la température figurant dans l'EC 2.

## 2. Méthodologie pour le choix des propriétés thermiques du béton

Dans cette étude, une approche par modélisation numérique des champs de température dans le béton est utilisée afin de valider la base de données de choix des caractéristiques thermiques intrinsèques spécifiques à chaque type de béton. Ces modèles sont réalisés sous une action thermique conventionnelle ISO 834 [ISO 14] à l'aide du code de calcul aux éléments finis MSC MARC [MSC 14]. Les modèles développés sont validés par comparaison des champs de températures obtenus par le calcul numérique avec les champs de températures mesurés expérimentalement. L'étude se base sur les caractéristiques thermiques des bétons « Portland standard » ([XIN 14], [MAR 13]), dont les compositions chimiques des agrégats sont différentes entre les bétons étudiés. Cette validation permet de sélectionner les caractéristiques thermiques spécifiques aux bétons en fonction de la composition chimique de leurs agrégats. A titre d'exemple, la figure 1 démontre que le recueil de température dans le même spécimen varie en fonction de la composition chimique (granulat calcaire ou granulat siliceux) [BAL 16]. La figure 2 présente un deuxième exemple montrant des valeurs de conductivité thermique et de chaleur massique de béton de résistance normale (NSC «Normal Strength Concrete») à différentes compositions : granulats calcaires (C) et granulats siliceux (S) [XIN 14]. Ainsi, en s'appuyant sur les travaux issus de la littérature ([SCH 88], [XIN 14] et [MAR 13]), un organigramme a été établi dans cette étude afin de guider le modélisateur vers le choix des caractéristiques thermiques intrinsèques du béton les plus adaptées à son cas d'étude.



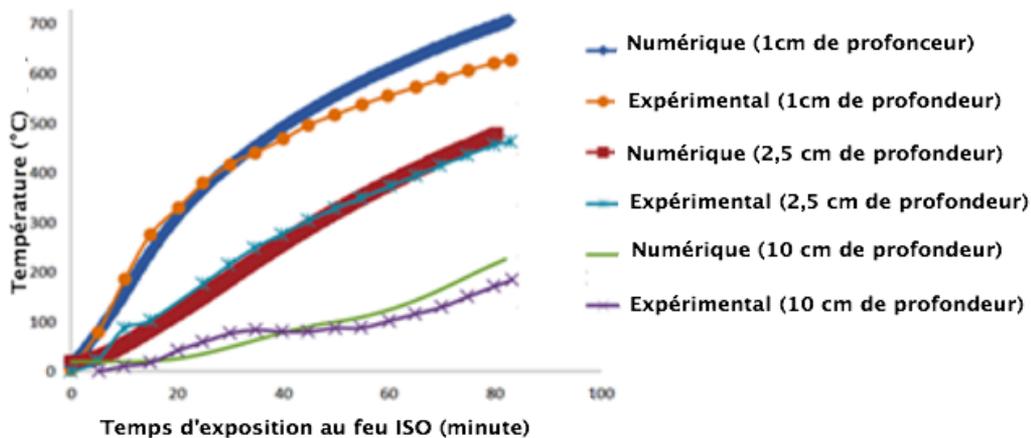
**Figure 1.** Schémas démontrant l'évolution des champs de température dans une section en béton sous chargement thermique ISO-834 pour deux spécimens calcaires et siliceux [BAL 16]



**Figure 2.** Evolution de la chaleur spécifique (figure en haut) et de la conductivité thermique (figure en bas) du béton en fonction de la température [XIN 14]

### 3. Résultats

En utilisant la méthodologie présentée dans la section 2, cette étude a effectué des modélisations numériques afin d'obtenir l'évolution des champs de la température dans la section en béton armé soumise à différentes températures élevées. La figure 3 présente une comparaison des résultats numériques obtenus par cette étude avec des résultats expérimentaux issus de la littérature [COR 12].



**Figure 3.** Comparaison des résultats numériques obtenus par cette étude (lignes continues) avec ceux expérimentalement obtenus (lignes marquées avec les symboles) [COR 12] : évolution de la température dans une section en béton armé avec des caractéristiques thermiques intrinsèques (choisis aléatoirement)

La figure 3 montre l'évolution de la température dans une section en béton armé obtenue en utilisant des caractéristiques thermiques intrinsèques du béton choisies aléatoirement. En choisissant aléatoirement les

caractéristiques thermiques intrinsèques du béton figurants dans l'Eurocode 2, les modèles numériques permettent d'obtenir une allure convenable des champs de température dans une section donnée. En revanche, il serait préférable d'avoir des prédictions de température plus précises pour éviter que les imprécisions s'accroissent le long de l'étude thermique puis thermo-mécanique.

#### 4. Conclusion

Les modèles thermiques sous feu ISO-834 implémentés avec les caractéristiques thermiques intrinsèques (conductivité thermique et chaleur spécifique) (Eurocode 2) recréent des résultats de champs de température fidèles à la réalité d'un point de vue générale. Le choix entre ces caractéristiques est difficile si une grande précision est demandée lors d'une simulation thermique. Dès lors, ce papier offre un choix éclairé permettant un choix juste des caractéristiques thermiques intrinsèques du béton, ceci dans le but d'avoir des champs thermiques avec une meilleure précision.

#### Références

- [BAL 16] BALAJI A., NAGARAJAN P., PILLAI T.M. M. «Predicting the response of reinforced concrete slab exposed to fire and validation with IS456 (2000) and Eurocode 2 (2004) provisions », Alexandria Engineering Journal, vol. 55, 2016, p. 2699-2707.
- [BAR 12] BARY B., DE MORAIS M.V.G., POYET S., DURAND S. «Simulations of the thermo-hydro-mechanical behaviour of an annular reinforced concrete structure heated up to 200 °C », Engineering structures, vol. 36, 2012, p. 301-315
- [ISO 14] ISO 834-10:2014 Fire resistance tests -- Elements of building construction -- Part 10: Specific requirements to determine the contribution of applied fire protection materials to structural steel elements
- [COR 12] CORREIRA Joao R., FRANCA P. «Fire behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP laminates: Protection systems with insulation of the anchorage zones» Composites Part B: 43 (2012) 1545-1556.
- [MSC 14] MSC Software MARC Mentat Volume A: theory and user information, 2014.
- [MAR 13]: MARAVEAS C., WANG Y.C., SWAILES T. «Thermal and mechanical properties of 19th Century fireproof flooring systems at elevated temperatures». Construction and Building Materials, vol. 48, 2013, p.248-264
- [MSC 14] MSC Software MARC Mentat Volume A: theory and user information, 2014.
- [EUR 92]: Eurocode 2 – Calcul des structures en béton armé, 1992 [in French].
- [SCH 88] SCHNEIDER U., «Concrete at High Temperature – A General Review». Fire Safety Journal, vol. 13, 1988, p. 55-68
- [XIN 14] XING Z., HEBERT R., BEAUCOUR A.-L., LEDESERT B., NOUMOWE A. « Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behavior at elevated temperature » . Materials and structures, 2014, p. 1921-1940.

#### Reconnaissance

Ce travail de recherche a été fait par l'aide financière de la banque publique d'investissement de la France (BPI France) pour le projet de recherche PRORETEX II. Celui-ci est un projet de recherche collaboratif entre quatre partenaires industriels SULITEC – Porteur du projet; FOTIA; ER2I; CIMEO) et deux partenaires académiques (ENISE/LTDS, UCBL/LMC2).