

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil



Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat 3^{ème} Cycle LMD
Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux en Génie Civil

Sous le thème :

**INVESTIGATION DU COMPORTEMENT THERMO-
MECANIQUE DU BETON SOUS L'EFFET D'UN
INCENDIE**

Présentée par : **ZITOUNI Mohamed**

Devant le jury composé de :

HARICHANE Zamila	Professeure	UHB Chlef	Présidente
KENAI Said	Professeur émérite	USD Blida 1	Examineur
MENADI Belkacem	Professeur	USD Blida 1	Examineur
GHRICI Mohamed	Professeur	UHB Chlef	Examineur
LAMRI Belkacem	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur
KADA Abdelhak	Professeur	UHB Chlef	Co-rapporteur
Mario Rui Arruda	Professeur	LNEC Portugal	Invité

Remerciements

D'abord, je tiens à remercier Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la sagesse et la santé nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à mes encadreurs : le professeur Belkacem LAMRI, le professeur Abdelhak KADA de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, et le professeur Mario Rui Tiago Arruda, de l'université de Lisbonne, CERIS- Instituto Superior Técnico. Je leur suis profondément reconnaissant d'avoir accepté de m'encadrer tout au long de ce parcours. Leur patience, leur coopération et leurs précieux conseils ont été essentiels à l'aboutissement de ma recherche. Je tiens également à souligner l'enthousiasme et l'intérêt qu'ils m'ont transmis pour la recherche, ce qui a grandement enrichi mon expérience. En cette occasion, je leur témoigne non seulement ma gratitude, mais aussi mon respect le plus sincère.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame la Professeure Zamila HARICHANE, de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, présidente du jury, mes sincères remerciements vont également à Messieurs le Professeur Saïd KENAI et le Professeur Belkacem MENADI, de l'Université Saad Dahlab de Blida 1, et à Monsieur le Professeur Mohamed GHRICI, de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir accepté d'examiner ma thèse ainsi que le temps, l'attention et les efforts qu'ils ont consacrés à l'évaluation de ce travail. Leurs précieuses remarques et suggestions vont grandement enrichir ce travail. Leur expertise et leur rigueur scientifique vont contribuer à améliorer la qualité de cette recherche, et je leur en suis profondément reconnaissant.

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues ainsi que les membres du laboratoire de recherche LISICPE de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef et ceux du CERIS- Instituto Superior Técnico, Université de Lisbonne, qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je souhaite également remercier le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) d'Algérie pour son généreux soutien financier, qui a permis de mener à bien mes études doctorales.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ma famille, en particulier à mes parents, ma mère et mon père, ainsi qu'à mes frères, pour leur soutien indéfectible. Je leur en suis infiniment reconnaissant.

Cette thèse est le fruit d'un travail collectif et de collaborations avec divers professionnels et experts. C'est donc avec un immense plaisir que je débute ces remerciements en exprimant toute ma gratitude aux personnes qui m'ont encadré, soutenu et assisté tout au long de mon parcours doctoral.

Dédicaces

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

À ceux dont personne ne peut égaler, à ceux qu'Allah nous a ordonné de respecter, à ceux qui ont beaucoup donné et offerts ce qui ne peut être remboursé, je dédie ces mots, à vous, ma chère mère et mon cher père. Je vous consacre cette recherche, car vous avez été le meilleur soutien tout au long de mon parcours académique. Je dédie cet effort et cette recherche à vous, car vous avez toujours été mes sources d'inspiration. C'est sur vos traces que je marche, et c'est votre savoir que je suis. Maman et Papa, je vous remercie infiniment pour tout ce que vous m'avez apporté durant mes études et pour l'accomplissement de cette recherche.

À mes chers frères, qui ont été de précieux compagnons sur mon chemin et m'ont encouragé à viser l'excellence.

À mes amis fidèles, qui n'ont jamais cessé de m'apporter aide, assistance et soutien dans les moments les plus difficiles : je dédie cette recherche. À ceux qui m'ont tendu la main dans les moments de faiblesse, ne se contentant pas de me voir me laisser aller, je dédie cette recherche. À vous, mes amis, qui m'ont soutenu dans les pires circonstances, je dédie ce moment de joie. À tous les amis des chemins, qu'ils soient escarpés ou faciles, sombres ou lumineux, je dédie cette recherche en signe de ma gratitude pour votre présence dans ma vie.

Résumé

L'utilisation des bétons innovants dans les éléments structuraux s'est considérablement répandue dans divers domaines de la construction, en raison des avantages techniques spécifiques à chaque type et de sa capacité à améliorer la qualité des ouvrages selon les besoins. Cependant, ces structures restent exposées à l'un des risques les plus redoutés en ingénierie civile : l'incendie. Pour garantir une performance adéquate de ces types de béton en termes de résistance au feu, il est crucial de définir précisément les exigences relatives à la géométrie des éléments, aux conditions de charge et aux conditions aux limites. L'étude bibliographique a révélé de grandes lacunes dans les recherches concernant les éléments structurels en béton auto-plaçant (BAP) lorsqu'ils sont exposés au feu. Ce travail de recherche présente une étude numérique approfondie de la performance en résistance au feu des poutres en BAP, complétée par une étude paramétrique. Cette dernière permet d'examiner l'effet des fibres hybrides et de l'isolation coupe-feu sur l'amélioration du comportement en conditions d'incendie, ainsi que l'influence de différents paramètres tels que l'enrobage, la section transversale, la longueur et le ratio de charge. L'étude s'appuie sur le développement d'un modèle éléments finis (EF) tridimensionnel (3D) à l'aide du logiciel ANSYS pour l'évaluation de la résistance au feu et l'impact de l'ajout de fibres hybrides et de l'isolation thermique sur la performance des poutres en BAP en conditions d'incendie. Les températures sont appliquées selon la norme ISO 834 et les non-linéarités géométriques et matérielles sont prises en compte dans l'analyse. Le modèle EF développé et calibré a fait l'objet d'une validation rigoureuse en comparant les résultats obtenus avec ceux des essais expérimentaux documentés dans la littérature. Les résultats montrent que l'incorporation de fibres hybrides dans les poutres en BAP a un effet significatif sur leur performance et présente une amélioration notable en matière de résistance au feu. De plus, l'utilisation combinée des fibres hybrides avec l'isolation coupe-feu contribue à prolonger la durée de résistance au feu. L'étude paramétrique a montré que l'enrobage et la section transversale des poutres jouent un rôle crucial dans leur résistance au feu, par contre cette dernière n'est pas affectée par leur longueur puisqu'il n'y a pas de modification dans la distribution thermique au sein de la section transversale. Enfin, une diminution du ratio de charge a pour effet de prolonger la résistance au feu des poutres en BAP.

Mots clés : Résistance au feu, Béton auto-plaçant, Poutre, Fibres hybrides, l'isolation coupe-feu, Eléments Finis.

Abstract

The use of innovative concretes in structural elements has spread considerably in various areas of construction, due to the specific technical advantages of each type and its ability to improve the quality of structures as required. However, these structures remain exposed to one of the most feared risks in civil engineering: fire. To ensure that these types of concrete perform adequately in terms of fire resistance, it is crucial to define precisely the requirements relating to the geometry of the elements, the load conditions and the boundary conditions. The literature review revealed major gaps in research concerning structural elements made of self-compacting concrete (SCC) when exposed to fire. This research work presents an in-depth numerical study of the fire resistance performance of SCC beams, supplemented by a parametric study. The latter enables us to examine the effect of hybrid fibres and fire insulation on improving behaviour under fire conditions, as well as the influence of various parameters such as coating, cross-section, and length and load ratio. The study is based on the development of a three-dimensional (3D) finite element (FE) model using ANSYS software to assess the fire resistance and the impact of the addition of hybrid fibres and thermal insulation on the performance of SCC beams under fire conditions. Temperatures are applied according to ISO 834 and geometric and material nonlinearities are taken into account in the analysis. The FE model developed and calibrated underwent rigorous validation by comparing the results obtained with those of experimental tests documented in the literature. The results show that the incorporation of hybrid fibres in SCC beams has a significant effect on their performance, with a marked improvement in fire resistance. In addition, the combined use of hybrid fibres with fire insulation helps to extend the duration of fire resistance. The parametric study showed that the coating and cross-section of the beams play a crucial role in their fire resistance, although the latter is not affected by their length since there is no change in the thermal distribution within the cross-section. Finally, a reduction in the load ratio has the effect of prolonging the fire resistance of SCC beams.

Keywords: Fire Resistance, Self-compacting Concrete, Beam, Hybrid Fibres, Fire Insulation, Finite Elements

ملخص

ان استخدام الخرسانات المبتكرة في العناصر الهيكلية قد زاد بشكل كبير عبر مختلف مجالات البناء، وذلك بسبب المزايا الفنية المحددة لكل نوع وقدرتها على تحسين جودة الهياكل وفقاً للاحتياجات. ومع ذلك، تظل هذه الهياكل معرضة لأحد أكثر المخاطر رعباً في الهندسة المدنية: الحريق. لضمان الأداء المناسب لهذه الأنواع من الخرسانات من حيث مقاومة الحريق، من الضروري تحديد المتطلبات المتعلقة بهندسة العناصر وظروف الحمل وظروف الحدود بدقة. كشفت مراجعة الأدبيات عن فجوات كبيرة في الأبحاث المتعلقة بالعناصر الهيكلية المصنوعة بالخرسانة ذاتية الدمك، عند تعرضها للحريق. يقدم هذا العمل البحثي دراسة عديدة شاملة لأداء مقاومة الحريق لعوارض الخرسانة ذاتية الدمك، مدعومة بدراسة بارامترية تهدف إلى فحص تأثير إضافة الألياف الهجينة وعازل الحريق على تحسين سلوكها في ظل ظروف الحريق، بالإضافة إلى تأثير عوامل مختلفة مثل سمك الغطاء الخرساني، والمقطع العرضي، والطول، ونسبة الحمل. تعتمد الدراسة على تطوير نموذج ثلاثي الأبعاد باستخدام العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS، حيث يتم تطبيق درجات الحرارة وفقاً للمنحنى المعياري ISO 834 مع الأخذ بالاعتبار الخطية الهندسية والمادية عند تحليل سلوك عوارض الخرسانة ذاتية الدمك في ظل ظروف حريق. يخضع نموذج العناصر المحدودة المطور لعملية تحقق صارمة من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من النموذج المطور مع التي تم الحصول عليها في الاختبارات التجريبية الموجودة في الأدبيات. تم تطوير نموذج العناصر المحدودة ومعايرته بدقة عالية لتقييم مقاومة الحريق وتأثير إضافة الألياف الهجينة وعازل الحريق على أداء عوارض الخرسانة ذاتية الدمك تحت ظروف الحريق. تظهر النتائج أن دمج الألياف الهجينة في عوارض ذاتية الدمك يؤثر بشكل كبير على أدائها. فيما يتعلق بمقاومة الحريق، تُظهر العوارض المزودة بألياف هجينة تحسناً ملحوظاً مقارنة بتلك التي لا تحتوي على الألياف الهجينة. علاوة على ذلك، يساهم الاستخدام المشترك للألياف الهجينة وعازل الحريق في إطالة مدة مقاومة الحريق. فيما يتعلق بالعوامل الهندسية، يلعب سمك الغطاء الخرساني والمقطع العرضي للعوارض دوراً مهماً في مقاومتها للحريق. من المهم ملاحظة أن طول العوارض لا يؤثر على مقاومتها للحريق، حيث إن هذه المتغيرات لا تغير التوزيع الحراري داخل المقطع العرضي. أخيراً، تؤدي زيادة نسبة الحمل إلى تمديد مقاومة الحريق لعوارض الخرسانة ذاتية الدمك.

الكلمات المفتاحية: مقاومة الحريق، الخرسانة ذاتية الدمك، العارضة، الألياف الهجينة، عازل الحريق، العناصر المحدودة.

Sommaire

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xv
Contributions scientifiques	xviii
Liste des symboles.....	xvi
Introduction Générale	xviii
A. Contexte et motivation.....	2
B. Objectifs, portée et organisation de l'étude	5
Chapitre I. Généralités sur la Conception des Structures en Béton Armé Face aux Incendies	7
I.1. Introduction.....	8
I.2. Historique et évolution de la réglementation incendie	8
I.3. Aspects environnementaux et sociétaux des incendies	9
I.4. Principes fondamentaux du calcul des bâtiments en situation d'incendie.....	10
I.5. Objectifs de la sécurité incendie	11
I.6. Fondements théoriques de l'ingénierie incendie	12
I.6.1. Physique de l'incendie	13
I.6.2. Modèles d'incendie	16
I.7. Approches avancées de l'ingénierie incendie	17
I.7.1. Ingénierie de performance en sécurité incendie (PBFE).....	17
I.7.2. Couplage thermo-hydro-mécanique dans le béton.....	18
I.7.3. Le phénomène de spalling	18
I.7.4. Durabilité post-incendie des structures en béton armé.....	18
I.7.5. Comparaison des approches normatives internationales.....	18
I.8. Évaluation des dommages causés par l'incendie aux structures en béton armé ..	19
I.8.1. Dommages aux structures en béton armé après incendie	19
I.8.2. Détermination des dommages dus à l'incendie	20

I.8.3. Application de la technique pétrographique pour l'évaluation des dommages d'incendie des structures.....	21
I.9. Conclusion	23
Chapitre II. Recherche bibliographique.....	25
II.1. Introduction.....	26
II.2. Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées.....	26
II.2.1. Evolution de la matrice cimentaire.....	26
II.2.2. Evolution des granulats	29
II.2.3. Déformation thermohydrrique libre du béton	32
II.3. Evolution des propriétés physiques.....	33
II.3.1. Perte de masse	33
II.3.2. Porosité	35
II.3.3. Perméabilité	38
II.4. Evolutions les propriétés thermiques	39
II.5. Evolutions des propriétés mécaniques.....	43
II.5.1. Résistance à la compression	43
II.5.2. Résistance à la traction	45
II.5.3. Module d'élasticité	47
II.6. Instabilité thermique du béton.....	49
II.7. Comportement de l'élément poutre en béton armé sous l'effet d'incendie.....	50
II.8. Utilisation de différents types d'isolants coupe-feu.....	54
II.9. Lacunes actuelles de la recherche sur le béton auto-plaçant	55
II.10. Conclusion.....	56
Chapitre III. Étude de cas et méthodologie.....	57
III.1. Introduction	58
III.2. Hypothèses retenues.....	58
III.3. Justification du choix des poutres.....	58
III.4. Comportement mécanique des poutres en BAP et BAPF à différentes températures	59
III.4.1. Cas A : Effet de la variation de la fraction volumique des fibres d'aciers dans les poutres BAPF.....	59
III.4.2. Cas B : Effet de la variation de la fraction volumique des fibres polypropylènes dans les poutres BAPF	60
III.5. Investigation de la résistance au feu des poutres en BAP et BAPF.....	61

III.5.1.	Cas C : Influence des fibres hybrides et de l'isolant coupe-feu.....	61
III.5.2.	Cas D : Influence de la variation de l'enrobage	63
III.5.3.	Cas E : Influence de la variation de la section transversale	64
III.5.4.	Cas F : Influence de la variation de la longueur et le ratio de charge.....	65
III.6.	Conclusion.....	66
Chapitre IV.	Modélisation numérique et validation	67
IV.1.	Introduction	68
IV.2.	Éléments finis pour l'analyse thermique et mécanique	68
IV.3.	Matériaux	71
IV.3.1.	Loi de comportement	71
IV.3.2.	Propriétés du béton	73
IV.3.3.	Propriétés de l'acier d'armature.....	80
IV.3.4.	Fibres Hybrides	80
IV.4.	Maillage et conditions aux limites.....	81
IV.5.	Hypothèses de l'analyse numérique	83
IV.5.1.	Analyse mécanique	84
IV.5.2.	Analyse thermomécanique	85
IV.6.	Validation du modèle	87
IV.6.1.	Test de Rafi, Nadjai et al. (2007).....	87
IV.6.2.	Test de Rafi, Nadjai (2007).....	87
IV.6.3.	Test de Hou, Ren et al. (2019).....	89
IV.6.4.	Test de Dwaikat et Kodur (2009)	90
IV.7.	Conclusion.....	92
Chapitre V.	Résultats et discussion	93
V.1.	Introduction.....	94
V.2.	Influence des fibres hybrides sur le comportement mécanique des poutres en BAP à des températures élevées	95
V.2.1.	Variation des fibres d'acier.....	95
V.2.2.	Variation des fibres polypropylène	97
V.3.	Effet des fibres hybrides et de l'isolation coupe-feu sur la résistance au feu des poutres.....	99
V.3.1.	Comparaison entre la résistance au feu de BAP et BO	99
V.3.2.	Effet des fibres hybrides	100
V.3.3.	Effet de l'isolation coupe-feu	102

V.4. Influence des différents paramètres sur la résistance au feu des poutres en BAP ...	103
V.4.1. Effet de l'enrobage	103
V.4.2. Effet de la section transversale	105
V.4.3. Effet de la variation de la longueur	106
V.4.4. Effet de la variation de ratio de charge.....	107
V.5. Conclusion	108
Conclusion générale et perspectives.....	110
Références bibliographiques	114

Liste des figures

Figure 0-1 Incendie du complexe d'appartements Downtown à Dubaï en 2016	3
Figure 0-2 Incendie de la tour Grenfell en 2017	4
Figure 0-3 Incendie de l'établissement hospitalier spécialisé (EHS) Mère-Enfant "Bachir Bennacer" à El-Oued	4
Figure 0-4 Explosion du port de Beyrouth, Liban, en 2020	5
Figure I-1 Triangle du feu.....	13
Figure I-2 Courbe d'évolution de la température en fonction du temps lors d'un incendie réel	14
Figure I-3 Courbe d'évolution de la température en fonction du temps (a) dans un compartiment bien ventilé et (b) des gaz à l'intérieur d'un compartiment en feu	15
Figure I-4 Courbes nominales d'incendie	16
Figure I-5 Évaluation de la capacité résiduelle des éléments structuraux en béton armé	20
Figure I-6 Vue illustrée de deux études de cas : (a) Maison J. D. Gomwalk ; (b) Maison Murtala	23
Figure II-1 Effet du chauffage sur le volume cumulatif des pores et la distribution de la taille des pores de la pâte de ciment	27
Figure II-2 Modèles XRD de béton soumis à diverses températures	28
Figure II-3 TGA des échantillons. (a) Ciment A. (b) Ciment B (faible teneur en C3A)	28
Figure II-4 Images MEB de béton avec identification de portlandite (1), C-S-H (2) et oxyde de calcium (3) à température ambiante (a) et après exposition à des températures élevées : 200°C (b) ; 500°C (c) et 800°C (d)	29
Figure II-5 Allongement thermique total du béton	30
Figure II-6 Comparaison de la fracturation de NC-S (béton normal de granulats siliceux), NC- C (béton normal de granulats calcaires) et NC-SC (béton normal de granulats silico-calcaires) après un cycle de chauffage / refroidissement à 600 °C	31
Figure II-7 Courbes ATD des différents granulats. De haut en bas : calcaire, sable siliceux, basalte, sable silico-calcaire	32
Figure II-8 Variation du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température	33
Figure II-9 Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température	34
Figure II-10 Evolution de la perte de masse moyenne des bétons Créf(C) et CPPS 0,75-60 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	35
Figure II-11 Evolution de la porosité des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement	36
Figure II-12 Évolution de la porosité à l'eau des bétons en fonction de la température	36
Figure II-13 Evolution de la porosité absolue (a) et relative (b) des bétons Créf(C), CS 60 et CPPS 0,75-60	37
Figure II-14 Porosité du béton soumis à des températures élevées	38

Figure II-15 Évolution de la perméabilité (a) intrinsèque et (b) intrinsèque relatives des bétons en fonction de la température	39
Figure II-16 . Influence du dosage des fibres sur la perméabilité des bétons	39
Figure II-17 Evolution de la conductivité thermique des bétons BO, BHP, BAP et BPR en fonction de la température	40
Figure II-18 Evolution de la chaleur spécifique des bétons en fonction de la température.....	42
Figure II-19 Évolution de la densité de béton ordinaire (BO) en fonction de la température [73]	43
Figure II-20 Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température pour différents types de bétons	44
Figure II-21 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la compression en fonction de la température pour différents types de béton : (a) Béton à haute résistance, (b) Béton autoplaçant, (c) Béton en poudre réactive	45
Figure II-22 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la traction en fonction de la température pour différents types de bétons (BHP, BAP, BPR).....	46
Figure II-23 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la traction pour différents types de béton avec fibres en fonction de la température : (a) Béton à haute résistance, (b) Béton autoplaçant, (c) Béton en poudre réactive	47
Figure II-24 Evolution du module d'élasticité en fonction de la température pour différents types de bétons : (a) béton a haute résistance, (b) béton auto-plaçant et béton de poudres réactives	48
Figure II-25 Evolution du module d'élasticité de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de fibres hybrides	49
Figure II-26 Evolution de la flèche des poutres BA testées par Dwaikat and Kodur en fonction du temps d'exposition au feu.....	51
Figure II-27 Evolution de la flèche de la poutre en fonction du temps d'exposition au feu	52
Figure II-28 Comportement des poutres en fibres testées par Alyaa A, Mazin B sous l'effet d'un incendie	53
Figure II-29 Courbes charge-déplacement à mi- portée des poutres en fibres testées par Banerji, Kodur sous l'effet d'un incendie.....	53
Figure II-30 Poutres testées par Hou, Ren [98] après exposition au feu.....	54
Figure III-1 Dimensions et détails de ferrailage des poutres étudiées (Cas A)	60
Figure III-2 Détails de ferrailage, dimensions et chargement des poutres sélectionnées pour le cas d'étude B.....	61
Figure III-3 Dimensions, ferrailage, chargement et détails des conditions aux limites des poutres étudiées (Cas C)	62
Figure III-4 Placement de l'isolant coupe-feu dans les poutres étudiées (Cas C).....	63
Figure III-5 Détails de chargement et de ferrailages des poutres en BAPF (Cas D)	64
Figure III-6 Détails des poutres étudiées (Cas E)	65
Figure III-7 Géométrie, détails du ferrailage, chargement et conditions aux limites de la poutre en BAPF (Cas F)	66
Figure IV-1 Géométrie de l'élément LINK33.....	69
Figure IV-2 Géométrie de l'élément SOLID70.....	69
Figure IV-3 Géométrie de l'élément LINK180	70

Figure IV-4 Géométrie de l'élément SOLID65.....	70
Figure IV-5 Géométrie de l'élément SOLID185.....	71
Figure IV-6 Variation des propriétés thermiques du béton en fonction de la température : a) conductivité thermique, b) chaleur spécifique et c) déformation thermique	74
Figure IV-7 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas A à différentes températures.....	76
Figure IV-8 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas B à différentes températures.....	77
Figure IV-9 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas C à différentes températures.....	78
Figure IV-10 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas D à différentes températures.....	79
Figure IV-11 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas E à différentes températures.....	79
Figure IV-12 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas F à différentes températures.....	80
Figure IV-13 Maillage par éléments finis pour a) béton, b) armature et c) isolation contre le feu.....	82
Figure IV-14 Conditions aux limites thermiques.....	83
Figure IV-15 Emplacement de la charge et des supports dans la poutre.....	83
Figure IV-16 Charge vs. Flèche à mi- portée de la poutre BRS1 à température ambiante : Test de Rafi, Nadjai et al. (2007) - modèle EF avec différents maillages	87
Figure IV-17 Comparaison des résultats prédits par EF et ceux mesurés par le test de Rafi, Nadjai: Déplacement vs. Température, a) réponse thermique et b) réponse structurelle.....	89
Figure IV-18 Comparaison entre les réponses prédites par EF et mesurées par le Test de Hou, Ren et al. (2019) pour RPCL-1 (a) thermique et (b) structurelle	90
Figure IV-19 Comparaison entre les résultats prédits et ceux mesurés lors du test de Dwaikat et Kodur (2009) : (a) résultats thermiques, (b) résultats thermomécaniques.....	92
Figure V-1 Evolution de la charge en fonction du déplacement maximal des poutres : a) B0, b) B1, et c) B2, à différentes températures	96
Figure V-2 Taux de réduction de la charge ultime des poutres étudiées à différentes températures.....	97
Figure V-3 Evolution de la charge en fonction du déplacement maximal des poutres du étude de cas B à différentes températures.....	98
Figure V-4 Évolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres BO et BAP	99
Figure V-5 Évolution de la température en fonction du temps dans les armatures et le sommet des poutres BO et BAP	100
Figure V-6 Effet des fibres hybrides sur le déplacement maximal des poutres BAP du étude de cas C sous les conditions d'incendie.....	101
Figure V-7 Distribution de la déformation des barres d'armature en traction à 72 minutes d'exposition au feu (a) B3-1 et (b) B3-2	102
Figure V-8 Effet de l'isolation coupe-feu sur le déplacement maximal des poutres BAP sous conditions d'incendie	103

Figure V-9 Évolution de la température en fonction du temps au bas des poutres de cas d'étude C.....	103
Figure V-10 Charge-Déplacement maximal à température ambiante des poutres BAPF	104
Figure V-11 Évolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres BAPF	104
Figure V-12 Comportement à la flexion des poutres de cas d'étude E à 20°C	105
Figure V-13 Evolution du déplacement maximal en fonction de temps d'exposition au feu des poutres du cas d'étude E	106
Figure V-14 Evolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres en BAPF avec variation de la longueur	107
Figure V-15 Evolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu de la poutre en BAPF avec variation du rapport de charge.....	108

Liste des tableaux

Tableau III-1 Spécifications des poutres (Cas A)	59
Tableau III-2 Présentation des caractéristiques des poutres (Cas B)	60
Tableau III-3 Désignations et détails des poutres étudiées (Cas C).....	62
Tableau III-4 Caractéristiques des poutres étudiées (Cas D).....	64
Tableau III-5 Section transversale et caractéristiques des poutres étudiées (Cas E)	64
Tableau IV-1 Propriétés mécaniques et physiques des fibres.....	81

Liste des symboles

Symboles Thermiques

- A : Surface exposée au feu (m^2)
 h : Coefficient de transfert de chaleur convectif (W/m^2K)
 Q_{conv} : Flux de chaleur convectif (W)
 Q_{rad} : Flux de chaleur radiatif (W)
 t : Temps écoulé après le début de l'essai (minutes)
 $T_{ambiante}$: Température ambiante (K)
 T_{fire} : Température du feu (K)
 $T_{surface}$: Température de la surface de la poutre (K)
 θ_g : Température des gaz dans le compartiment en feu ($^{\circ}C$)
 ϵ_1 : Émissivité de la surface de la poutre
 ϵ_{fire} : Émissivité du feu
 σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$)

Symboles Mécaniques

Propriétés du Béton

- $E_{c,T}$: Module d'élasticité du béton à haute température (GPa)
 E_{sec} : Module d'élasticité sécant (GPa)
 $f'_{c,T}$: Résistance maximale à la compression du béton à haute température (MPa)
 $\epsilon_{c,T}$: Déformation du béton à haute température
 ϵ_{max} : Déformation correspondant à la contrainte maximale $f'_{c,T}$
 $\sigma_{c,T}$: Contrainte du béton à haute température (MPa)

Formulation avec Fibres

- α : Coefficient pour l'interaction des fibres d'acier (0.379)
 β : Coefficient pour l'interaction entre fibres d'acier et de polypropylène (0.02)
 ϵ_c : Déformation maximale pour le béton avec fibres
 ϵ_{c0} : Déformation maximale pour le béton sans fibres
 f_{ft} : Résistance à la traction uniaxiale du béton avec fibres (MPa)
 f_{mt} : Résistance à la traction uniaxiale du béton sans fibres (MPa)
 λ_s : Paramètre caractéristique des fibres d'acier

λ_p : Paramètre caractéristique des fibres de polypropylène

σ_c : Contrainte maximale pour le béton avec fibres (MPa)

σ_{c0} : Contrainte maximale pour le béton sans fibres (MPa)

Paramètres Géométriques

FV : Fraction volumique des fibres (%)

L : Longueur de la poutre (m)

Contributions scientifiques

Publications internationales :

- M. Zitouni; A. Kada; B. Lamri, M.R. Arruda Numerical Analysis of Combined Effect Hybrid Fibres and Fire Insulation on the Fire Resistance Performance of SCC Beams. Periodica Polytechnica Civil Engineering 2024, 68, 1255–1267, doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.36548>.

Publications nationales

- ZITOUNI, M., B. LAMRI, and A. KADA.” Fire resistance of steel fibers reinforced self-compacting concrete beams” Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism.

Communications internationales :

- ZITOUNI, M., B. LAMRI, and A. KADA.” Fire Resistance Performance of Glass Fiber Reinforced Concrete Columns” in CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure. 2022. Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7160-9_27
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A. "Résistance au feu des poutres en béton armé auto-plaçant renforcées par des fibres d'acier", Séminaire international sur l'ingénierie de la construction des villes.
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A. "Fire Resistance Performance of Glass Fiber Reinforced Concrete Columns", CIGOS2021 emerging technologies and applications for green infrastructure, The International Conference series on Geotechnics, Civil Engineering and Structures.
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A" Prédiction numérique du comportement mécanique des poutres en béton armé auto- plaçant de fibres hybrides sous hautes températures " 2nd International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE2021) Skikda, Algeria
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A" Finite element analysis of fire resistance of hybrid fibers reinforced self-compacting concrete" First International Conference on Geotechnical, Structural and advanced Materials Engineering 2021, Biskra, Algeria.
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A" Effect of cover thickness on fire resistance of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete beams " 7th International conference on technological innovation in building 2021, Université "Politécnica" de Madrid, Espagne.
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A "Effet de la section transversale sur la résistance au feu des poutres en béton armé autoplaçant renforcée par des fibres hybrides " 1st International Conference : New Trends on Innovative Construction Materials 2021, Tlemcen, Algeria

- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A "Investigation du comportement des poutres en beton auto-plaçant renforcees de fibres hybrides sous l'effet d'un incendie" 3ème Conférence Internationale de CONstruction Métallique et Mixte CICOMM'2021, 13-14 Mars 2023, Oran, Algeria

Communications nationales :

- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A. "Analyse numérique de la résistance au feu des colonnes en béton armé de fibres de verre", 1er Séminaire National sur les Eco-Matériaux et Conception des Eco-Structures -22 et 23 Mai 2021.
- ZITOUNI M., LAMRI B., KADA A. " Effet de l'ajout de fibres de verre sur le comportement thermique des poutres en béton armé ", 1st National Conference on Civil Engineering and Environment 2021, Medea, Algeria.

Introduction Générale

La sécurité des structures en béton armé (BA) face aux incendies constitue un enjeu majeur dans le domaine de l'ingénierie civile. À mesure que les exigences de performance et de durabilité des bâtiments augmentent, et que la complexité des matériaux utilisés se développe, il devient essentiel de mieux appréhender le comportement des éléments en béton armé lorsqu'ils sont exposés à des conditions d'incendie. Les incendies peuvent engendrer des conséquences dévastatrices, tant sur le plan humain que matériel. Des événements tragiques récents ont mis en lumière l'urgence de mener des recherches approfondies dans ce domaine.

Une étude bibliographique exhaustive révèle un manque d'informations, tant dans la littérature que dans les codes de conception, concernant le comportement des poutres en béton autoplaçant face aux incendies. Cela est d'autant plus préoccupant étant donné la nécessité croissante d'utiliser ce type de béton, réputé pour ses propriétés exceptionnelles, notamment sa fluidité élevée qui facilite le remplissage des moules et élimine le besoin de vibrations. L'objectif principal de cette thèse est donc de combler cette lacune en fournissant une investigation approfondie sur le comportement des éléments poutres en béton armé autoplaçant en cas d'incendie.

Pour atteindre cet objectif, cette recherche explore des solutions innovantes visant à améliorer la résistance au feu de ces poutres. Cela inclut l'intégration de matériaux avancés tels que les fibres hybrides polypropylène et acier, l'utilisation d'isolants coupe-feu, ainsi que l'analyse de l'influence de la variation de l'enrobage et de la section transversale. L'étude est réalisée à l'aide du logiciel de simulation ANSYS Mechanical APDL, qui permet d'examiner le comportement thermique et mécanique des poutres sous des conditions d'incendie.

A. Contexte et motivation

L'incendie représente l'un des dangers les plus redoutés dans le domaine de la construction en raison de ses conséquences potentiellement dévastatrices sur les structures en BA et sur la vie humaine. Malgré les progrès technologiques et les mesures de prévention, il demeure un risque omniprésent, capable de se déclarer de manière imprévisible, que ce soit en phase de construction, en période d'exploitation ou lors de la réhabilitation d'un bâtiment. Il peut provoquer des destructions massives, affectant non seulement les infrastructures matérielles, mais aussi la sécurité des personnes. Les pertes matérielles dues aux incendies sont souvent considérables. Au-delà des dommages directs causés aux bâtiments et équipements, ces

incidents entraînent des coûts indirects liés à l'interruption des activités, à la reconstruction et aux réparations. En effet, les incendies compromettent non seulement la structure physique des bâtiments, mais aussi les systèmes critiques tels que les réseaux électriques, les installations de sécurité et les infrastructures de production. Dans certains cas, la destruction d'éléments structurels clés peut rendre les bâtiments totalement inutilisables, exigeant ainsi des efforts de réhabilitation coûteux et prolongés. Cependant, c'est sur le plan humain que les incendies provoquent les pertes les plus tragiques. La propagation rapide des flammes et des fumées toxiques peut piéger les occupants des bâtiments, réduisant drastiquement le temps nécessaire à une évacuation sécurisée. L'incendie déclaré dans le complexe d'appartements Downtown à Dubaï en 2016 a entraîné des évacuations massives et des dégâts considérables comme montré dans la Figure 0-1, soulevant des préoccupations concernant les matériaux de revêtement utilisés dans le gratte-ciel.



Figure 0-1 Incendie du complexe d'appartements Downtown à Dubaï en 2016 [1]

En 2017, l'incendie de la Grenfell Tower à Londres, Figure 0-2, a mis en lumière les risques liés à une conception structurelle inadaptée aux conditions extrêmes d'incendie. De tels événements soulignent l'importance cruciale de l'ingénierie de la sécurité incendie, ainsi que la nécessité de mieux comprendre le comportement des matériaux face au feu.



Figure 0-2 Incendie de la tour Grenfell en 2017 [2]

En 2019, un tragique incendie s’est déclaré dans une maternité à El Oued en Algérie, faisant de nombreux morts et blessés (voir Figure 0-3).



Figure 0-3 Incendie de l’établissement hospitalier spécialisé (EHS) Mère-Enfant “Bachir Bennacer” à El-Oued [3]

En 2020, plusieurs bâtiments ont été exposés à un événement tragique d’explosions au port de Beyrouth au Liban, Figure 0-4, résultant de la détonation d'environ 2750 tonnes de nitrate d'ammonium, entraînant des incendies, une destruction massive et des pertes humaines.



Figure 0-4 Explosion du port de Beyrouth, Liban, en 2020 [4]

Ces incidents tragiques illustrent la nécessité impérieuse d'améliorer la résistance au feu des structures en béton armé.

Cette étude vise à contribuer à cette démarche en identifiant les lacunes dans les connaissances actuelles et en proposant des solutions innovantes pour renforcer les performances des éléments structuraux lors d'incendies. Cette contribution est non seulement de protéger les infrastructures, mais aussi de sauver des vies en garantissant une évacuation plus sécurisée et en minimisant les impacts économiques liés aux sinistres. En abordant ces enjeux, cette recherche aspire à faire avancer les normes de conception et à enrichir le champ de l'ingénierie de la sécurité incendie

B. Objectifs, portée et organisation de l'étude

L'objectif principal de cette recherche est d'analyser les performances des poutres en béton armé (BA) soumises à des conditions d'incendie. L'étude s'appuie sur une revue de la littérature concernant l'évolution des propriétés thermiques et mécaniques des bétons à haute température, ainsi que sur une analyse numérique du comportement des poutres. Elle vise à identifier les lacunes existantes dans les recherches antérieures et dans les normes de conception, puis à proposer des solutions innovantes pour améliorer la résistance au feu des éléments en BA. Ces solutions incluent l'ajout de fibres hybrides (acier et polypropylène), l'intégration de matériaux isolants coupe-feu, ainsi que des ajustements géométriques (enrobage, section transversale).

La portée de ce travail se décline en quatre axes :

1. Étudier l'évolution des propriétés des bétons avec la température (résistance, conductivité thermique, déformations).
2. Analyser le comportement structural des poutres en BA exposées au feu et identifier leurs modes de défaillance.
3. Évaluer les limites des normes de conception actuelles en matière de résistance au feu.
4. Proposer des approches d'amélioration et en évaluer l'efficacité.

L'importance de cette étude réside dans sa contribution à l'ingénierie de la sécurité incendie. Les résultats attendus visent à renforcer la sécurité des bâtiments, réduire les coûts liés aux sinistres, et enrichir les pratiques de conception et de normalisation.

La thèse est organisée en cinq chapitres. Le **Chapitre I** présente le cadre général de la recherche et les bases théoriques. Le **Chapitre II** propose une revue critique de la littérature. Le **Chapitre III** expose six cas d'études numériques portant sur des poutres en béton autoplaçant, avec ou sans fibres hybrides et isolants. Le **Chapitre IV** décrit la modélisation numérique par éléments finis (ANSYS) et ses validations. Le **Chapitre V** compare les performances du béton autoplaçant avec celles du béton ordinaire et discute les effets des fibres et des isolants. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux apports et propose des perspectives de recherche.

**Chapitre I. Généralités sur la
Conception des Structures en Béton
Armé Face aux Incendies**

I.1. Introduction

Les incendies représentent un risque majeur pour la sécurité des structures en béton armé et des occupants des bâtiments. En raison de leur potentiel destructeur, tant sur le plan matériel qu'humain, l'étude du comportement des bâtiments, en particulier des structures en béton armé (BA), lors d'un incendie est essentielle. Ce chapitre se concentre sur l'analyse des principes fondamentaux régissant le calcul des bâtiments en situation d'incendie, tout en examinant leur réponse thermomécanique. La chaleur générée par un incendie entraîne des modifications significatives des propriétés physiques et mécaniques des matériaux constitutifs des structures, notamment du béton et de l'acier. Les déformations provoquées par la dilatation thermique et l'affaiblissement des résistances mécaniques des matériaux constituent les principaux défis pour garantir l'intégrité structurelle en cas de feu. Par ailleurs, les codes de calcul, tel que l'Eurocode, fournissent un cadre rigoureux pour modéliser et prévoir ces effets, en tenant compte des différents scénarios d'incendie. Dans cette perspective, comprendre la progression d'un incendie et ses impacts thermiques et mécaniques est primordial pour établir des stratégies de conception robustes et conformes aux normes. En définitive, l'objectif est d'assurer une sécurité maximale des occupants tout en limitant les dommages matériels et environnementaux liés aux incendies.

I.2. Historique et évolution de la réglementation incendie

La réglementation en matière de sécurité incendie a connu une évolution progressive, en lien direct avec les grands incendies qui ont marqué l'histoire de la construction. Au départ, les prescriptions étaient essentiellement empiriques et prescriptives, se basant sur des règles simples de dimensionnement et des épaisseurs minimales de béton pour protéger les armatures. Ces approches, développées notamment au cours du XXe siècle, visaient surtout à garantir une durée minimale de résistance au feu (30, 60, 90 minutes, etc.) à travers des tables normatives et des méthodes simplifiées [5]. À partir des années 1970–1980, avec le développement de la modélisation numérique et des essais expérimentaux à grande échelle, les réglementations ont commencé à intégrer des méthodes plus rationnelles. Ainsi, aux États-Unis, les normes ASTM E119 et les recommandations de l'ACI (American Concrete Institute) ont introduit des procédures de test standardisées pour évaluer la résistance au feu des éléments structuraux [6]. En parallèle, la France a utilisé les normes NF P 92-500 et le Règlement de sécurité incendie pour les établissements recevant du public, qui reposaient également sur des approches prescriptives[7]. En Europe, un tournant majeur a été franchi avec l'introduction des Eurocodes,

en particulier l'Eurocode 2, Partie 1-2 [8], qui propose une approche basée sur la performance. Contrairement aux anciennes méthodes prescriptives, l'Eurocode permet :

- Utilisation de méthodes tabulées harmonisées au niveau européen,
- Modèles de calcul simplifiés intégrant les températures et la capacité portante,
- Méthodes avancées impliquant une modélisation thermomécanique détaillée.

Cette évolution illustre le passage d'une approche « one-size-fits-all » prescriptive, où l'ingénieur appliquait des règles fixes sans grande flexibilité, à une approche moderne et basée sur la performance, qui évalue directement le comportement réel de la structure en feu [9]. Cette transition vise à améliorer la sécurité, mais aussi à optimiser la conception en réduisant les surépaisseurs de béton et en intégrant de nouveaux matériaux comme les fibres hybrides ou les isolants thermiques.

I.3. Aspects environnementaux et sociétaux des incendies

Les incendies de bâtiments ne se limitent pas aux pertes humaines et matérielles immédiates ; ils engendrent également des impacts environnementaux et sociétaux considérables qui s'inscrivent sur le moyen et le long terme. Ces effets, encore parfois sous-estimés, concernent aussi bien la qualité de l'air et des milieux naturels que la résilience sociale et économique des territoires touchés [10]. Sur le plan environnemental, la combustion des matériaux de construction et du mobilier génère une grande variété de polluants atmosphériques. Parmi ceux-ci, on retrouve des fumées toxiques, des particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}), ainsi que des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote (NO_x). Selon Gann, Averill [10], les incendies de structures constituent l'une des principales sources accidentelles de pollution atmosphérique urbaine, contribuant ainsi à la dégradation de la qualité de l'air et au changement climatique. En outre, la combustion des polymères, revêtements, peintures et équipements électriques entraîne la libération de substances hautement toxiques et persistantes telles que les dioxines et les furanes [11]. Ces polluants, caractérisés par leur bio-accumulation et leur durée de vie élevée dans l'environnement, contaminent non seulement l'air mais également les sols et les eaux. Les eaux d'extinction utilisées par les sapeurs-pompiers véhiculent en effet une charge importante en hydrocarbures, métaux lourds et résidus organiques, qui peuvent se déverser dans les nappes phréatiques ou les réseaux d'assainissement [12]. L'impact environnemental des incendies dépasse donc largement le cadre du site sinistré, affectant les écosystèmes environnants.

D'un point de vue sociétal, les conséquences sont multiples. Les coûts économiques englobent la reconstruction, l'arrêt d'activité pour les entreprises, la perte de patrimoine et le relogement des populations. L'OCDE [13] souligne que les catastrophes urbaines comme les incendies majeurs ont des effets de cascade sur l'économie locale, pouvant entraîner une perte durable de productivité. Sur le plan psychologique, les victimes et les communautés affectées subissent un traumatisme durable, nécessitant un accompagnement social et médical [14].

Face à ces enjeux, l'ingénierie de la sécurité incendie doit être envisagée non seulement comme un outil de protection structurelle, mais aussi comme un levier de résilience urbaine et environnementale. Les stratégies incluent l'utilisation de matériaux à faible émission de fumées et résistants au feu, la compartimentation des espaces, ainsi que l'intégration de systèmes actifs (sprinklers, détecteurs) et passifs (isolation, enrobage des armatures). Ces mesures permettent de réduire à la fois les pertes humaines, l'empreinte écologique et l'impact économique des incendies [15].

Enfin, la prévention incendie dans le cadre du développement durable contribue directement aux Objectifs de Développement Durable (ODD) fixés par les Nations Unies, notamment l'ODD 3 (santé et bien-être), l'ODD 9 (infrastructures résilientes et innovation) et l'ODD 13 (lutte contre le changement climatique).

I.4. Principes fondamentaux du calcul des bâtiments en situation d'incendie

La réponse d'une structure en BA face à un incendie est étroitement liée à son comportement lorsqu'elle est exposée aux flammes. En règle générale, la réaction de la structure au feu peut être résumée de la manière suivante :

- La température augmente en raison du transfert de chaleur émanant du feu, ce qui est également désigné comme la réponse thermique de la structure.
- Une fois la structure chauffée, elle se déforme en fonction d'un coefficient de dilatation thermique généralement positif.
- Parallèlement, une élévation significative de la température entraîne l'adoucissement des matériaux, entraînant ainsi une perte de raideur et de résistance, ce qui engendre des déformations supplémentaires.

- Lorsque la perte de raideur et de résistance atteint un niveau tel que la structure ne peut plus supporter les charges appliquées, un effondrement partiel ou total de celle-ci devient inévitable.

Il est généralement facile de saisir le comportement d'une structure exposée au feu. Cependant, il est crucial pour un ingénieur de pouvoir prédire avec précision le comportement de la structure d'un bâtiment afin d'évaluer correctement son niveau de sécurité.

Dans le domaine de l'ingénierie de la sécurité incendie contemporaine, deux principales approches d'évaluation existent pour analyser le comportement thermomécanique des structures ou des éléments de structure exposés au feu :

- Les tests au feu réalisés à l'aide de fours d'essai
- L'application de calculs simplifiés ou de modèles avancés.

I.5. Objectifs de la sécurité incendie

Les objectifs généraux de la sécurité incendie visent à réduire les risques de pertes causées par un incendie. Ces pertes peuvent se mesurer en termes de décès ou de blessures physiques subies par des personnes, de pertes financières dues aux dommages matériels, ainsi que des impacts environnementaux. Pour atteindre ces objectifs, la réglementation en vigueur définit des exigences stipulant que, lors d'un incendie, les constructions doivent être conçues et réalisées de manière à :

- Assurer la résistance de la capacité portante du bâtiment pendant une période déterminée.
- Limiter la génération et la propagation du feu et de la fumée à l'intérieur de la construction.
- Réduire la propagation du feu vers les constructions environnantes.
- Permettre aux occupants de quitter le bâtiment ou d'être secourus par d'autres moyens.
- Garantir la sécurité des équipes de secours.

Bien qu'elle ne puisse à elle seule satisfaire tous les « objectifs de sécurité incendie » fondamentaux, la résistance au feu de la structure constitue généralement un élément essentiel de la stratégie de sécurité incendie d'un bâtiment.

L'objectif du calcul du comportement au feu est de démontrer que les éléments structurels se comporteront de manière appropriée en cas d'incendie. La performance d'un élément structurel est généralement évaluée en fonction de sa capacité à supporter une charge appliquée, mais lorsqu'un élément fait également partie d'une limite de compartiment, des critères d'isolation et d'intégrité doivent également être respectés.

L'évaluation de la performance au feu d'un élément structurel se déroule en quatre étapes, résumées ci-dessous :

1. Évaluer l'action thermique, c'est-à-dire l'intensité du feu à laquelle l'élément structurel sera exposé.
2. Évaluer la réponse thermique, c'est-à-dire l'historique de la température en fonction du temps de l'élément pour une action thermique donnée.
3. Évaluer l'action mécanique, c'est-à-dire la charge que l'élément devra probablement supporter lors d'un incendie.
4. Évaluer la réponse mécanique, c'est-à-dire la résistance de l'élément en fonction de son historique de température et de temps.

I.6. Fondements théoriques de l'ingénierie incendie

Dans le cadre de l'ingénierie incendie, les bâtiments en béton armé doivent, en cas d'incendie, être capables de supporter leurs charges tout en empêchant la propagation du feu et des fumées vers les compartiments et les bâtiments voisins. Cela n'est réalisable que sur la base de concepts fondamentaux régis par les codes en vigueur, tels que l'Eurocode. Parmi ces concepts, on retrouve : la physique du feu et sa modélisation réglementaire, la classification des matériaux selon leur combustibilité et leur résistance, les propriétés thermomécaniques de l'acier et du béton, ainsi que les durées de résistance au feu en fonction du type de construction.

I.6.1. Physique de l'incendie

a) Le feu : Pour qu'un incendie se déclenche, trois éléments sont indispensables : l'oxygène, un matériau combustible et une source de chaleur. Ces trois composants forment ce que l'on appelle communément le triangle du feu [16], comme illustré dans Figure I-1.

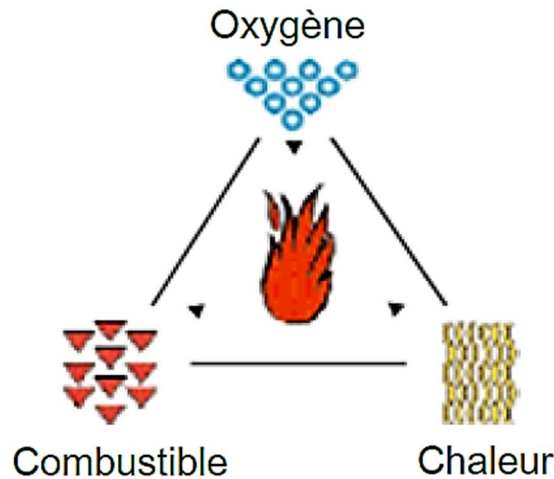


Figure I-1 Triangle du feu

La combustion est une réaction exothermique (dégageant de la chaleur) entre l'oxygène et des substances solides, liquides ou gazeuses (combustibles). Sous l'effet d'une énergie d'activation, ou source de chaleur (flamme, échauffement, point chaud), l'oxygène et les matériaux combustibles entrent en réaction lorsque la température d'inflammation est atteinte.

b) Développement d'un incendie

La durée d'un incendie se divise généralement en trois phases principales : le développement (de l'ignition à l'embrasement généralisé, appelé flashover), la phase de pleine intensité, et enfin la décroissance. Ces différentes étapes sont illustrées dans la Figure I-2, qui montre l'évolution de la température dans un compartiment en fonction du temps.

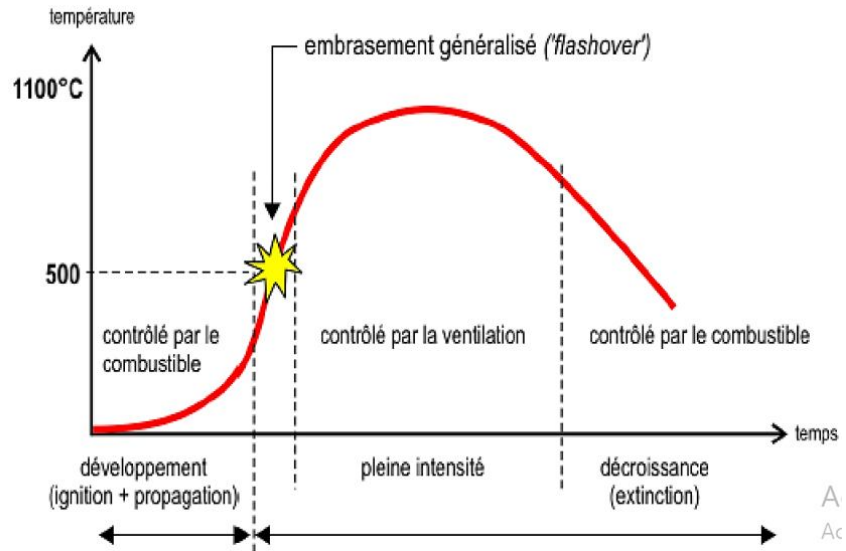
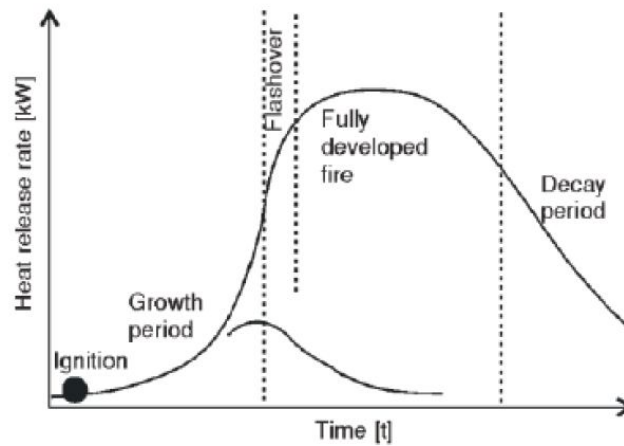


Figure I-2 Courbe d'évolution de la température en fonction du temps lors d'un incendie réel [17]

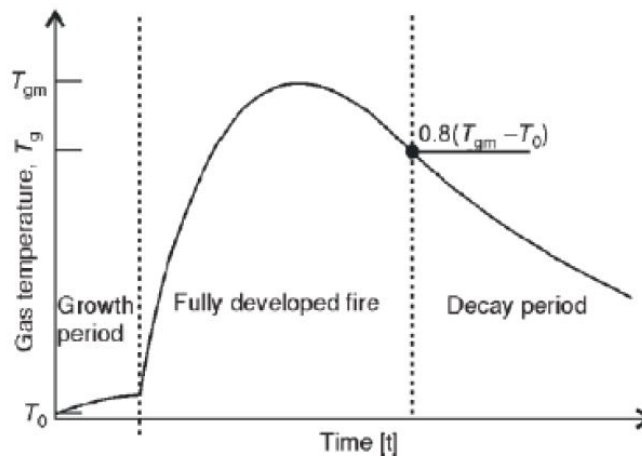
Au cours de l'évolution d'un incendie, une transition rapide peut se produire entre les deux premières phases, appelée embrasement généralisé ou *flashover*. Ce phénomène survient généralement à une température comprise entre 500 °C et 600 °C, sous réserve de la disponibilité de carburant, de ventilation adéquate et d'une forte propension à la propagation du feu. En l'absence de ces conditions, l'incendie dans le compartiment ne parviendra pas à générer un taux de dégagement de chaleur suffisant pour provoquer l'embrasement. Le feu restera alors limité autour du point d'ignition comme le montre la Figure I-3 (a).

- Première phase (Développement de l'incendie) :
 - Feu couvant : Période où la température reste localisée au point d'ignition ; les premiers gaz et fumées apparaissent ; le feu reste à basse température pendant une durée difficile à estimer.
 - Déclenchement de l'incendie : Le foyer devient plus actif, mais reste localisé. Le rayonnement ou le contact des flammes atteint les matériaux environnants, et les gaz chauds commencent à remplir le volume.
 - Embrasement généralisé (flashover) : Les gaz chauds accumulés provoquent l'inflammation des combustibles sous l'effet de leur température, entraînant une généralisation rapide du feu sur une courte période.
- Deuxième phase (Pleine intensité) : La température atteint son pic, puis commence à diminuer jusqu'à environ 80 % de la valeur maximale, selon Harmathy [18] comme représenté dans la Figure I-3 (b).

- Troisième phase (Décroissance) : L'intensité du feu diminue progressivement avec la consommation du combustible restant.



(a)



(b)

Figure I-3 Courbe d'évolution de la température en fonction du temps (a) dans un compartiment bien ventilé et (b) des gaz à l'intérieur d'un compartiment en feu [18]

La sévérité d'un incendie et la durée de ses différentes phases dépendent de plusieurs facteurs :

- La quantité et la répartition des matériaux combustibles (charge calorifique) ;
- La vitesse de combustion de ces matériaux ;
- Les conditions de ventilation (présence et taille des ouvertures) ;
- la géométrie du compartiment ;

- Les propriétés thermiques des parois du compartiment ;
- Les mesures actives de lutte contre l'incendie.

Parmi ces facteurs, la charge calorifique et la ventilation sont les plus déterminants. Le feu sera contrôlé par le combustible s'il y a une quantité suffisante d'oxygène disponible pour la combustion. En revanche, il sera contrôlé par la ventilation en cas d'insuffisance d'oxygène.

I.6.2. Modèles d'incendie

La manière la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, qui établissent une relation entre l'évolution de la température des gaz et le temps. Ces courbes, basées sur l'observation d'incendies réels. Selon Denoël [17], les courbes nominales ont été développées pour tester expérimentalement les éléments de construction, permettant ainsi de les classer en fonction de leur résistance et de leur réaction au feu. Il est essentiel que les éléments testés dans différents fours soient soumis à une action thermique identique. Dans le cadre de la modélisation d'un incendie dans un bâtiment, ces courbes servent de référence conventionnelle, par exemple la courbe température/temps normalisée ISO 834, la courbe de feu extérieur, la courbe de feu d'hydrocarbure. Ces trois courbes d'incendies nominaux sont données par l'EC1 partie1-2 [19] comme montrés dans la Figure I-4.

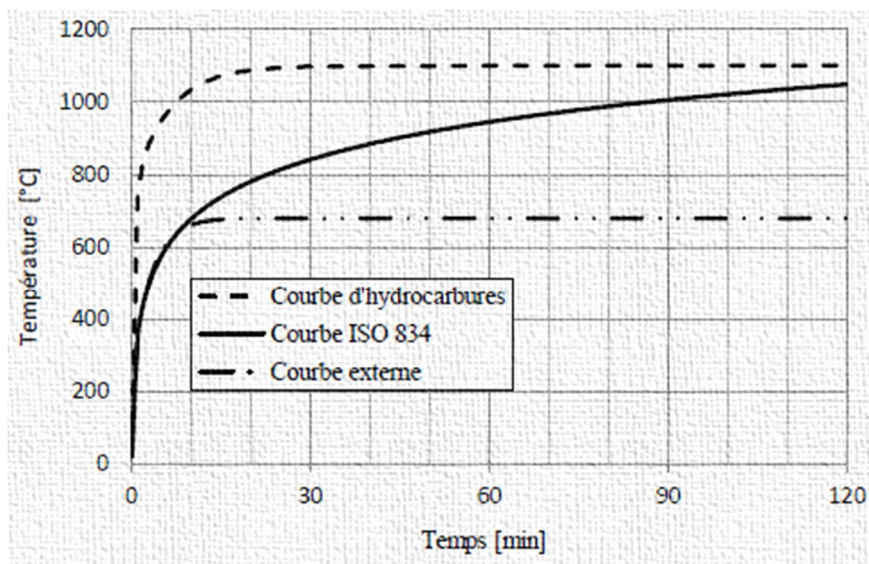


Figure I-4 Courbes nominales d'incendie [8]

I.6.2.1. Courbe standard ISO 834

Dans la modélisation des incendies en bâtiment, la courbe ISO 834 sert de référence conventionnelle. L'évolution de la température en fonction du temps est définie par la formule suivante :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1)$$

Avec : température des gaz dans le compartiment en feu (°C)

t : temps après le début de l'essai (en minutes)

I.6.2.2. Courbe des hydrocarbures

Développée dans les années 1970 par la compagnie pétrolière Mobil, cette courbe se caractérise par une montée en température très rapide, atteignant 900 °C dans les cinq premières minutes. Cette initiative visait à élaborer une procédure de test pour évaluer les matériaux de protection contre le feu utilisés sur les plates-formes de forage en mer et dans les complexes pétroliers. La courbe température/temps des hydrocarbures est définie par la formule suivante :

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e - 0.167t - 0.675e - 2.5t)$$

I.6.2.3. Courbe de feu extérieur

Lorsque la structure à évaluer en termes de résistance au feu est située à l'extérieur ou correspond à un compartiment adjacent ou situé sous un mur extérieur, une courbe d'incendie extérieure peut être utilisée. Celle-ci est définie par la formule suivante :

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0.687e - 0.32t - 0.313e - 3.8t)$$

I.7. Approches avancées de l'ingénierie incendie

I.7.1. Ingénierie de performance en sécurité incendie (PBFE)

Traditionnellement, l'évaluation de la résistance au feu des structures repose sur des approches prescriptives utilisant des courbes normalisées telles que l'ISO 834 ou la courbe hydrocarbure. Bien que ces méthodes soient simples à appliquer, elles ne reflètent pas toujours la réalité d'un incendie, car elles négligent des paramètres essentiels tels que la ventilation, la charge calorifique réelle ou encore la géométrie du compartiment. L'ingénierie de performance en sécurité incendie (Performance-Based Fire Engineering – PBFE) constitue une alternative moderne. Elle repose sur des modèles physiques et numériques permettant de simuler des scénarios réalistes d'incendie, incluant la charge calorifique effective, les conditions de ventilation, la configuration spatiale et les propriétés spécifiques des matériaux. Cette approche permet une meilleure prédiction du comportement thermomécanique des

structures et une optimisation plus fine des mesures de protection. Elle est aujourd'hui intégrée progressivement dans les pratiques internationales et notamment dans les Eurocodes [20].

I.7.2. Couplage thermo-hydro-mécanique dans le béton

L'exposition au feu ne se limite pas à un simple transfert thermique. Dans le béton armé, la montée en température entraîne une série de phénomènes couplés : perte d'eau libre et d'eau chimiquement liée, augmentation de la pression interstitielle et réduction progressive des propriétés mécaniques. Ces interactions sont connues sous le nom de couplage thermo-hydro-mécanique, qui joue un rôle déterminant dans le comportement du béton soumis à de fortes températures. Elles expliquent la microfissuration, la diminution du module d'élasticité ainsi que la perte de résistance à la compression et d'adhérence béton-acier [21].

I.7.3. Le phénomène de spalling

Le spalling, ou éclatement explosif du béton exposé au feu, est l'un des phénomènes les plus critiques en ingénierie incendie. Il peut résulter de trois mécanismes principaux : le spalling par pression de vapeur, provoqué par l'accumulation de vapeur d'eau dans les pores du béton ; le spalling thermique, lié aux gradients de température entre les couches superficielles et internes ; et le spalling mécanique, qui apparaît sous l'effet combiné des contraintes internes et des charges appliquées. Ce phénomène réduit la section efficace de l'élément, expose plus rapidement les armatures à la chaleur et accélère ainsi la perte de portance de la structure [22].

I.7.4. Durabilité post-incendie des structures en béton armé

Même lorsqu'un incendie n'entraîne pas l'effondrement immédiat d'une structure, les altérations subies peuvent compromettre sa durabilité à long terme. On observe généralement une microfissuration généralisée qui augmente la perméabilité du béton, une perte d'adhérence béton-acier qui fragilise la capacité portante et une modification microstructurale caractérisée par une augmentation de la porosité et une dégradation des hydrates. Ces altérations doivent être prises en compte dans les stratégies de réhabilitation et de maintenance post-incendie afin d'assurer la sécurité et la longévité des ouvrages [7].

I.7.5. Comparaison des approches normatives internationales

Les réglementations en matière de résistance au feu varient considérablement selon les régions du monde. En Europe, l'Eurocode 2 – Partie 1-2 [23] propose plusieurs méthodes de vérification (méthodes tabulées, simplifiées et avancées), permettant d'adapter le niveau d'analyse au projet. Aux États-Unis,

la NFPA (National Fire Protection Association) privilégie une approche orientée vers la protection active (sprinklers, systèmes de détection et compartimentage). À l'échelle internationale, la norme ISO 834 reste la référence pour définir une courbe de feu standard appliquée aux essais de résistance. La comparaison de ces approches montre que les normes européennes intègrent plus largement l'ingénierie de performance (PBE), tandis que les normes américaines mettent davantage l'accent sur la gestion opérationnelle du risque [23-25].

I.8. Évaluation des dommages causés par l'incendie aux structures en béton armé

I.8.1. Dommages aux structures en béton armé après incendie

Les bâtiments en BA présentent généralement une résistance naturelle élevée au feu, et des températures importantes ne provoquent pas systématiquement leur effondrement. Toutefois, une évaluation post-incendie est indispensable afin de déterminer l'état réel du béton. Les propriétés du béton exposé au feu ne sont pas uniformes dans la section transversale, les couches superficielles étant celles qui subissent la dégradation la plus sévère [26]. Bien que les structures en BA conservent souvent leur stabilité après un incendie, les dommages et les déformations résiduelles nécessitent en général des travaux de réparation [27]. De nombreux chercheurs ont étudié le comportement des éléments en BA endommagés par le feu Ryu, Shin [28]. Comparés aux structures en acier ou en bois, les bâtiments en BA offrent une résistance naturelle au feu nettement supérieure [29]. L'enrobage du béton agit comme isolant, limitant la pénétration de chaleur vers les armatures et permettant ainsi à la structure de conserver une partie importante de sa capacité portante pendant et après l'exposition au feu. Cependant, le béton à haute performance présente une résistance au feu, inférieure à celle du béton ordinaire, tandis que le béton léger tend à mieux résister en cas d'incendie. Néanmoins, contrairement à l'acier et au bois, le béton est rarement totalement détruit par le feu [30]. Lorsqu'il est soumis à des températures élevées, le béton subit des transformations thermiques, physiques et chimiques qui réduisent ses performances mécaniques [22]. Malgré certaines différences, les propriétés thermiques du béton ordinaire, du béton haute performance, du béton léger, du béton projeté et des mortiers restent globalement comparables [31]. Les éléments structuraux tels que les dalles et les poutres en BA proches du plafond sont particulièrement vulnérables, car ils sont directement exposés aux courants convectifs ascendants durant un incendie [32]. Malgré les effets de la dégradation thermique, les structures en BA conservent en général une capacité résiduelle importante grâce à la résistance intrinsèque du béton au feu, rendant souvent possible leur réutilisation. Toutefois, les dommages thermiques peuvent entraîner une perte irréversible

de résistance et de fonctionnalité. Ainsi, une évaluation détaillée de la capacité résiduelle est nécessaire afin de guider les décisions relatives aux réparations et à l'avenir des structures en BA affectées par le feu [33]. La Figure I-5 présente un schéma d'évaluation de la capacité résiduelle des éléments structuraux en BA.

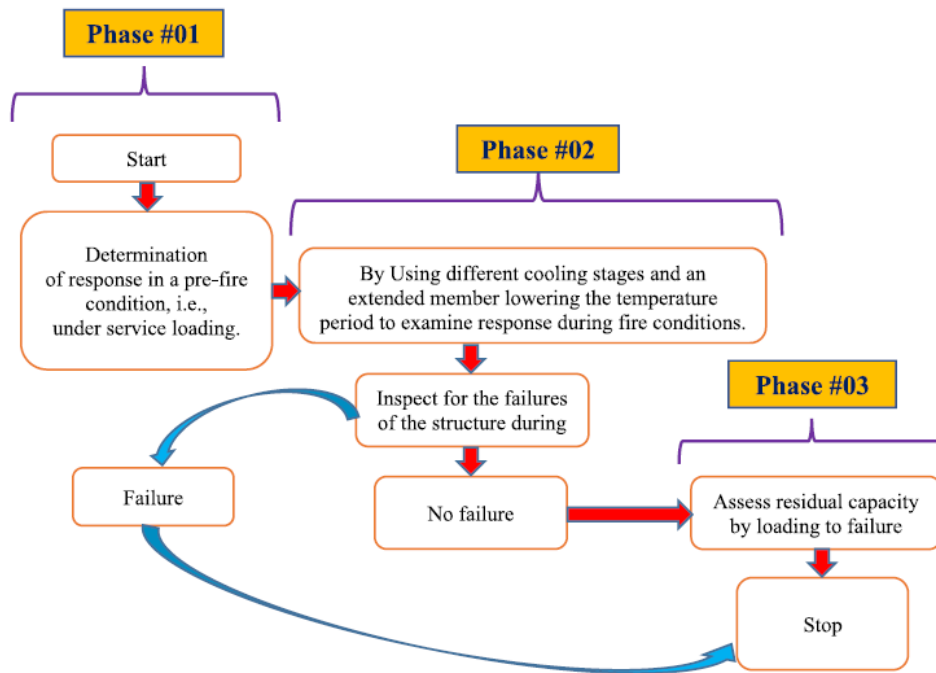


Figure I-5 Évaluation de la capacité résiduelle des éléments structuraux en béton armé [34]

I.8.2. Détermination des dommages dus à l'incendie

L'évaluation de l'effet d'un incendie sur la capacité portante et la sécurité globale d'une structure nécessite généralement l'analyse de la résistance résiduelle du béton. Cette évaluation permet de déterminer si la structure peut être réutilisée, si des interventions de réparation spécifiques sont requises, ou si elle doit être démolie en raison de dommages sévères. Lorsque les éléments structuraux sont fortement exposés au feu, les zones de dégradation du béton sont en général évidentes et facilement identifiables [35]. En revanche, dans les composants ayant subi des dommages plus limités, l'inspection visuelle ne révèle pas toujours de modifications claires de la surface. Dans ces cas, des analyses en laboratoire et des essais in situ apportent des informations plus précises sur l'état interne du matériau. Parmi les différentes propriétés, la résistance en compression demeure le paramètre le plus déterminant après une exposition au feu. Il est particulièrement important de déterminer la profondeur de la couche externe affectée par la chaleur afin de classer correctement le béton comme endommagé [36]. Divers scénarios

d'incendie y compris les feux normalisés, paramétriques et naturels sans phase de refroidissement, sont utilisés pour étudier le comportement des structures en béton armé. Les modèles paramétriques et naturels sont généralement considérés comme des représentations plus réalistes des conditions réelles d'incendie que le feu normalisé conventionnel [37]. Lors des évaluations post-incendie, l'épaisseur des zones externes du béton suffisamment détériorées pour être considérées comme détruites constitue un paramètre clé [26]. Une liste de contrôle détaillée pour l'inspection après incendie est présentée au Table I-1.

Table I-1 Liste de contrôle de l'inspection après incendie [38].

Étude	Examen simple	Examen détaillé
Évaluation visuelle	- Décoloration du béton - Dimensions de la fissure - Écaillage (spalling)	
Technique simple	- Essai au scléromètre (Schmidt hammer test) - Essai de carbonatation du béton	
Essai mécanique	- Prélèvement du carottage du béton - Prélèvement d'une barre d'acier - Essai de vibration - Essai de chargement	
Analyse des matériaux		- Méthode par spectre UV - Capacité micro-ondes - Mesure de thermoluminescence - Essai ultrasonique - Technique de diffraction des rayons X
Étude numérique		- Méthode par spectre UV - Capacité micro-ondes - Mesure de thermoluminescence - Essai ultrasonique - Technique de diffraction des rayons X

I.8.3. Application de la technique pétrographique pour l'évaluation des dommages d'incendie des structures

Les études pétrographiques permettent d'identifier certains minéraux, les textures des roches, la granulométrie, ainsi que les proportions relatives ou quantitatives des différents constituants. Elles fournissent également des informations sur les caractéristiques physico-chimiques des matériaux et leur degré de dégradation, en plus de leur typologie précise [39]. Cette approche a été largement utilisée pour évaluer les dommages causés par le feu aux éléments en béton armé, car elle permet l'observation directe des microfissures et des modifications minéralogiques. Dans les maçonneries contenant des granulats fins réactifs (RFA) et des granulats grossiers réactifs (RCA), l'examen pétrographique a confirmé la présence de dégradations liées au feu, ce qui a permis d'expliquer certaines divergences dans les résultats des essais de résonance linéaire. Les essais de résonance non linéaire réalisés sur des éprouvettes en RCA et RFA ont permis d'identifier l'apparition de la réaction alcali-silice (ASR) et ont montré une forte corrélation avec l'expansion ASR pour différents types de formulations. Ces résultats démontrent que l'essai de résonance non linéaire présente une grande sensibilité et peut

quantifier l'état de dégradation lié à l'ASR dans les éprouvettes de béton sans recourir à une mesure de référence [40].

Dans une autre étude de Flores Sasso, Prieto Vicioso [41], les propriétés physiques et chimiques de bâtiments historiques en béton en République Dominicaine (construits entre 1917 et 1955) ont été comparées, mettant en évidence des variations dues aux pratiques de construction et à l'âge. Des bâtiments conçus par des ingénieurs américains et dominicains ont été analysés, représentant pratiquement une génération entière de l'histoire de la construction. Les techniques de caractérisation utilisées comprenaient la diffraction des rayons X (XRD), la microscopie électronique à balayage avec spectroscopie dispersive en énergie (SEM-EDS), la fluorescence des rayons X (XRF), la porosimétrie au mercure (MIP), l'analyse pétrographique et l'inspection visuelle. Les résultats ont montré que la composition du béton évoluait avec le temps. La quasi-totalité des échantillons présentait les pics typiques des phases cristallines, tels que le quartz, l'albite et la calcite, en proportions variables [41]. Des lames minces ($\sim 30\text{ }\mu\text{m}$) observées au microscope pétrographique Carl Zeiss Jenapol ont permis l'étude directe de la minéralogie, de la texture et de la composition des roches. Toutefois, l'identification des minéraux très fins reste difficile, ce qui rend préférable l'utilisation combinée de cette méthode avec la diffraction des rayons X et l'inspection microscopique. Conformément à la norme ASTM C-856, ces analyses sont réalisées à grande échelle afin de déterminer la qualité du compactage, l'homogénéité de la matrice cimentaire et la dispersion du liant. Les résultats d'analyses chimiques accompagnent la description de chaque échantillon. Par exemple, l'échantillon T1 était composé de grains de taille uniforme et de différentes teintes (crème, gris foncé, gris clair) répartis dans une matrice gris clair (voir Figure I-6). Des cristaux de quartz et de feldspath altérés, avec des textures myrmécitiques, indiquaient une altération de roches ignées acides. Les granulats étaient semi-anguleux à sphériques, avec des dimensions allant de plusieurs millimètres à moins de $100\text{ }\mu\text{m}$, sans halos de réaction alcali-silice ni fractures thermiques visibles (Figure I-6)[42].

Des recherches récentes ont étudié la possibilité d'utiliser des méthodes d'apprentissage profond pour l'analyse pétrographique du béton [46]. Les résultats ont montré que les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) pouvaient segmenter les images de béton sans coloration de la pâte cimentaire à la phénolphthaleïne. Cela démontre que les CNN constituent un outil prometteur pour l'analyse pétrographique automatisée et l'amélioration de l'interprétation visuelle [43, 44]. De plus, la pétrographie ne se limite pas au béton : elle peut également être appliquée à la pierre, à la brique et au mortier. Elle permet l'identification précise des

géomatériaux dégradés, entraînant des économies de coûts et une meilleure sécurité lors des réparations [44]. Une autre étude [45] a combiné des mesures de résistance sur carottes et des observations au microscope optique pour analyser du béton endommagé par le feu. Des échantillons ont été prélevés sur des dalles exposées à de hautes températures, et la microscopie laser a permis d'examiner la morphologie des granulats, la pâte de ciment, les fissures et les microvides. En fonction de l'état physique de l'échantillon et des observations microscopiques, les pétrographes ont pu estimer la température minimale d'exposition au feu et ses effets relatifs sur la profondeur de dégradation du béton [45].



Figure I-6 Vue illustrée de deux études de cas : (a) Maison J. D. Gomwalk ; (b) Maison Murtala [46]

I.9. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'importance fondamentale de l'ingénierie incendie dans le domaine de la construction et de la sécurité des structures. Les incendies représentent non seulement une menace immédiate pour la stabilité des bâtiments et la vie des occupants, mais également une source d'impacts environnementaux et sociétaux durables. À travers l'analyse des réglementations, depuis les approches prescriptives traditionnelles jusqu'aux méthodes modernes basées sur la performance, il apparaît clairement que la compréhension scientifique et normative du comportement des matériaux et des structures face au feu constitue un enjeu central pour l'ingénierie contemporaine. La présentation des principes de base, allant de la physique du feu et du développement d'un incendie jusqu'aux modèles normatifs (ISO, Eurocode, NFPA), a permis de poser les fondements nécessaires à la prédiction du comportement thermomécanique des éléments en béton armé soumis à des températures extrêmes. Les phénomènes critiques tels que la dilatation thermique, la perte de résistance mécanique, le spalling ou encore la dégradation microstructurale du béton ont été identifiés

comme des facteurs déterminants dans la perte de performance des structures. Par ailleurs, l'étude des dommages post-incendie a montré que, même en l'absence d'effondrement total, la durabilité et la capacité résiduelle des ouvrages sont souvent compromises, nécessitant une évaluation minutieuse et parfois des réparations lourdes. Dans ce contexte, des approches avancées telles que l'ingénierie de performance en sécurité incendie (PBFIE) et l'analyse couplée thermo-hydro-mécanique offrent de nouvelles perspectives pour une modélisation plus réaliste et une conception optimisée. En outre, ce chapitre a souligné que la sécurité incendie ne peut être réduite à une simple exigence technique ; elle constitue également un levier de durabilité et de résilience urbaine. La prise en compte des impacts environnementaux et économiques liés aux incendies s'inscrit pleinement dans une vision de développement durable et contribue aux objectifs internationaux en matière de résilience, de santé publique et de lutte contre le changement climatique. En définitive, la compréhension approfondie des interactions entre le feu, les matériaux et les structures est une condition indispensable pour concevoir des bâtiments plus sûrs, plus durables et capables de résister aux situations extrêmes. L'évolution continue des codes et des outils numériques ouvre de nouvelles opportunités pour améliorer la prédiction du comportement des structures et, par conséquent, pour réduire les risques humains, matériels et environnementaux associés aux incendies.

Chapitre II. Recherche bibliographique

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une analyse approfondie des études existantes sur l'impact des températures élevées générées par le feu sur les propriétés thermiques et mécaniques de différents types de béton. Il examine également le comportement thermomécanique de ces matériaux lorsqu'ils sont utilisés dans les éléments structuraux. Cette revue bibliographique met en lumière les enjeux critiques liés à la performance des bétons en conditions d'incendie, fournissant un cadre essentiel pour la compréhension et l'amélioration de leur résistance et leur durabilité dans des applications structurelles.

II.2. Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées

II.2.1. Evolution de la matrice cimentaire

Lorsque le béton est exposé à des températures élevées, différentes transformations physiques et chimiques se produisent dans la pâte de ciment. Khoury [47] a étudié l'effet du chauffage sur le volume cumulatif des pores et la distribution de la taille des pores de la pâte de ciment, comme le montre la Figure II-1. Les résultats de cette étude sont les suivants :

- Augmentation de l'hydratation, perte d'eau capillaire lente et réduction des forces de cohésion à mesure que l'eau se dilate (20-80°C).
- Augmentation marquée de la perméabilité à l'eau (100°C).
- Augmentation du taux de perte d'eau capillaire puis d'eau liée physiquement (80-200°C). Perte d'eau liée chimiquement (80-850°C).
- Augmentation marquée de la porosité et de la microfissuration (300°C).
- Point critique de l'eau lorsqu'aucune eau libre n'est possible (374°C).
- Dissociation de Ca(OH)_2 en CaO et eau (400-600°C).
- Étoile de reliure en céramique qui remplace la reliure hydraulique (800°C).
- Étoile de fusion d'un constituant (1060°C).

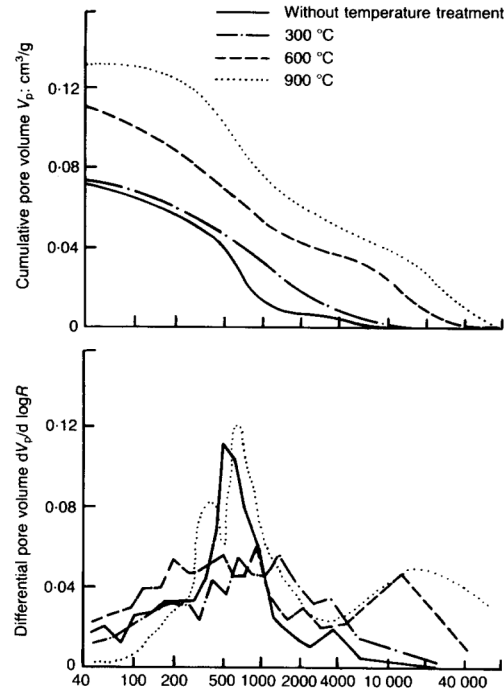


Figure II-1 Effet du chauffage sur le volume cumulatif des pores et la distribution de la taille des pores de la pâte de ciment [47]

Dans la pâte de ciment chauffée, tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre et la décomposition de l'ettringite, avant la température de 100°C. Les transformations des principaux composants de la pâte de ciment Portland au cours de l'échauffement sont présentées sur la Figure II-2 et la Figure II-3.

L'élévation de la température entraine les processus suivants :

- Entre 30 et 120 ° C, l'eau libre et une partie de l'eau absorbée s'échappent du béton [47-49], la perte d'eau libre se produit plus rapidement dans le cas du ciment à faible teneur en C3A (Figure II-4) [48].
- Entre 130°C et 170°C : le gypse se décompose d'après [50, 51].
- La déshydratation du gel de ciment (CSH) s'amorce à 180 °C et se poursuit jusqu'à 300 °C [47-49, 52].
- Entre 450 °C et 550 °C, la portlandite se décompose en eau et en chaux libre selon la réaction suivante [48, 49, 52] :



- Entre 600 °C et 700 °C, se produit la décomposition du CSH, c'est la seconde étape de déshydratation des hydrates de calcium au sein du béton [47-49], et de nouvelles phases cristallines prennent naissance comme dans le cas de la cristobalite et de la larnite [49].
- Entre 700 °C et 900 °C, le carbonate de calcium, composant principal des granulats calcaires se décompose suivant la réaction [47, 48] :

$$\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$$
- La fusion de la pâte de ciment part de 1100 °C [52, 53].

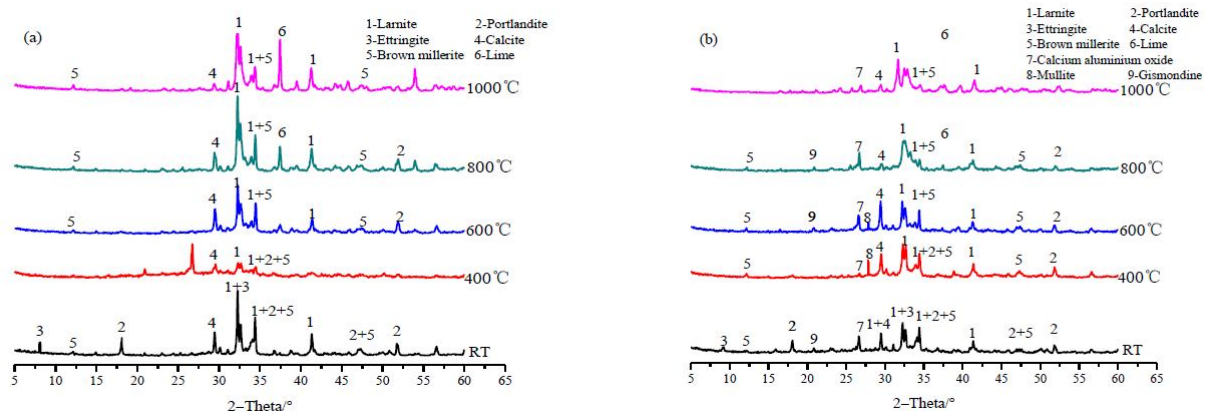


Figure II-2 Modèles XRD de béton soumis à diverses températures [52]

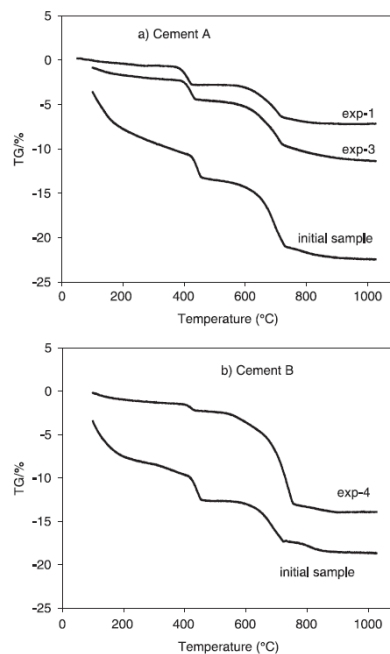


Figure II-3 TGA des échantillons. (a) Ciment A. (b) Ciment B (faible teneur en C3A) [48]

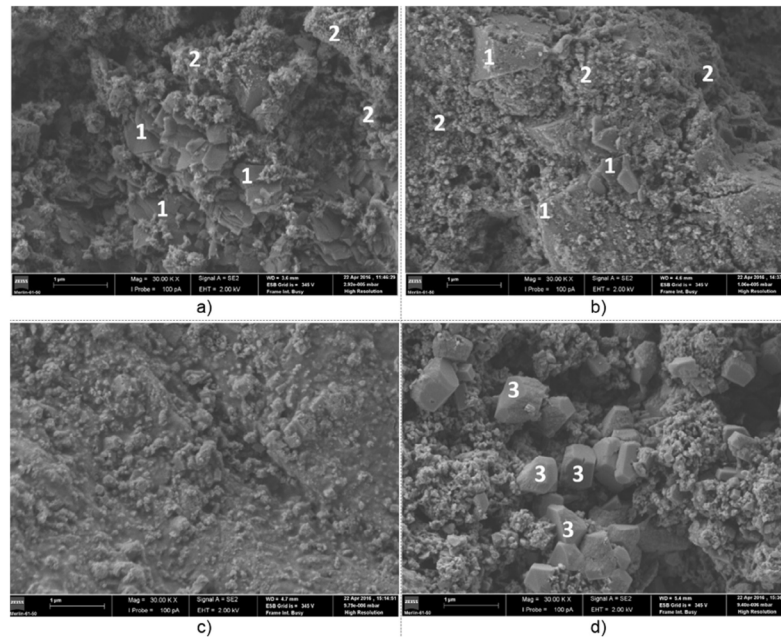


Figure II-4 Images MEB de béton avec identification de portlandite (1), C-S-H (2) et oxyde de calcium (3) à température ambiante (a) et après exposition à des températures élevées : 200°C (b) ; 500°C (c) et 800°C (d) [49]

Dans la phase de refroidissement, Castellote, Alonso [48] ont observé une nouvelle formation de la portlandite moins cristalline que l'originale et sa température de décomposition thermique diminue. Ainsi qu'un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H [54].

II.2.2. Evolution des granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% de son volume. A hautes températures, les granulats se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau. Plusieurs études ont montré qu'un béton constitué d'agrégats calcaires a un comportement mieux qu'un béton d'agrégats siliceux sous l'effet d'un incendie, Figure II-5, [8, 55-57] .

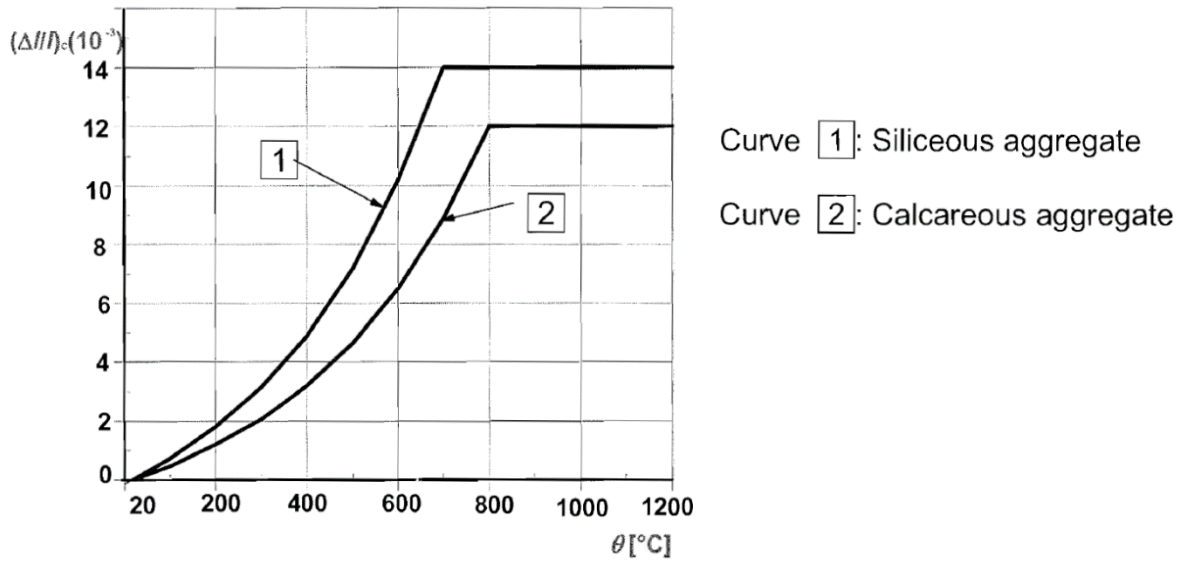


Figure II-5 Allongement thermique total du béton [8].

Xing, Beaucour [57] ont étudié l'influence de la nature des granulats (siliceux, calcaires, silico-calcaires) sur le comportement du béton soumis à des températures élevées et ont notés que pour les granulats siliceux, l'écaillage explosif s'est produit entre 150 °C et 450 °C pour les saturés. Les premières fissures sont observées après le cycle de chauffage / refroidissement à 300 °C. Le taux de fissuration le plus élevé est observé pour le béton silico-calcaires (Figure II-6). Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600 °C. Au-delà de cette température, la décarbonatation de la calcite a lieu : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite Ca(OH)_2 . Il existe des réactions chimiques entre les granulats de calcaires et la pâte qui améliorent la force d'adhérence. La perméabilité des agrégats joue un rôle important dans la stabilité thermique. La cristallisation et la microstructure du quartz semblent jouer un rôle important dans la stabilité thermique des agrégats siliceux. Le meilleur comportement à la compression et à la traction du HPC-S par rapport au NC-S peut s'expliquer par une force de liaison plus élevée à l'interface pâte – agrégat.

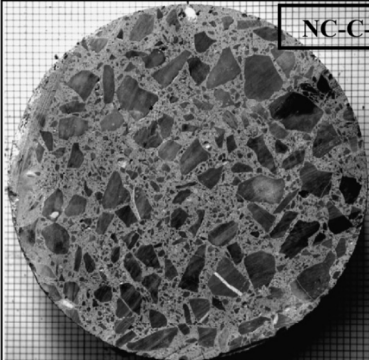
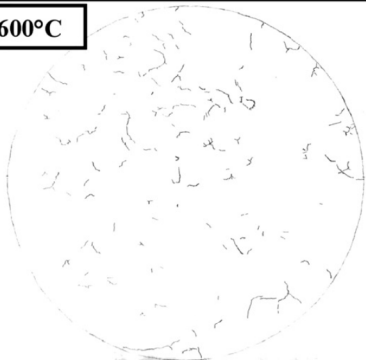
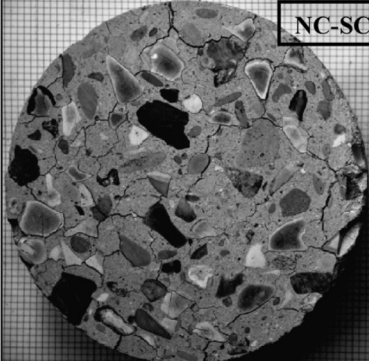
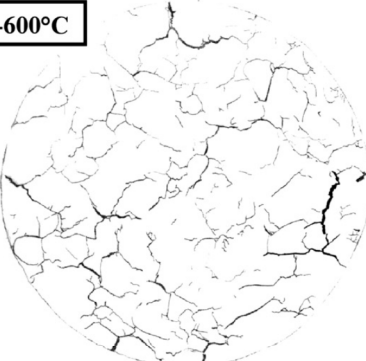
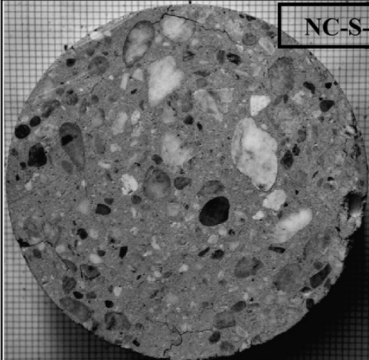
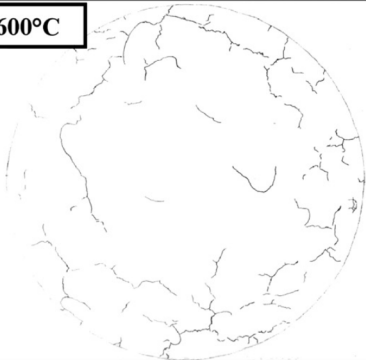
Photographie after heating	Cracking map	Percentage of cracks area
 NC-C-600°C		0,99%
 NC-SC-600°C		5,44%
 NC-S-600°C		1,56%

Figure II-6 Comparaison de la fracturation de NC-S (béton normal de granulats siliceux), NC-C (béton normal de granulats calcaires) et NC-SC (béton normal de granulats silico-calcaires) après un cycle de chauffage / refroidissement à 600 °C [57, 58]

La Figure II-7 montre la courbe ADT des différents granulats : calcaire, sable siliceux, basalte, sable silico-calcaire [47].

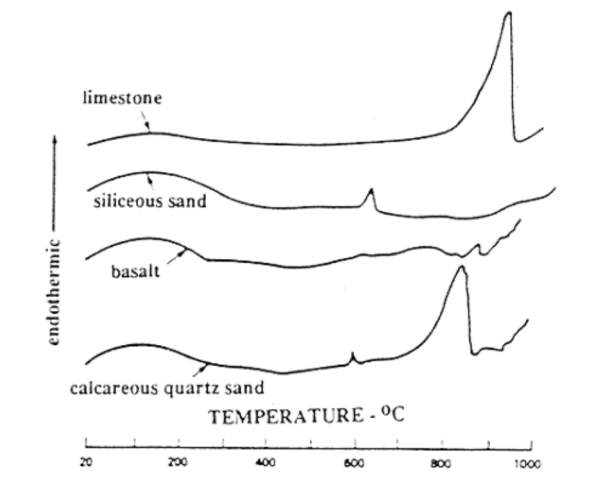


Figure II-7 Courbes ATD des différents granulats. De haut en bas : calcaire, sable siliceux, basalte, sable silico-calcaire [47]

Les variations de leurs propriétés durant l'échauffement ont une grande influence sur les propriétés du composite. Selon Khoury [47], les propriétés d'un « bon » granulat du point de vue leur utilisation à haute température sont :

- un faible coefficient de déformation thermique,
- l'absence de déformations résiduelles après refroidissement,
- une stabilité thermique, c'est à dire, un faible nombre de pics sur les courbes d'analyse thermique différentielle et d'analyse thermo gravimétrique ; soit peu ou pas de changements des phases,
- une structure mono minérale de la roche composante du granulat.

II.2.3. Déformation thermohydrrique libre du béton

La déformation thermique libre du béton dépend de sa composition, de la nature des granulats et de différentes transformations physico-chimiques, qui ont lieu durant le chauffage. La **Figure II-8** présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température. Lors du chauffage, la pâte de ciment subit deux phases : la phase d'expansion et ensuite la phase de retrait. Les travaux de Hager [59] montrent une dilatation de la pâte de ciment entre 20°C et 150°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte

de ciment est attribuée aux mouvements cinétiques moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lors de la sollicitation thermique Menou [60]. Au-delà de cette plage de température, la pâte de ciment présente un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. Les granulats ont un comportement différent. La nature minéralogique influence significativement l'expansion thermique des granulats. La comparaison des déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats, menée par Piasta [61], montre que le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de celui des granulats. La déformation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéaire dépendante de la température. Après 150°C, la pâte de ciment se rétracte. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. Les travaux de Kodur [62] sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700°C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton. Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700°C à 1000°C.

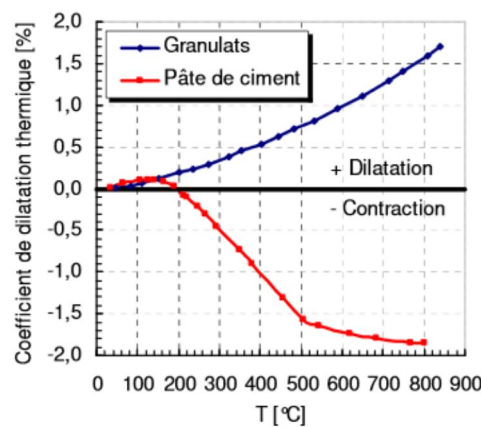


Figure II-8 Variation du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température [63]

II.3. Evolution des propriétés physiques

II.3.1. Perte de masse

Lors du chauffage, le béton perd sa masse du fait de l'évaporation de l'eau libre et du séchage progressif du gel CSH dans la pâte de ciment. Khoury, Grainger [64] ont étudié la vitesse de perte de masse du béton en fonction de la température jusqu'à 600 °C (Figure II-9).

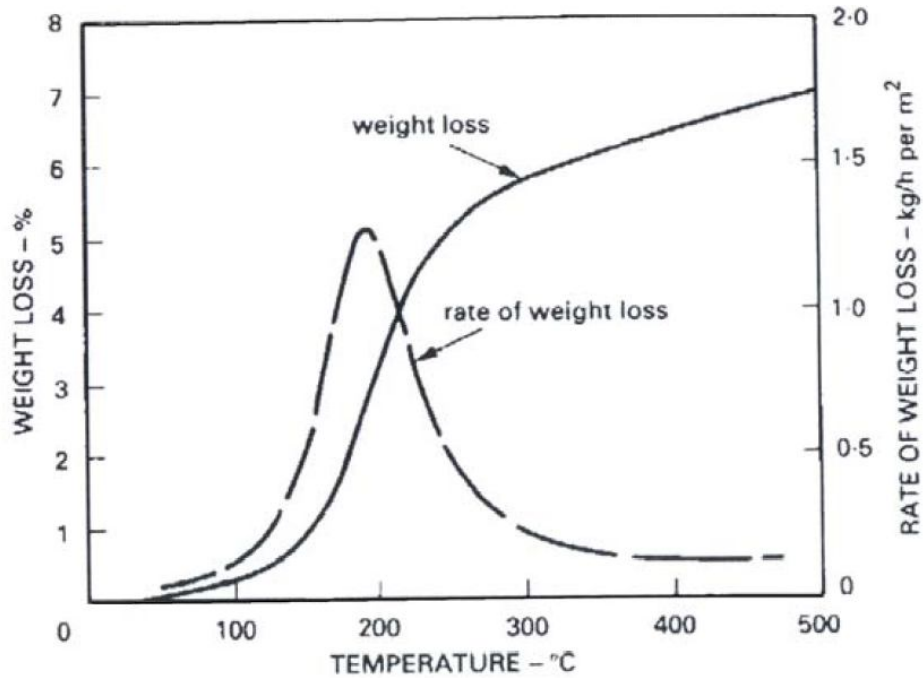


Figure II-9 Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [64]

La Figure II-10 montre les résultats de Yermak [65] concernant la perte de masse du béton normal et du béton fibré (cocktail de fibres de polypropylène et métalliques) sous l'effet de haute température, où on remarque que cette perte suit quatre étapes. Dans la première étape, entre 20 et 300°C, elle est de 5,2 % et 5,9 % pour les bétons CPPS 0,75-60 et Créf(C) respectivement. Cette perte de masse est essentiellement due au départ de l'eau libre contenue dans les pores. La deuxième étape, entre 300 et 600°C, la perte de masse est relativement faible, l'auteur explique ce phénomène par le départ de la deshydroxylation de la portlandite. La troisième étape, entre 600 et 750°C, révèle une diminution de la vitesse de perte de masse, et dans la quatrième étape, entre 750 et 900°C, le béton subit la plus forte perte de masse.

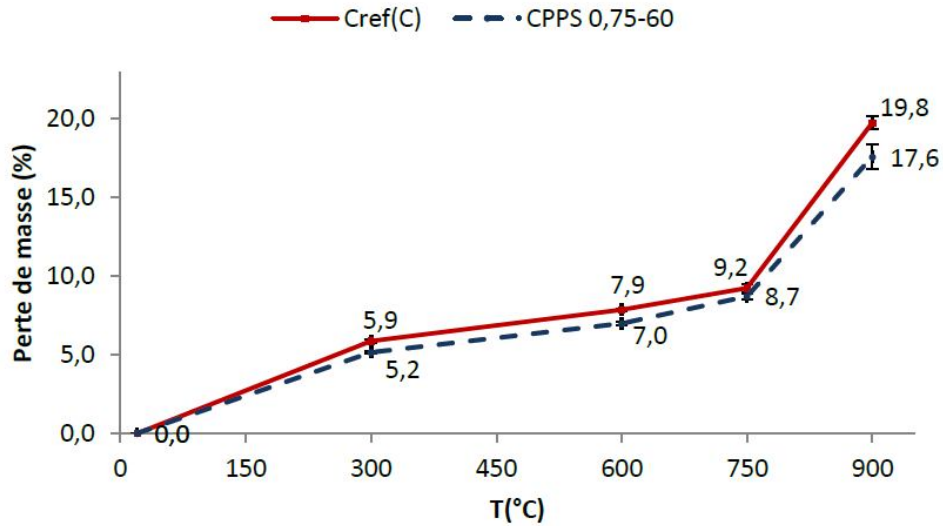


Figure II-10 Evolution de la perte de masse moyenne des bétons Créf(C) et CPPS 0,75-60 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [65]

II.3.2. Porosité

L'un des plus importants paramètres caractérisant la microstructure des bétons est la porosité, qui peut se définir comme les espaces vides d'un matériau se présentent entre les phases solides.

La mesure de la porosité de l'eau ou des bétons chauffés au mercure a fait l'objet de plusieurs études. Les résultats ont montré une augmentation progressive de la porosité avec la température. Cette évolution a été attribuée à l'évaporation de l'eau libre et de l'eau liée chimique ainsi qu'à la décomposition des hydrates de C-S - H et CH et à la décomposition de la pâte et de l'interface agrégat / pâte.

La porosité du béton ordinaire est supérieure à celle du béton haute performance à température ambiante. Lors du chauffage, Pliya [66] a observé une augmentation progressive du même ordre de grandeur de 16% jusqu'à la température de 300°C pour tous les bétons testés. Au-delà de 300°C, la porosité relative du BO augmente de 34% tandis que celle du BHP est de 20% (Figure II-11).

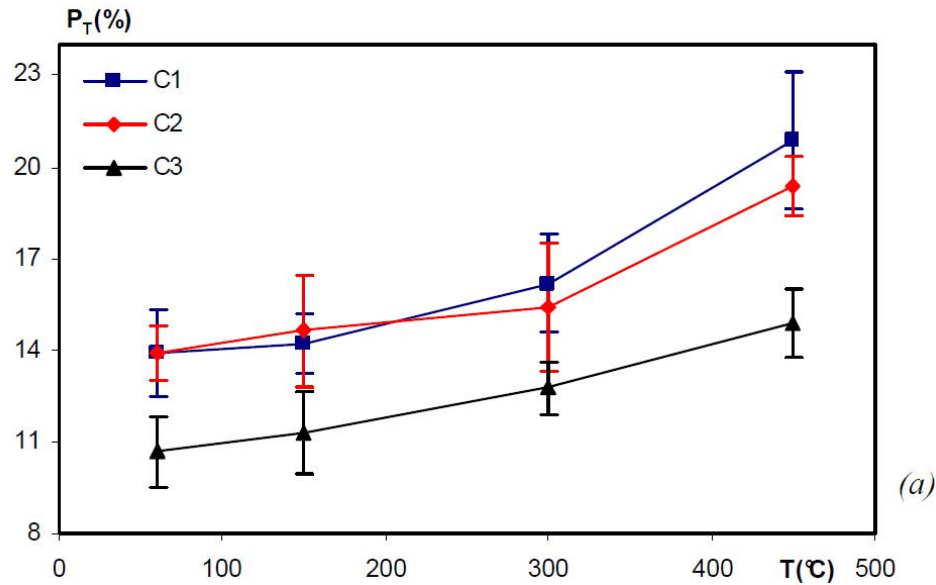


Figure II-11 Evolution de la porosité des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement [66]

Le type d'agrégat a également un impact significatif sur la porosité du béton à température ambiante ou lors de l'échauffement [57, 67]. L'utilisation des granulats de silice a une grande influence sur la porosité entre 20°C et 600°C où Mindeguia [67] a observé que les bétons avec des agrégats siliceux permettent une plus grande augmentation de la porosité (Figure II-12).

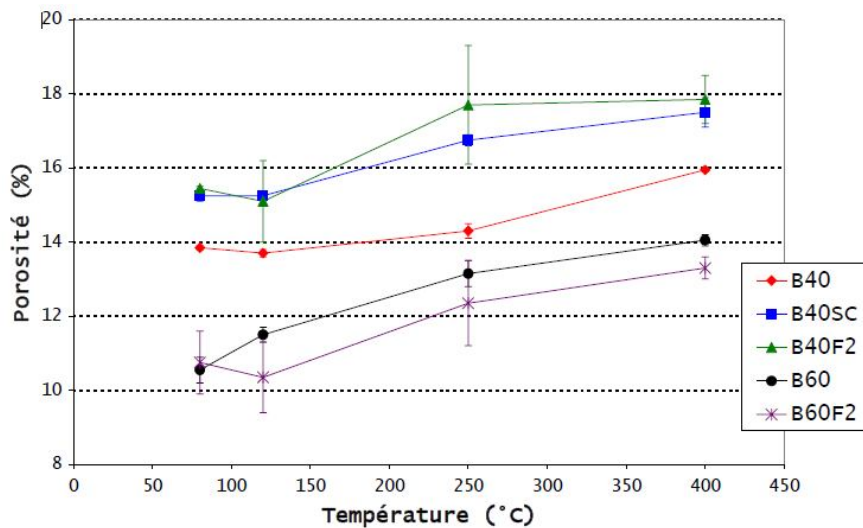


Figure II-12 Évolution de la porosité à l'eau des bétons en fonction de la température [67]

Pliya [66], Haniche [68] et Yermak [65] ont étudié l'effet des fibres sur la porosité du béton exposé à des températures élevées où ils ont conclu que l'ajout de fibres métallique ou de polypropylène réduit la porosité du béton à température ambiante et accélère son taux d'augmentation lors du chauffage. Yermak [65] a remarqué un accroissement de la porosité

relative de 7 % en moyenne des bétons contenant des fibres de polypropylène CPPS (0,75-60) ou métallique (CS 60) entre le chauffage à 80°C et le chauffage à 200°C. Après 200°C, la porosité des bétons fibrés (polypropylène, métallique) s'accroît notablement plus rapide que celle des bétons sans fibres (Créf(C)), (Figure II-13).

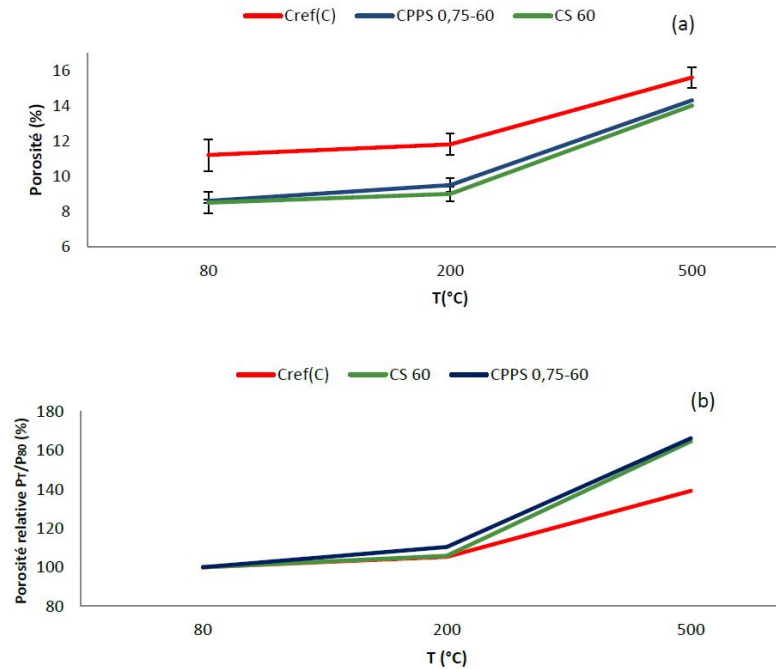


Figure II-13 Evolution de la porosité absolue (a) et relative (b) des bétons Créf(C), CS 60 et CPPS 0,75-60 [65]

Zhou, Lu [69] ont constaté que l'utilisation combinée des ajouts cimentaires SCM (10% cendres volante - 20% cendres volantes ultrafines - 5% métakaolin) dans le béton a une influence significative sur la porosité de béton, de sorte que le taux d'augmentation de la porosité est de 28% à 1000°C, ce qui est faible par rapport au béton ordinaire (Figure II-14).

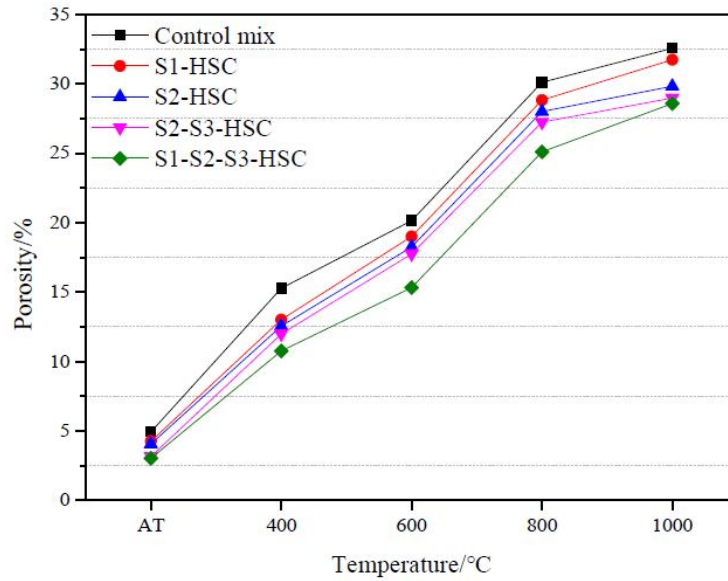


Figure II-14 Porosité du béton soumis à des températures élevées [69]

II.3.3. Perméabilité

La perméabilité du béton représente la capacité du matériau poreux à être traversé par un fluide sous un gradient de pression. Elle dépend principalement de la porosité de béton, en particulier de la pâte de ciment, qui à son tour dépend du rapport (eau / ciment) et du vieillissement du béton [70]. La perméabilité du béton étant liée à sa porosité, elle augmente également avec l'augmentation de la température. La Figure II-15 montre l'évolution de la perméabilité de bétons BO et BHP en fonction de la température [71]. Ces auteurs ont noté une augmentation de la perméabilité en fonction de la température et un accroissement rapide de la perméabilité de BHP est observé après chauffage à 150 °C.

Kalifa, Chene [72], Haniche [68] et Yermak [65] ont constaté que l'ajout de fibres de polypropylène augmente la perméabilité du béton à haute température (Figure II-16).

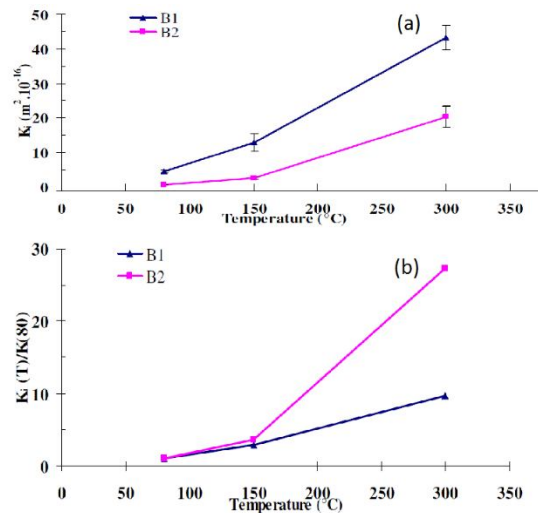


Figure II-15 Évolution de la perméabilité (a) intrinsèque et (b) intrinsèque relatives des bétons en fonction de la température [71]

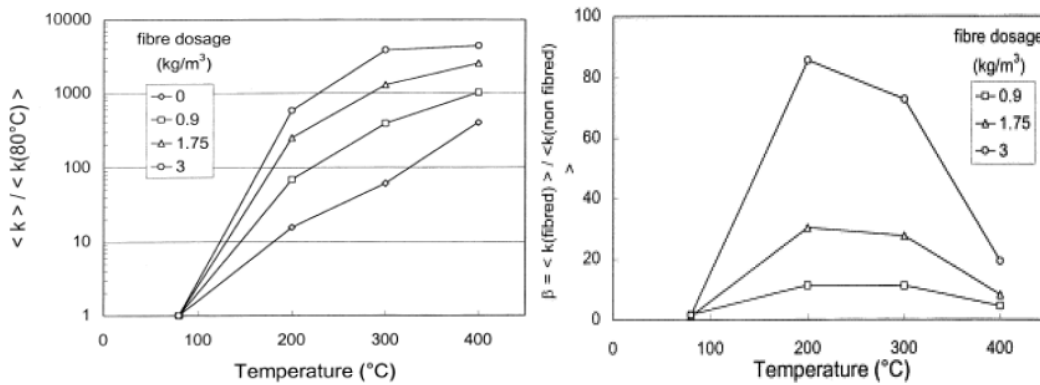


Figure II-16 . Influence du dosage des fibres sur la perméabilité des bétons [72]

II.4. Evolutions les propriétés thermiques

II.4.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique du béton fait référence à sa capacité à conduire la chaleur. Elle est mesurée en termes de quantité de chaleur qui se propage à travers un matériau d'une certaine épaisseur (en mètres), par unité de surface et par unité de différence de température entre les deux côtés du matériau. La conductivité thermique spécifique, également appelée conductivité thermique volumique, est la conductivité thermique divisée par la masse volumique du matériau. Bien que la conductivité thermique du béton dépend de celles de tous ses constituants, elle est largement déterminée par le type d'agrégat utilisé car les agrégats constituent normalement 60 à 80% en volume de béton [57]. L'autre paramètre, d'une influence importante, est la teneur en humidité car la conductivité thermique de l'eau, bien que faible, est beaucoup plus élevée que celle de l'air. La Figure II-17 montre la conductivité thermique de divers types

de béton, tels que le béton ordinaire (BO), le béton haute performance (BHP), le béton auto-plaçant (BAP) et le béton à poudres réactives (BPR), et présente des variations significatives à la fois à température ambiante et à haute température [73-76]. Une tendance observée est que la conductivité thermique du béton tend à décroître à mesure que la température augmente. Cette diminution peut être attribuée à divers facteurs, notamment la perte d'humidité et la déshydratation du gel C-S-H (silicate de calcium hydraté), entraînant la formation de vides ou d'espaces vides à l'intérieur du matériau [57, 77]. On peut également remarquer qu'à température ambiante, le béton ordinaire (BO) présente une conductivité thermique relativement basse en raison de la présence d'espaces vides, tandis que les bétons à haute résistance (BHR tels que le BHP, le BAP et le BPR) peuvent afficher une conductivité thermique plus élevée en raison de leur densité accrue. À des températures élevées, la perte d'humidité et la déshydratation du gel C-S-H peuvent influencer la conductivité thermique des deux types de béton. Cependant, les réactions complexes à haute température peuvent également contribuer à des différences dans leur comportement thermique global [74].

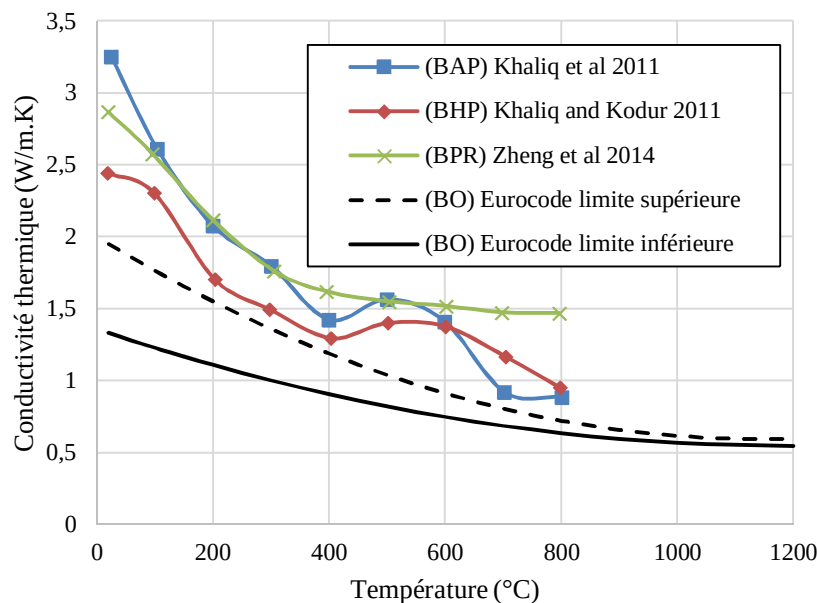
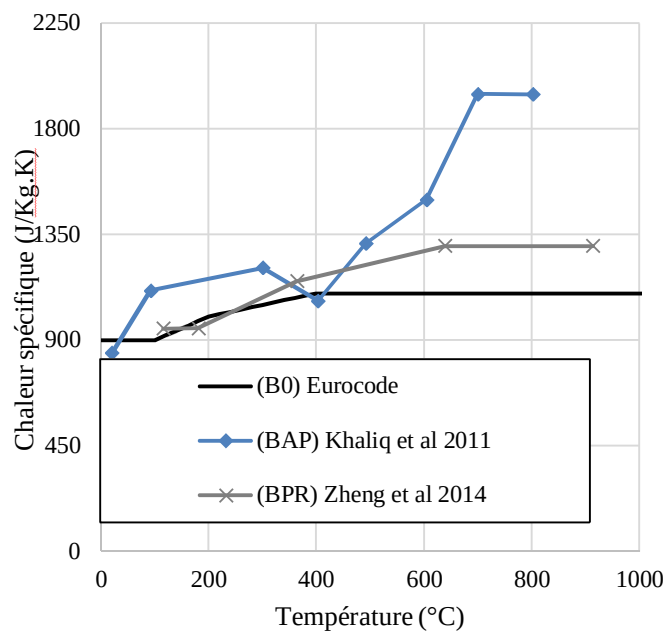


Figure II-17 Evolution de la conductivité thermique des bétons BO, BHP, BAP et BPR en fonction de la température

II.4.1.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique est établie en fonction de la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter d'un degré Kelvin la température d'une unité de masse d'une substance, par l'intermédiaire d'échanges thermiques. Cette énergie est absorbée ou libérée par des réactions endothermiques ou exothermiques lors de transformations physiques ou chimiques au sein du matériau [78]. La

chaleur spécifique du béton dépend de ses composants constitutifs et est influencée par divers facteurs. Les agrégats, qui forment une part significative en volume du béton, jouent un rôle crucial dans la détermination de sa chaleur spécifique. La teneur en humidité du béton est également un facteur clé influençant cette propriété [57]. L'eau possède une chaleur spécifique plus élevée que l'air, ce qui signifie que la présence d'humidité dans le béton peut accroître sa capacité à absorber et à relâcher la chaleur [57]. La Figure II-18 illustre la chaleur spécifique de différents types de béton, tels que le béton ordinaire (B0), le béton haute performance (BHP), le béton auto-plaçant et le béton à poudres réactives (BPR) à des températures élevées. On peut observer que la chaleur spécifique des bétons a tendance à augmenter légèrement avec l'élévation de la température. Toutefois, cette augmentation n'est pas linéaire et peut être influencée par divers facteurs, y compris la composition du béton, la présence d'humidité, les réactions chimiques et les transitions de phase qui surviennent à des températures élevées [57].



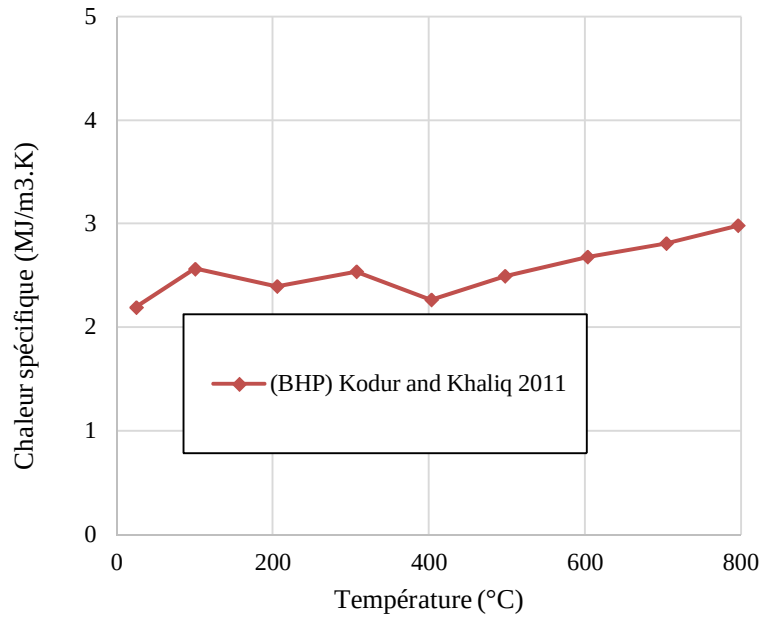


Figure II-18 Evolution de la chaleur spécifique des bétons en fonction de la température

II.4.1.3. Densité

La densité du béton revêt une importance cruciale, influençant divers aspects de son comportement thermique et structural. Elle résulte de la masse de ses composants par unité de volume. Cette densité est principalement déterminée par la composition du béton ainsi que par le type d'agréats utilisés dans sa fabrication. Les bétons ordinaires affichent généralement une densité typique d'environ 2 400 à 2 500 kg/m³. Toutefois, les bétons à haute performance ou spéciaux, qui intègrent par exemple des additifs tels que des poudres réactives, des fibres ou des charges spécifiques, peuvent présenter des densités légèrement différentes en raison de leurs compositions modifiées. La Figure II-19 présente la variation de la densité du béton ordinaire en fonction de la température, conformément à l'Eurocode 4 Partie 1-2 [73]. On peut observer que la densité du béton diminue avec l'élévation de la température, en raison de divers facteurs tels que la dégradation thermique de certains composants, l'expansion thermique et la perte d'humidité [79].

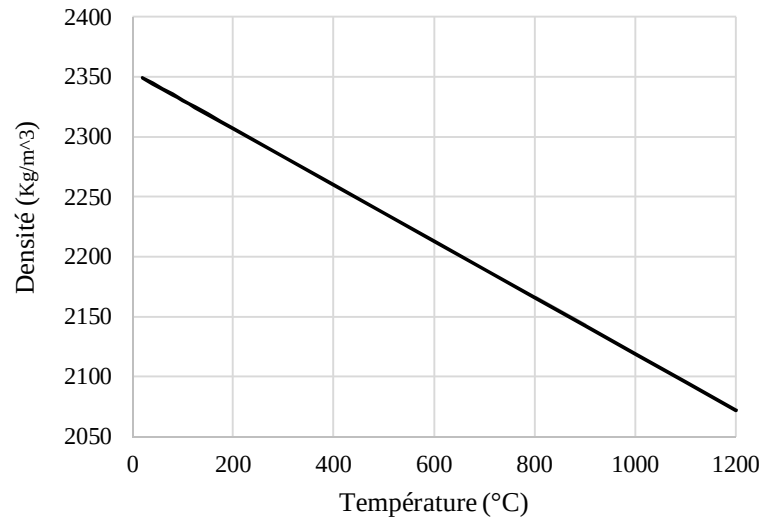


Figure II-19 Évolution de la densité de béton ordinaire (BO) en fonction de la température [73]

II.5. Evolutions des propriétés mécaniques

II.5.1. Résistance à la compression

Lorsque le béton est soumis à des températures élevées ou à l'impact direct d'un incendie, il subit des transformations physiques et chimiques qui entraînent une significative diminution de sa résistance à la compression [80]. L'impact des températures élevées sur le béton ordinaire et le béton à haute résistance a été pris en compte par l'Eurocode 2 Partie 1_2 [8], comme illustré dans la Figure II-20. En ce qui concerne l'effet des températures élevées sur la résistance à la compression du béton à haute performance, plusieurs études ont été compilées et présentées dans la Figure II-20, chacune portant sur un type spécifique [76]. Aslani and Nejadi [81] ont étudié le béton à poudre réactive, tandis que Khaliq and Kodur [75] ont examiné le béton autoplaçant. Selon leurs conclusions tirées de la figure, il est évident que les bétons innovants à haute performance sont plus sensibles aux températures élevées que le béton ordinaire. Kodur [62] Attribuent cela à la densité plus élevée des bétons innovants à haute résistance par rapport au béton ordinaire, ce qui rend difficile le déplacement de la vapeur et conduit à une explosion potentielle.

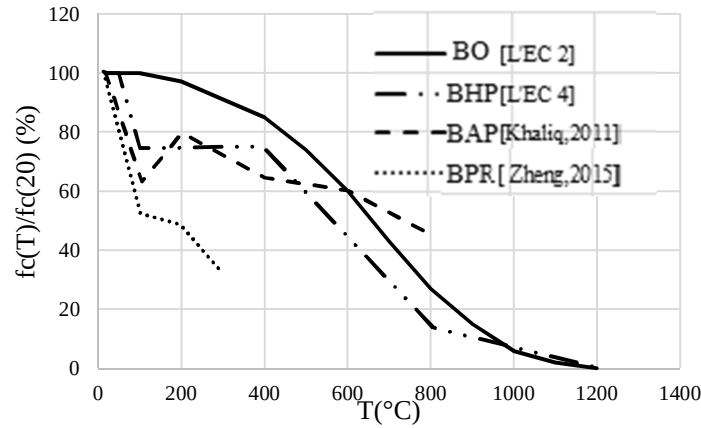
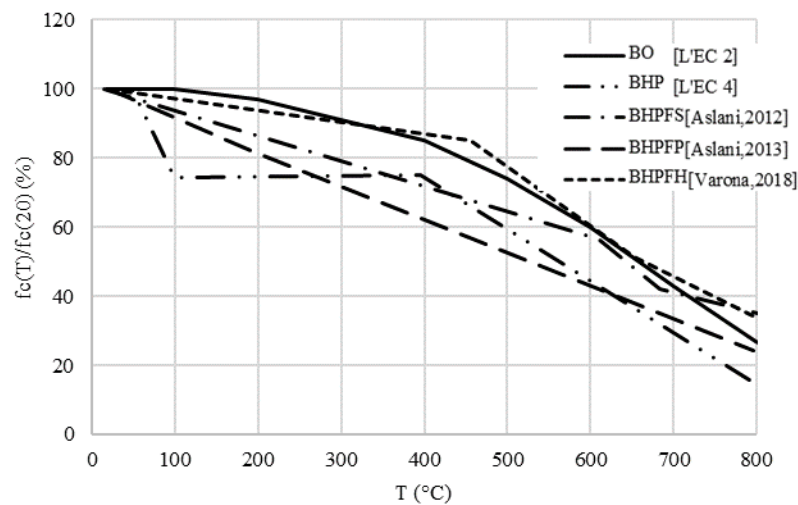
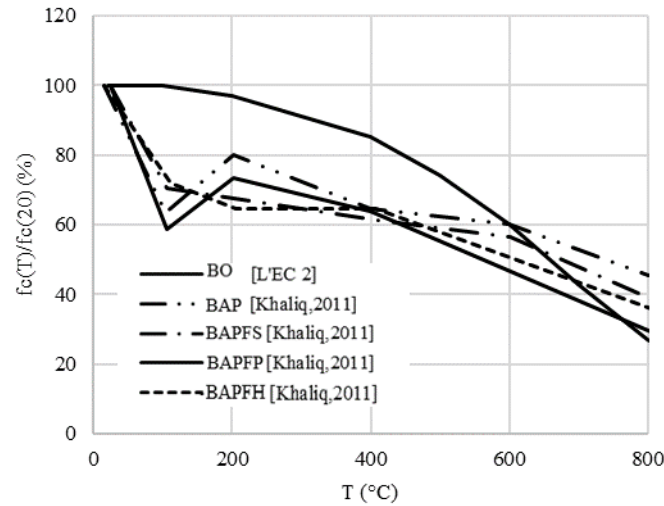


Figure II-20 Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température pour différents types de bétons

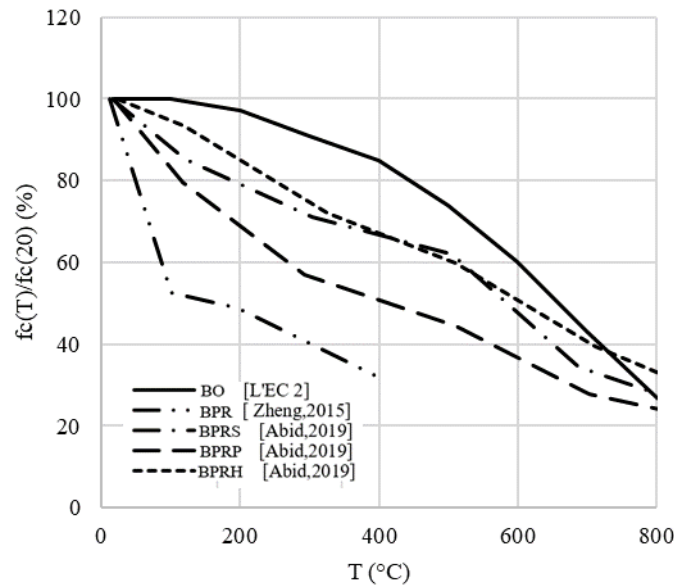
Kodur and Sultan [82] ont attribué cette sensibilité accrue au fait que la densité plus élevée des bétons innovants à haute résistance par rapport au béton ordinaire peut entraîner des difficultés dans le mouvement de la vapeur, entraînant d'une manière potentielle un effritement explosif. Les résultats des études de Khaliq and Kodur [75], Zheng, Luo [83] et Abid, Hou [84] établies sur l'influence de l'ajout de fibres d'acier, de polypropylène et de leur combinaison ont été recueillis dans la Figure II-21. On peut remarquer que l'utilisation combinée de fibres d'acier et de polypropylène retarde progressivement la diminution de la résistance à la compression à des températures élevées.



(a)



(b)



(c)

Figure II-21 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la compression en fonction de la température pour différents types de béton : (a) Béton à haute résistance, (b) Béton autoplaçant, (c) Béton en poudre réactive

II.5.2. Résistance à la traction

Le béton est généralement considéré comme un matériau ayant une faible résistance à la traction. Par conséquent, son exposition à des températures élevées entraîne une diminution significative de cette résistance, comme le montre la Figure II-22, illustrant l'évolution de la résistance à la traction de différents types de béton en fonction de l'augmentation de la température.

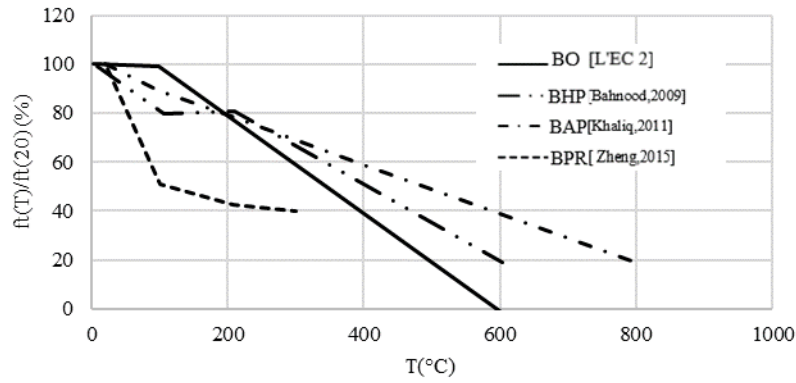
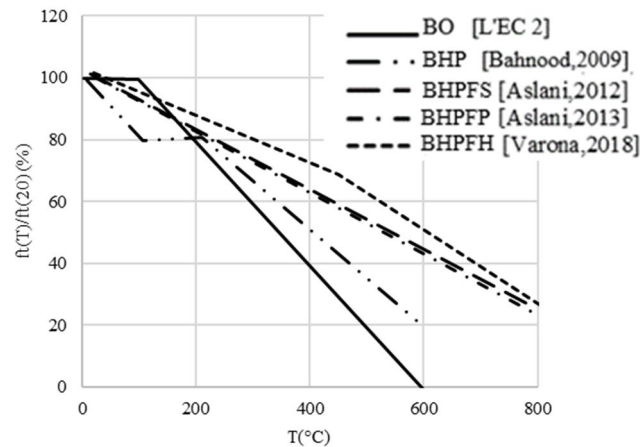
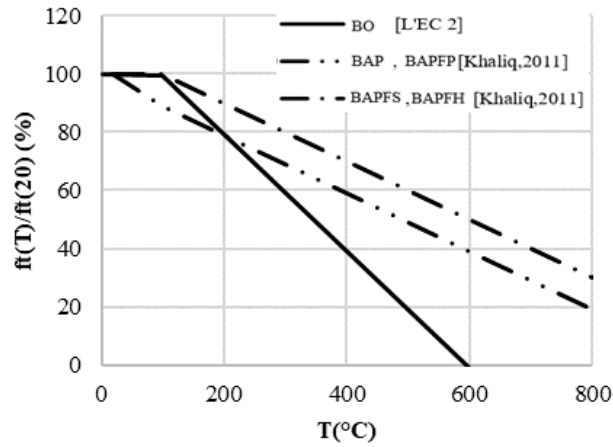


Figure II-22 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la traction en fonction de la température pour différents types de bétons (BHP, BAP, BPR)

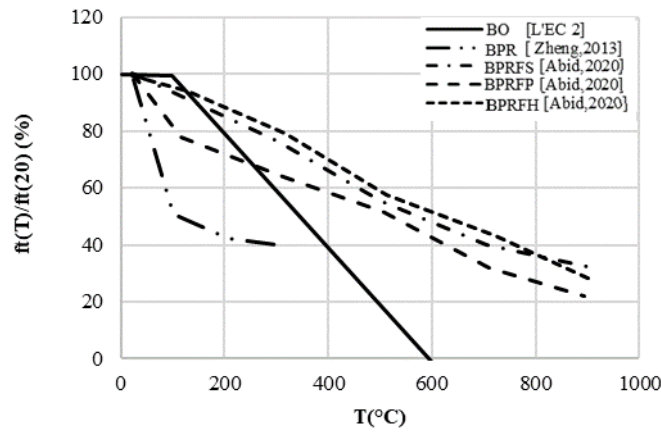
On peut observer que la diminution de la résistance à la traction est plus sévère dans le béton réactif à la poudre. Ainsi, on constate que le béton ordinaire (BO) présente une diminution plus rapide que le béton auto-plaçant (BAP) et le béton à haute performance (BHP). Parmi les méthodes les plus connues pour améliorer la faible résistance à la traction du béton, on trouve l'ajout de fibres rigides. Certaines recherches ont étudié l'effet des températures élevées sur la résistance à la traction du béton, et leurs résultats ont été rassemblés et résumés dans la Figure II-23. Selon cette figure on peut noter que les fibres d'acier ont une forte influence sur l'évolution de la résistance à la traction à haute température.



(a)



(b)

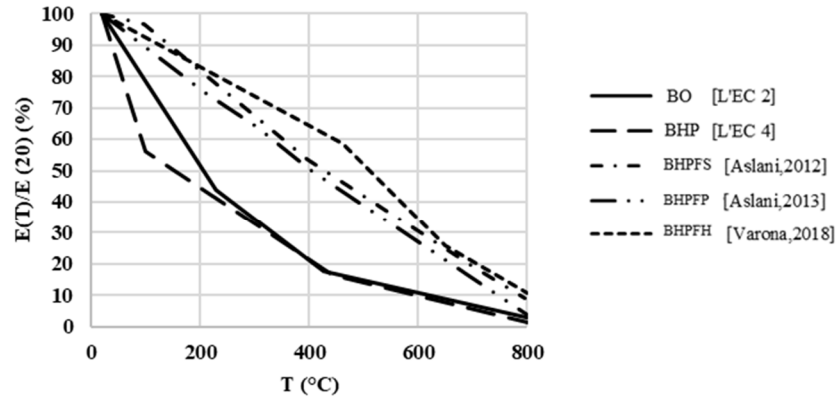


(c)

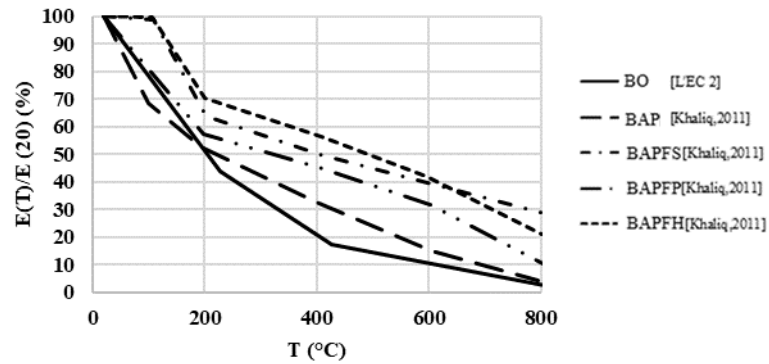
Figure II-23 Évolution du coefficient de réduction de la résistance à la traction pour différents types de béton avec fibres en fonction de la température : (a) Béton à haute résistance, (b) Béton autoplaçant, (c) Béton en poudre réactive

II.5.3. Module d'élasticité

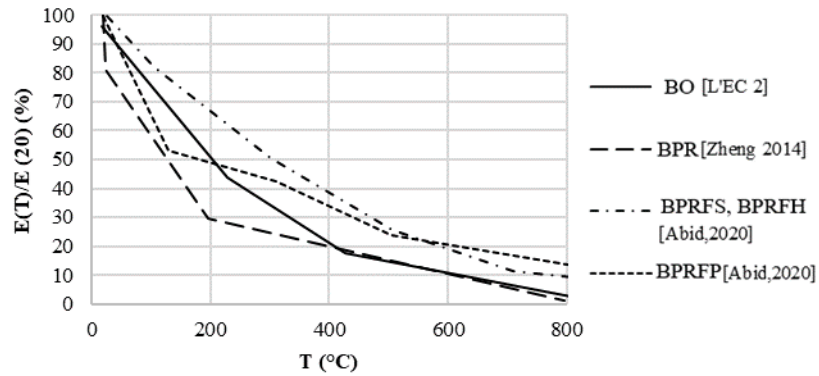
En général, le module d'élasticité diminue de 0,25 à 0,65 % lorsque la température augmente d'un degré Celsius [85-87]. Plusieurs recherches ont étudié l'impact des températures élevées sur le module d'élasticité du béton, certaines d'entre elles sont représentées dans la Figure II-24 [8, 73, 75, 76, 84, 88].



(a)



(b)



(c)

Figure II-24 Evolution du module d'élasticité en fonction de la température pour différents types de bétons : (a) béton a haute résistance, (b) béton auto-plaçant et béton de poudres réactives

L'incorporation de fibres a un impact direct sur le module d'élasticité du béton, ce qui explique l'ampleur des recherches menées dans ce domaine. On présente dans cette thèse les études les plus significatives à cet égard dans la Figure II-25 où il est observé que l'ajout de fibres de

polypropylène et de fibres d'acier permet d'améliorer le module d'élasticité, en particulier en fonction de la température. Notamment, les fibres d'acier et les fibres hybrides (combinant polypropylène et acier) montrent des résultats prometteurs dans l'amélioration du module d'élasticité.

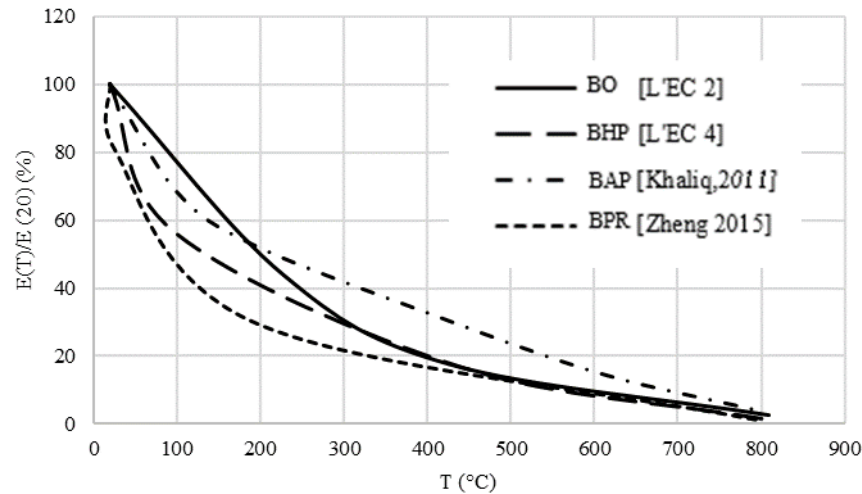


Figure II-25 Evolution du module d'élasticité de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de fibres hybrides

II.6. Instabilité thermique du béton

Bien que le béton soit reconnu pour sa durabilité, sa résistance mécanique et son excellent comportement en conditions normales, plusieurs recherches ont révélé qu'il présente un comportement instable sous l'effet de températures élevées, notamment lors d'incendies dans les tunnels ou les bâtiments. Cette instabilité thermique se manifeste principalement par des phénomènes d'écaillage (spalling), qui peuvent compromettre la résistance résiduelle et l'intégrité structurelle. On distingue généralement deux formes principales : [72]

- Écaillage progressif (progressive spalling) : détachement répété de petites particules de surface sous l'effet prolongé de la chaleur.
- Éclatement explosif (explosive spalling) : détachement soudain et violent de fragments importants, parfois jusqu'à 1 m², pouvant entraîner une perte de la capacité portante.

D'autres types de dégradation peuvent également survenir [89] :

- Éclatement de granulats : dilatation thermique localisée des granulats en surface.
- Éclatement discoïdal : causé principalement par la migration rapide de la vapeur d'eau.
- Écaillage d'angle : souvent observé aux arêtes, dû au stress thermique combiné à la migration de l'humidité.

Mécanismes d'instabilité

Deux principales théories permettent d'expliquer ce phénomène complexe : Hypothèse thermo-hydrigue : Lorsque le béton est chauffé, l'eau contenue dans ses pores se vaporise, augmentant la pression de vapeur interne. Si la perméabilité du béton est faible, cette pression s'accumule, créant un « bouchon hydraulique » qui peut provoquer un éclatement. Ce mécanisme est favorisé par un chauffage rapide, tandis qu'un préséchage (chauffage lent) permet de réduire significativement les pressions internes [18, 72]. Hypothèse thermo-mécanique : Elle attribue l'écaillage aux contraintes thermiques générées par la dilatation empêchée à la surface chauffée du béton. Ces contraintes peuvent dépasser la résistance en traction du matériau, provoquant des ruptures fragiles et des délaminations [90]. Par ailleurs, les incompatibilités thermiques entre la pâte de ciment (qui a tendance à se rétracter) et les granulats (qui se dilatent) contribuent à l'initiation de fissures internes [91].

L'écaillage est donc un phénomène multifactoriel, résultant d'interactions complexes entre transferts thermiques, hydriques et contraintes mécaniques.

II.7. Comportement de l'élément poutre en béton armé sous l'effet d'incendie

Les poutres constituent un élément essentiel des structures en béton armé, d'où la multitude d'études consacrées à leur comportement en cas d'incendie. Dwaikat and Kodur [92] ont mené une étude expérimentale sur la résistance au feu de six poutres en béton armé. Les variables testées comprenaient la résistance du béton, sa perméabilité, les conditions aux limites, le scénario d'incendie et le taux de chargement et leur résultat sont montrés dans la Figure II-26. Ils ont montré que les poutres en béton à haute performance présentent des niveaux plus élevés d'éclatement, largement influencés par la perméabilité du béton, le type d'exposition au feu, le niveau de charge et les conditions de retenue. De même, le type de scénario d'incendie et le taux de chargement ont une influence significative sur la résistance au feu globale des poutres en béton armé. Ces facteurs doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la résistance au feu des poutres en béton armé dans des conditions d'incendie.

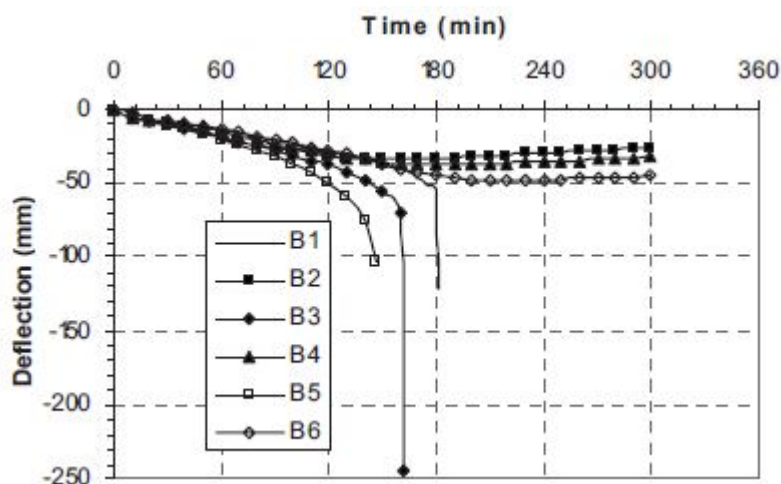


Figure II-26 Evolution de la flèche des poutres BA testées par Dwaikat and Kodur [92] en fonction du temps d'exposition au feu

L'étude de Ryu, Shin [28] sur la résistance au feu des poutres en béton armé (BA) a permis d'examiner l'impact des taux de chargement et des dimensions des sections transversales. Des tests ont été menés sur douze poutres en BA exposées à des températures élevées pendant 120 minutes, suivant la courbe de feu ISO 834. Les résultats ont montré que la flèche des poutres augmente avec le niveau de charge, tandis que la déflexion maximale diminue de manière non linéaire avec l'augmentation de la section transversale. Les essais de résistance résiduelle ont révélé des différences non significatives entre les charges maximales des échantillons, car les températures des barres d'armature n'ont pas atteint le seuil de réduction de la résistance de l'acier. La ductilité et la rigidité diminuent avec l'augmentation de la charge ou de la durée d'exposition au feu, mais s'améliorent avec l'augmentation de la taille de la section transversale. Yermak, Pliya [93] ont montré que l'ajout de fibres de polypropylène et/ou d'acier réduit les dommages causés par le feu aux éléments structuraux en BA. Hou, Ren [94] ont testé la résistance au feu de quatre poutres en béton à poudre réactive renforcé de fibres hybrides et protégées par une isolation contre le feu où ils ont conclu que l'utilisation simultanée de fibres hybrides (2% de fibres d'acier et 0,2% de fibres de PP) et d'une isolation contre le feu est une méthode efficace pour prévenir la défaillance due au feu. Ils ont montré également que l'isolation contre le feu peut grandement améliorer la performance de résistance au feu des poutres en béton armé. Kahanji, Ali [95] ont mené des tests de feu ISO 834 sur quatre poutres en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) avec 2% et 4% sous des taux de chargement de 40 et 60 % et leurs résultats sont présentés à la Figure II-27. Les fibres d'acier ont une influence sur la sévérité de l'écaillage, où l'ajout de 4% de fibres contribue plus à la diminution de l'écaillage que l'ajout de 2% de fibres. Les poutres testées sous un taux de chargement de 60 %

ont subi un écaillage moins sévère que celle avec 40 % avec le même dosage de fibres d'acier. L'explication donnée par les auteurs est qu'à des charges plus élevées, plus de fissures sont générées sur la poutre testée, ainsi ces fissures créent des canaux connectés par lesquels les gaz sortent à une pression plus élevée. En conséquence, la pression interstitielle du béton dans la surface de la fissure est réduite, ce qui réduit l'écaillage de la poutre.

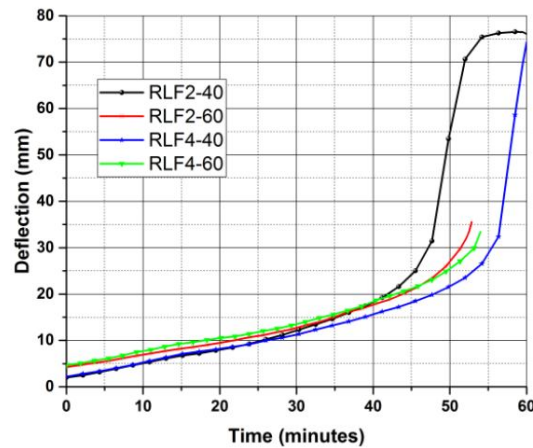
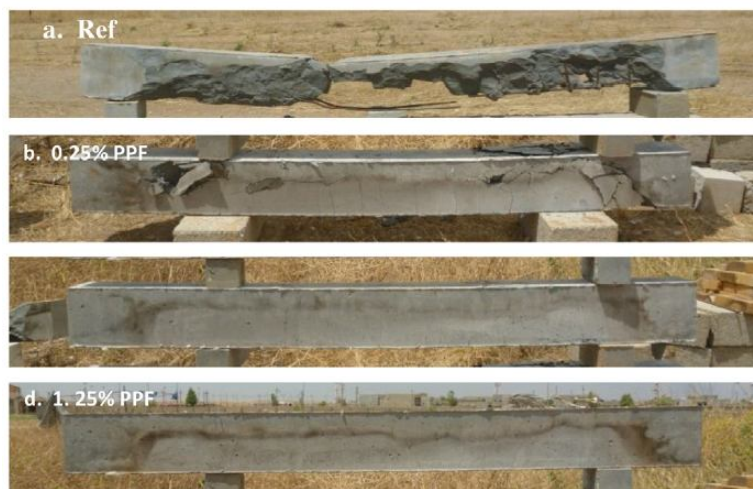


Figure II-27 Evolution de la flèche de la poutre en fonction du temps d'exposition au feu [95] Alyaa A, Mazin B [96] ont réalisé une étude expérimentale sur le comportement des poutres en béton armé sous l'effet d'incendies et l'efficacité de l'ajout de fibres hybrides dans l'amélioration de la résistance au feu. Leurs résultats, présentés dans la Figure II-28, montrent que l'ajout de fibres hybrides à faible fraction volumique (0,25 %) réduit l'écaillage, tandis que celles à fractions volumiques élevées (0,75 % et 1,25 %) l'empêchent complètement.



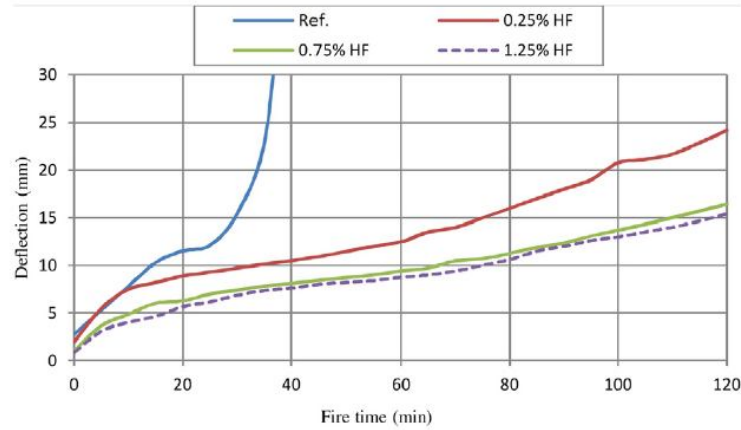


Figure II-28 Comportement des poutres en fibres testées par Alyaa A, Mazin B [96] sous l'effet d'un incendie

Les résultats de l'étude expérimentale menée par Banerji, Kodur [97], Figure II-29, sur le comportement des poutres en béton renforcé de fibres ultra-hautes performances (BFUP) à des températures élevées dues à un incendie concluent que l'ajout de fibres de polypropylène au BFUP réduit significativement l'écaillage et améliore ainsi la résistance au feu.

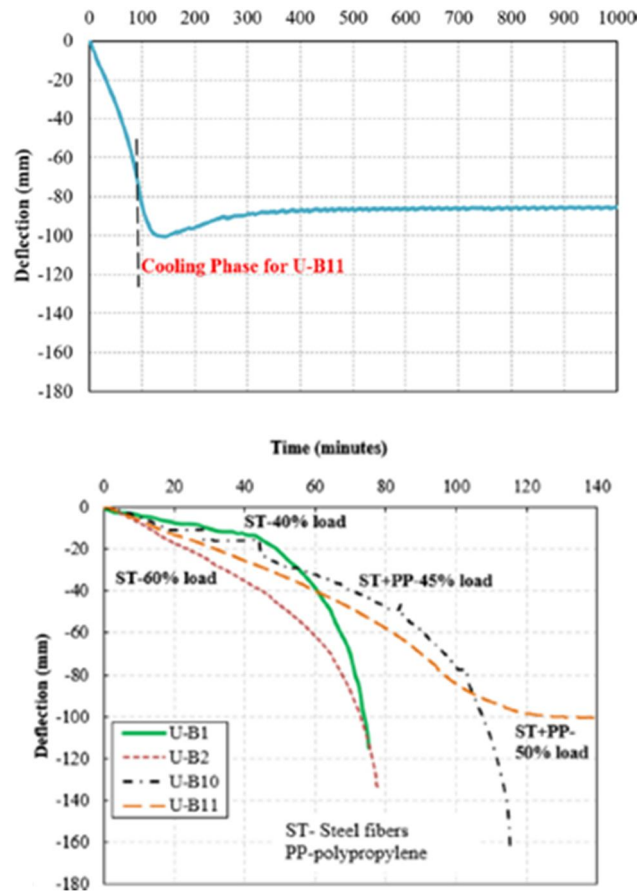


Figure II-29 Courbes charge-déplacement à mi- portée des poutres en fibres testées par Banerji, Kodur [97] sous l'effet d'un incendie

Hou, Ren [98] ont mené une étude expérimentale pour évaluer le comportement de quatre poutres RPC exposées au feu sur trois côtés, et leurs résultats montrent que l'ajout de 2 % de fibres d'acier et de 0,2 % de fibres de polypropylène est une méthode efficace pour prévenir l'écaillage induit dans les poutres RPC, comme le montre la Figure II-30 illustrant les spécimens après les tests au feu.



Figure II-30 Poutres testées par Hou, Ren [98] après exposition au feu

Kumar and Kodur [99] ont mené une série d'études numériques pour examiner l'effet des forces de retenue induites par le feu sur le comportement des poutres en béton précontraint (PC). Les principaux paramètres étudiés sont la forme de la section transversale, les conditions d'appui et le niveau de précontrainte. Leurs travaux ont révélé que des forces de retenue importantes se développent dans les poutres PC et RC sous l'exposition au feu, et que ces forces varient en fonction de la durée d'exposition. De plus, les résultats montrent que les forces de retenue induites par le feu modifient significativement la réponse structurelle des poutres.

II.8. Utilisation de différents types d'isolants coupe-feu

La première apparition significative d'isolants coupe-feu dans les structures en béton armé remonte au début du 20^e siècle, avec le développement des techniques de protection incendie dans le domaine de la construction, marquant ainsi le début d'une ère de progrès dans la sécurité des bâtiments face aux incendies [100]. Actuellement, l'isolant coupe-feu est largement utilisé en raison des nombreux avantages. Ceux-ci incluent une faible conductivité thermique, un poids léger, une rentabilité et une facilité d'application [101].

Kodur and Shakya [101] ont étudié l'effet de la température sur les propriétés thermiques de différents types d'isolants coupe-feu. Des tests de propriétés à haute température ont été réalisés sur trois types d'isolants coupe-feu disponibles dans le commerce pour mesurer la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la perte de masse et la déformation thermique dans la plage de 20 à 1000 °C. Les données de ces tests montrent que la température a une influence significative sur la conductivité thermique, l'expansion thermique et la perte de masse des

isolants coupe-feu. Les données mesurées sont utilisées pour développer des relations empiriques des propriétés thermiques pour les isolants coupe-feu en fonction de la température. Les relations proposées peuvent être utilisées comme données d'entrée dans l'analyse thermomécanique pour évaluer la résistance au feu des structures.

L'étude de Kodur and Arablouei [102] porte sur les propriétés efficaces des isolants coupe-feu pour atténuer le délaminage de l'isolation contre le feu des structures. Leurs résultats montrent que le module d'élasticité de l'isolation contre le feu et l'épaisseur de l'isolation sont des facteurs cruciaux pour le délaminage de l'isolant coupe-feu.

Ren, Hou [103] ont étudié numériquement par éléments finis l'effet des paramètres d'isolation contre le feu, y compris les propriétés thermiques, l'épaisseur, la hauteur, le mode de pose et les dommages locaux à l'isolation contre le feu, sur la réponse au feu des poutres en RPC renforcées. Parmi les résultats obtenus, il a été constaté que la conductivité thermique, l'épaisseur, le mode de pose et la hauteur influencent fortement la résistance au feu des poutres en RPC renforcées et isolées ; la densité et la chaleur spécifique ont peu d'influence sur leur résistance au feu par rapport à la conductivité thermique de l'isolation contre le feu. De plus, la défaillance des poutres en RPC renforcées avec une isolation contre le feu endommagée localement se produit à l'endroit où la protection contre l'incendie est manquante. Assurer l'intégrité de l'isolation contre le feu sur la poutre est une condition préalable pour que l'isolation contre le feu puisse jouer efficacement un rôle dans les propriétés résistantes au feu.

II.9. Lacunes actuelles de la recherche sur le béton auto-plaçant

Pour utiliser le béton auto-plaçant (BAP) dans les éléments structurels et garantir un niveau spécifique de résistance au feu des poutres en BAP, il est impératif de définir des exigences relatives à la géométrie, aux charges et aux conditions aux limites.

À ce jour, les critères structuraux et les directives pour l'analyse de la conception au feu du BAP restent inconnus dans la communauté scientifique. La plupart des études se limitent à des campagnes expérimentales portant sur des géométries restreintes, des charges spécifiques et des types de protection incendie. Par conséquent, l'application de modèles numériques thermo-mécaniques complets pour évaluer de manière paramétrique l'efficacité du BAP lors d'un incendie est quasiment inexistante.

Ces lacunes dans la recherche soulignent l'importance cruciale d'une étude approfondie sur les performances du BAP en cas d'incendie, notamment dans son utilisation dans les éléments

structuraux tels que les poutres. De plus, il est essentiel d'évaluer l'efficacité des solutions proposées pour améliorer sa performance au feu, telles que l'ajout de fibres ou d'isolants coupe-feu.

II.10. Conclusion

Les incendies de bâtiments sont considérés comme l'un des phénomènes les plus dangereux pour les êtres humains et leurs biens. Étant donné que la plupart des bâtiments dans le monde sont constitués de béton armé, la performance du béton à haute température est une source de préoccupation majeure pour les chercheurs. En effet, les transformations physico-chimiques qui surviennent affectent les propriétés thermiques et mécaniques du béton, et par conséquent, influencent les performances des éléments structuraux en béton armé.

Dans les codes de conception tel que l'Eurocode, les informations se limitent généralement au béton normal ou à haute résistance. Cependant, il existe un manque d'informations sur le comportement des éléments structurels en béton innovant lorsqu'ils sont exposés au feu. Malgré cela, de nombreuses recherches ont été menées sur le comportement des poutres en béton à haute performance. En outre, des solutions telles que l'ajout de fibres ou l'isolation coupe-feu sont proposées pour améliorer la résistance au feu du béton.

La plupart des études indiquent que le béton à résistance normale présente un comportement plus favorable que le béton à haute résistance lorsqu'il est exposé au feu. Cependant, la littérature et les codes de conception manquent d'informations sur les performances des éléments structurels en béton auto-plaçant et sur l'efficacité de l'ajout de fibres hybrides ou d'isolants thermiques pour améliorer leur comportement en cas d'incendie.

Chapitre III. Étude de cas et méthodologie

III.1. Introduction

Ce chapitre explore diverses études de cas afin d'examiner en détail le comportement mécanique et thermomécanique (résistance au feu) des poutres en béton autoplaçant (BAP) et en béton autoplaçant à fibres hybrides (BAPF) lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées. Il fournit une analyse des spécifications des spécimens étudiés, incluant leurs caractéristiques géométriques, les conditions de chargement, ainsi que l'incorporation de fibres hybrides. Par ailleurs, l'isolation thermique est aussi un paramètre influant sur la résistance au feu des différentes poutres, en simulant une évaluation des performances globales des structures en béton armé dans des conditions de chaleur extrême.

III.2. Hypothèses retenues

La géométrie et le ferraillage des poutres ont été définis conformément aux prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-2 [8] pour l'ensemble des poutres. Les caractéristiques thermiques et mécaniques adoptées pour le béton ordinaire sont conformes à l'Eurocode 2 Partie 1-2 [8]. En ce qui concerne le béton autoplaçant (BAP), les propriétés retenues sont issues de la littérature scientifique [75, 81, 88]. Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que la densité du BAP est supérieure à celle du béton ordinaire, se situant généralement dans une plage comprise entre 2600 et 4000 kg/m³ [104, 105]. Dans cette étude, une valeur de 3000 kg/m³ a été adoptée.

III.3. Justification du choix des poutres

L'étude des poutres a été retenue car elles sont considérées comme des éléments intermédiaires, et ce choix est motivé à la fois par des raisons scientifiques et pratiques. Du point de vue mécanique, une poutre soumise à la flexion simple offre un cadre expérimental et numérique maîtrisable : les conditions aux limites sont faciles à imposer, les champs de contrainte et de déformation sont bien connus, et des solutions analytiques de référence (théorie d'Euler-Bernoulli) permettent une validation rigoureuse des modèles thermo-mécaniques ainsi que des lois constitutives à haute température. Sur le plan structurel, les poutres jouent un rôle essentiel dans la redistribution des charges horizontales et sont souvent à l'origine de mécanismes progressifs d'effondrement lorsqu'elles sont affaiblies par le feu. Leur comportement (flèche, perte de raideur, fissuration, éclatement thermique) illustre donc des phénomènes critiques à prendre en compte avant d'aborder l'étude d'éléments plus complexes.

III.4. Comportement mécanique des poutres en BAP et BAPF à différentes températures

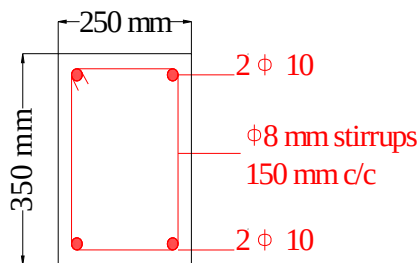
Le comportement mécanique des poutres BAP et BAPF est évalué à travers deux études de cas A et B, dans lesquelles la capacité de chargement des poutres à différentes températures est suivie.

III.4.1. Cas A : Effet de la variation de la fraction volumique des fibres d'aciers dans les poutres BAPF

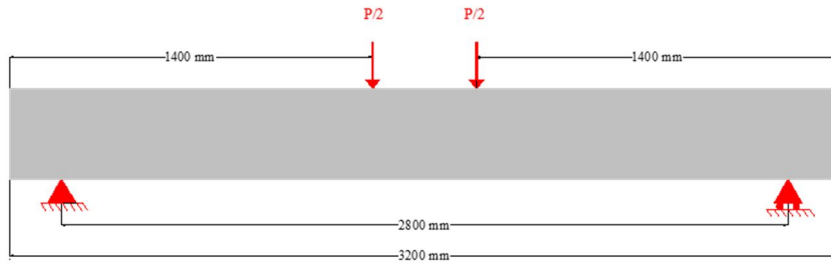
Pour évaluer l'efficacité globale de l'incorporation de fibres hybrides et évaluer spécifiquement l'influence des fibres d'acier sur l'amélioration du comportement des poutres en béton auto-plaçant (BAP) sous l'effet des hautes températures, l'étude de cas comprend trois poutres en béton armé (BA) : l'une en BAP sans fibres et les autres en BAP à fibres hybrides (BAPF), avec la même fraction volumique (FV) de fibres de polypropylène et une FV variable de fibres d'acier. La sélection de la FV pour les fibres est basée sur les valeurs optimales rapportées dans la littérature. Les désignations et les paramètres des poutres étudiées sont représentés dans le Tableau III-1. Toutes les poutres sont simplement appuyées avec une portée de 3,2 m et une section transversale de 250x350 mm. La Figure III-1 montre les dimensions et les détails de l'armature, les conditions de charge et de support des poutres étudiées. La limite d'élasticité et le module d'élasticité des barres d'armature sont respectivement de 420 MPa et 205 MPa.

Tableau III-1 Spécifications des poutres (Cas A)

Désignation des poutres	Polypropylène FV (%)	Acier FV (%)	Résistance à la compression du béton (MPa)
B1-0	0	0	40
B1-1	0.1	1	48
B1-2	0.1	2	54



Section Transversale



Elévation

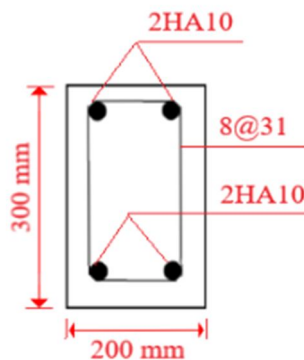
Figure III-1 Dimensions et détails de ferrailage des poutres étudiées (Cas A)

III.4.2. Cas B : Effet de la variation de la fraction volumique des fibres polypropylènes dans les poutres BAPF

Les poutres examinées dans cette étude de cas sont simplement appuyées, avec une longueur de 3,6 m et une section transversale rectangulaire de 200 x 300 mm, comme illustrée à la Figure III-2. Trois poutres en béton armé autoplaçant ont été étudiées, certains avec et d'autres sans fibres hybrides, comme indiqué dans le Tableau III-2. Cette recherche vise à prédire le comportement mécanique des poutres en béton armé autoplaçant, avec ou sans fibres hybrides, tout en précisant l'influence de la variation des fibres de polypropylène, sous l'effet de hautes températures. Pour ce faire, une charge concentrée croissante P est appliquée au milieu des poutres jusqu'à leur rupture à différentes températures : 20°C, 400°C, 600°C et 800°C.

Tableau III-2 Présentation des caractéristiques des poutres (Cas B)

Désignation	Acier FV (%)	Polypropylène FV (%)	Résistance à la compression du béton (MPa)
B2-0	0	0	40
B2-1	1	0,1	46
B2-3	1	0,2	48



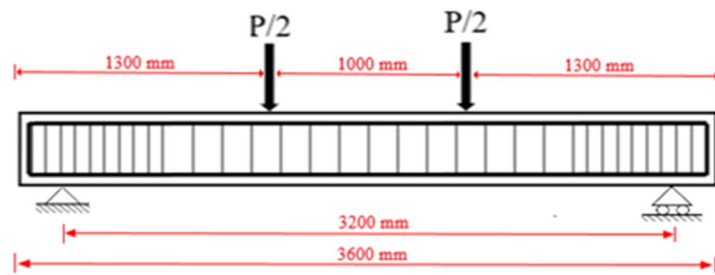


Figure III-2 Détails de ferrailage, dimensions et chargement des poutres sélectionnées pour le cas d'étude B

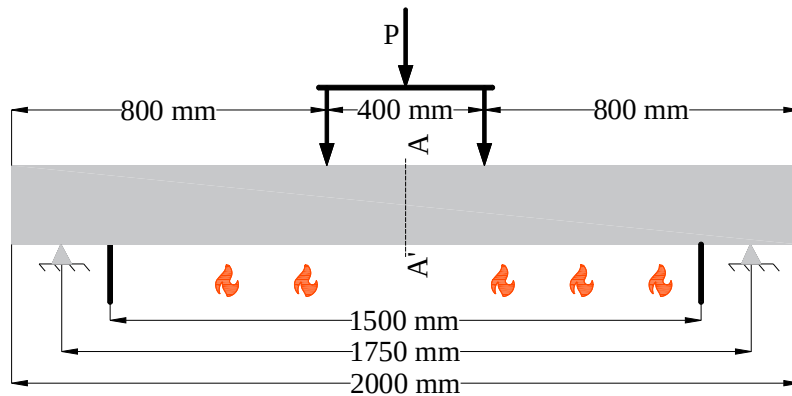
III.5. Investigation de la résistance au feu des poutres en BAP et BAPF

Cette section comprend quatre étude de cas, C, D, E et F, ayant pour objectif d'investiguer la résistance au feu des poutres en béton autoplaçant (BAP) et d'évaluer l'effet de l'incorporation de fibres hybrides ainsi que de l'utilisation d'une isolation coupe-feu, en plus de la variation de l'enrobage et de la section transversale sur les performances de résistance au feu de ces poutres.

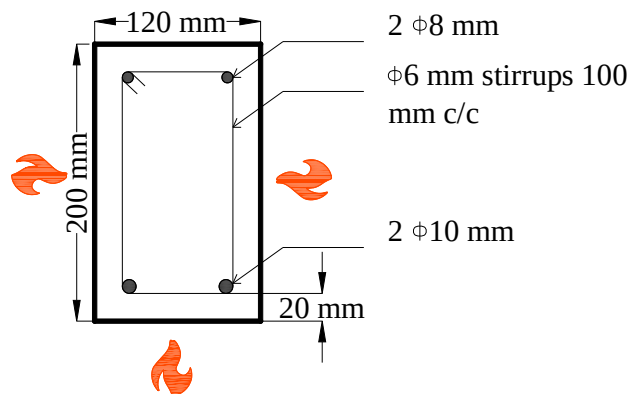
III.5.1. Cas C : Influence des fibres hybrides et de l'isolant coupe-feu

Cette étude de cas porte sur sept poutres ayant les mêmes dimensions et conditions aux limites, chacune avec une section transversale de 120 x 200 mm² et une longueur totale de 2000 mm. Ces poutres sont renforcées avec deux barres de 10 mm de diamètre pour l'armature en traction, deux barres de 8 mm de diamètre pour l'armature en compression, et des étriers de 6 mm de diamètre espacés de 100 mm pour l'armature au cisaillement, comme illustré à la Figure III-3. La première poutre est en béton ordinaire (BO), tandis que les six autres sont en béton autoplaçant (BAP). L'une des poutres en BAP, sans isolation thermique et sans fibres hybrides, est utilisée comme référence, tandis que les cinq autres poutres avec différentes isolations thermiques, telles que Tyfo WR-AFP, CAFCO 300 et Carboline Type-5MD, dont une contenant des fibres hybrides et une isolation thermique Carboline Type-5MD. Les désignations et caractéristiques de toutes les poutres étudiées sont détaillées dans le Tableau III-3. Les poutres sont soumises à des charges thermiques et mécaniques combinées. La charge thermique est appliquée sur trois faces longitudinales selon le modèle de feu standard ISO834, avec une période d'exposition de 2 heures, ainsi qu'à une charge mécanique constante

fixée à 35 % de la charge ultime. L'utilisation de l'isolation thermique est limitée à la face inférieure des poutres étudiées, avec une épaisseur de 3 mm, comme montré à la Figure III-4.



(a) Élévation



(b) Section A-A'

Figure III-3 Dimensions, ferraillage, chargement et détails des conditions aux limites des poutres étudiées (Cas C)

Tableau III-3 Désignations et détails des poutres étudiées (Cas C)

Poutres	Type du béton	Isolation coupe-feu	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la compression" (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Conductivité thermique (W/mK)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Densité (kg/m³)
B3-0	BO	without	30.22	46.52	2.39	1.33	900	2350
B3-1	BAP	without	40.88	60	5.5	3.03	1029.78	3000
B3-2	BAPF	without	41.24	80.31	6.29	3.03	1029.78	3000
B3-3	BAP	Tyfo WR-AFP	40.88	60	5.5	3.03	1029.78	3000
B3-4	BAP	CAFCO 300	40.88	60	5.5	3.03	1029.78	3000

B3-5	BAP	Carboline Type-5MD	40.88	60	5.5	3.03	1029.78	3000
B3-6	BAPF	Carboline Type-5MD	41.24	80.31	6.29	3.03	1029.78	3000

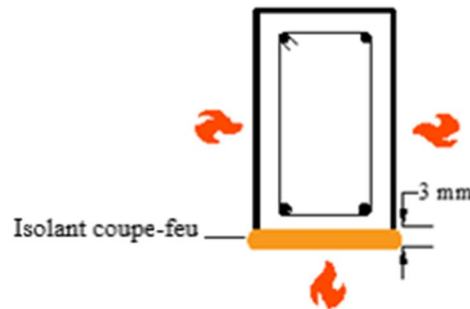
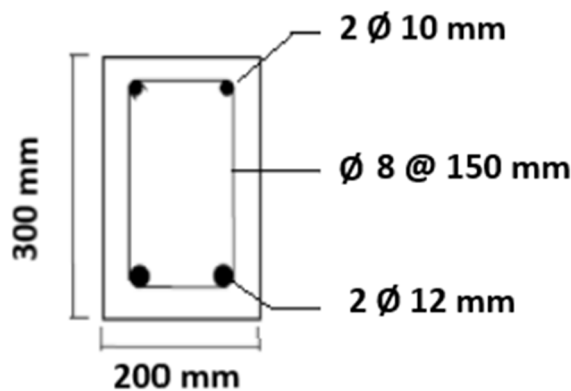


Figure III-4 Placement de l'isolant coupe-feu dans les poutres étudiées (Cas C)

III.5.2. Cas D : Influence de la variation de l'enrobage

Cette étude de cas comprend trois poutres en BAPF de même géométrie et de même renforcement, mais qui diffèrent uniquement dans l'enrobage du béton, comme indiqué dans le Tableau III-4. Afin d'évaluer l'effet de l'enrobage sur la résistance au feu des poutres BAP, ces poutres sont analysées en deux étapes. La première étape consiste à évaluer la charge ultime en appliquant une charge croissante jusqu'à la rupture. La deuxième étape consiste à exposer les poutres au modèle de feu standard ISO834 sur les trois faces longitudinales pendant 2 heures, avec l'application d'une charge mécanique équivalente à 40 % de la charge ultime. Le ferrailage, les conditions aux limites et l'application de la charge sont montrés à la Figure III-5.



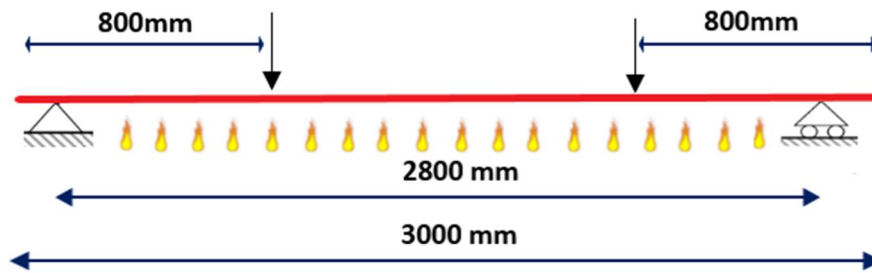


Figure III-5 Détails de chargement et de ferrailages des poutres en BAPF (Cas D)

Tableau III-4 Caractéristiques des poutres étudiées (Cas D)

Poutres	Enrobage (mm)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
B4-1	25	45	4.36
B4-2	35	45	4.36
B4-3	45	45	4.36

III.5.3. Cas E : Influence de la variation de la section transversale

L'étude consiste à prédire l'effet de la variation de la section transversale sur la résistance au feu de trois poutres en béton armé auto-plaçant fibrées (BAPH) de longueur 3,6 m et dont les sections transversales sont représentées dans le Tableau III-5. L'analyse de ces poutres comporte deux étapes, la première permet l'évaluation de la charge ultime en appliquant une charge croissante jusqu'à la rupture et la seconde, en faisant exposer les poutres au modèle de feu standard ISO834 sur les trois côtés longitudinaux pendant 2 heures avec l'application d'une charge mécanique égale 60 % de la charge ultime. Le ferrailage, les conditions aux limites et l'application de la charge sont montrés dans la Figure III-6.

Tableau III-5 Section transversale et caractéristiques des poutres étudiées (Cas E)

Désignation	Section transversale	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)
B5-1	(150X250)	69,6	5,6
B5-2	(200X300)	69,6	5,6
B5-3	(250X350)	69,6	5,6

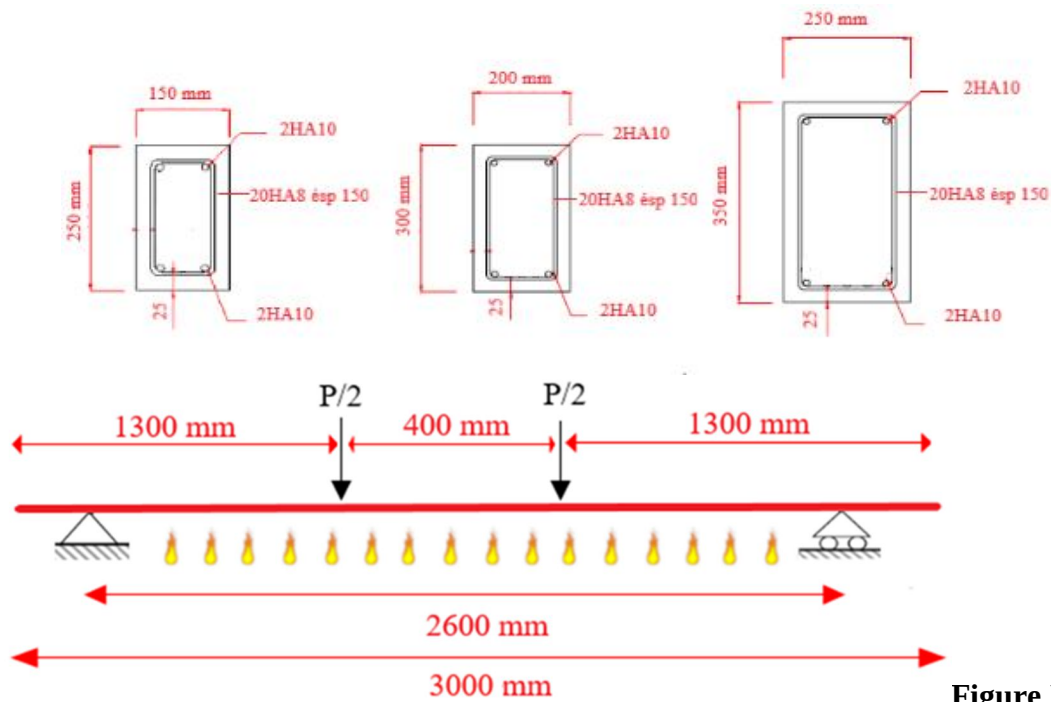


Figure III-6

Détails des poutres étudiées (Cas E)

III.5.4. Cas F : Influence de la variation de la longueur et le ratio de charge

L'étude de cas concerne une poutre en béton autoplaçant fibré hybride (BAPF), contenant 2 % de fibres d'acier et 0,2 % de fibres de polypropylène en fraction volumique. La poutre en BAPF, simplement appuyée, a une portée de 3 m avec une section transversale rectangulaire de 200 x 300 mm² et est renforcée par 3 barres de Φ 12 mm en traction et 2 barres de Φ 10 mm en compression. Les étriers sont de Φ 8 mm espacés de 150 mm. La discrétisation de la poutre en BAPF est illustrée à la Figure III-7. La résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité du béton autoplaçant renforcé de fibres hybrides sont respectivement de 80,30 MPa, 8,89 MPa et 46,52 GPa. La géométrie et les propriétés des fibres hybrides utilisées dans cette étude sont présentées dans le Tableau IV-1. La limite d'élasticité et le module d'élasticité des barres atteignent respectivement 420 MPa et 200 GPa.

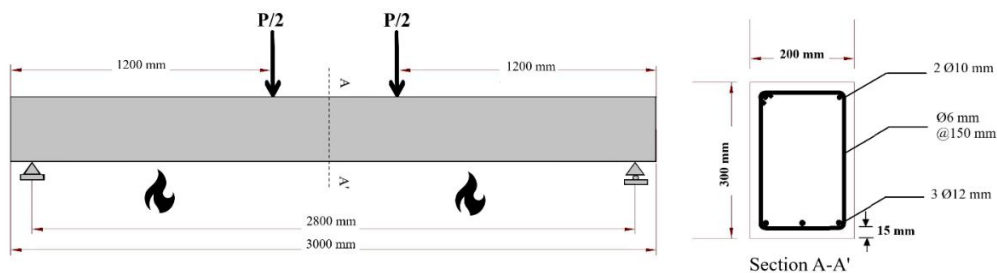


Figure III-7 Géométrie, détails du ferrailage, chargement et conditions aux limites de la poutre en BAPF (Cas F)

L'analyse de cette poutre consiste à appliquer deux charges combinées, thermique et mécanique, soumise au feu selon la norme ISO834 pendant 3 heures sur les trois côtés longitudinaux, ainsi qu'à appliquer une charge mécanique constante égale à 40 % de la capacité portante.

L'étude de cas a été menée pour examiner l'effet de la variation de la longueur de 3000 mm à 4000 mm et le ratio de charge de 40 % à 30 %, sur la résistance au feu des poutres en BAPF.

III.6. Conclusion

Les différents cas d'étude ainsi que leur méthodologie adoptée ont été présentés dans ce chapitre pour étudier le comportement mécanique des poutres en béton autoplaçant (BAP) et en béton autoplaçant fibré hybride (BAPF) lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées. En se basant sur les différentes études de cas, nous avons exploré les spécifications des matériaux, les caractéristiques géométriques, ainsi que l'incorporation de fibres hybrides et d'isolants thermiques. Les différentes études de cas permettent d'envisager une évaluation approfondie des performances de ces poutres sous des conditions de chaleur extrême. L'analyse de l'influence des fibres hybrides, de l'isolation thermique, ainsi que de la variation de l'enrobage et de la section transversale, constitue une étape cruciale pour mieux comprendre le comportement des éléments en béton armé.

Chapitre IV. Modélisation numérique et validation

IV.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation numérique du comportement thermomécanique des poutres en béton armé autoplaçant (BAP) lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées, telles que celles résultant d'incendies. L'utilisation du code de calcul ANSYS Mechanical Parametric Design Language (APDL) permet de développer des modèles d'éléments finis (EF) robustes, capables d'analyser les effets complexes des températures sur la résistance des structures. L'objectif principal de ce chapitre est de présenter la méthodologie de simulation adoptée pour les diverses études de cas, en expliquant les approches analytiques choisies, les hypothèses fondamentales, ainsi que les propriétés des matériaux et les conditions aux limites appliquées dans le cadre de ces simulations. Un aspect essentiel de cette modélisation est la validation des modèles avec des résultats obtenus de la littérature. Cela implique de comparer les simulations avec des données expérimentales et des études antérieures pour s'assurer que le modèle reproduit fidèlement le comportement observé des poutres sous conditions réelles. Cette étape de validation renforce la crédibilité des simulations et permet de confirmer que les résultats peuvent être utilisés pour éclairer la conception et l'évaluation des structures en béton armé.

IV.2. Éléments finis pour l'analyse thermique et mécanique

Pour l'analyse thermique, les éléments utilisés dans ANSYS sont LINK33 et SOLID70, qui sont respectivement employés pour simuler les armatures et le béton.

LINK33 est un élément uni-axial avec deux nœuds, chacun doté d'un degré de liberté pour la température. Ce type d'élément est spécifiquement conçu pour modéliser la conduction de chaleur le long des armatures longitudinales et transversales. Sa principale fonction est de transmettre la chaleur entre les deux nœuds, ce qui est crucial pour simuler la propagation thermique à travers les barres d'armature. Il est adapté pour les analyses thermiques transitoires 3D, où la température évolue dans le temps, ainsi que pour les analyses thermiques stationnaires 3D, où la température est stable. Sa géométrie, les emplacements des deux nœuds et le système de coordonnées utilisé pour la modélisation sont illustrés à la Figure IV-1.

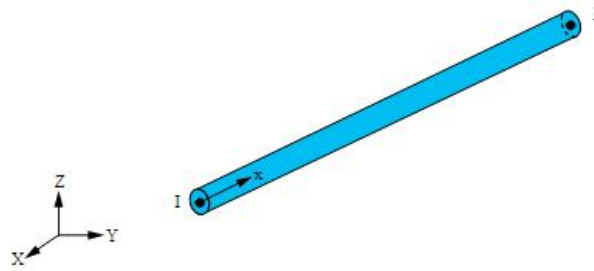


Figure IV-1 Géométrie de l'élément LINK33

L'élément SOLID70 est utilisé pour la modélisation du béton en raison de ses propriétés de conduction thermique. Cet élément possède huit nœuds, chacun ayant un degré de liberté pour la température. Il permet de capturer efficacement la répartition thermique dans les structures en béton grâce à sa capacité à modéliser la conduction thermique tridimensionnelle. Il est particulièrement utile pour analyser la manière dont la chaleur se diffuse dans le béton sous l'effet des charges thermiques. Sa géométrie, les emplacements des nœuds et le système de coordonnées utilisé pour cette modélisation sont illustrés à la Figure IV-2.

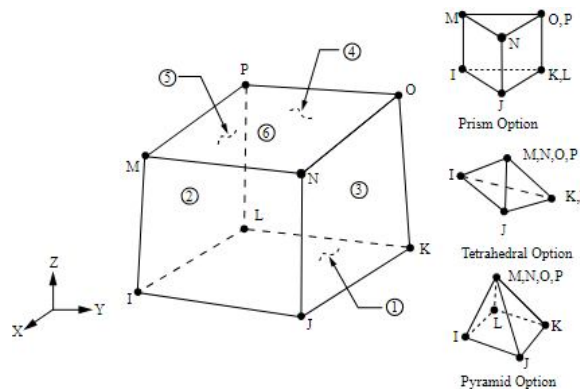


Figure IV-2 Géométrie de l'élément SOLID70

D'autre part, pour l'analyse structurelle, les éléments LINK180 et SOLID65 ont été sélectionnés pour modéliser respectivement les armatures et le béton.

LINK180 est un élément de poutre 3D avec deux nœuds. Chaque nœud possède trois degrés de liberté de translation, correspondant aux directions X, Y et Z dans le système de coordonnées global. Cet élément est conçu pour supporter des charges uni-axiales, qu'elles soient de tension ou de compression. Il est particulièrement adapté pour modéliser les barres d'armature, en raison de sa capacité à représenter les effets de la plasticité, du fluage, des grandes déformations et des grands déplacements. Il permet ainsi de simuler le comportement des armatures sous des

conditions de charge variées et des déformations importantes. Sa géométrie, incluant les emplacements des nœuds et le système de coordonnées, est illustrée à la Figure IV-3.

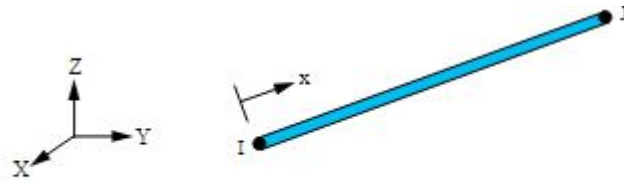


Figure IV-3 Géométrie de l'élément LINK180

SOLID65 est un élément de type solide avec huit nœuds, chacun possédant trois degrés de liberté de translation. Ce type d'élément est utilisé pour modéliser le béton en raison de sa capacité à capturer les comportements complexes sous charges, tels que les déformations plastiques, le fluage, ainsi que les fissures et les écrasements. Il permet aussi de simuler la présence de barres d'armature à l'intérieur du béton dans les trois directions orthogonales (X, Y et Z) du système global de coordonnées. Cela permet de modéliser précisément les interactions entre le béton et les armatures. Sa géométrie, les emplacements des huit nœuds, les orientations des armatures, et le système de coordonnées sont représentés à la Figure IV-4.

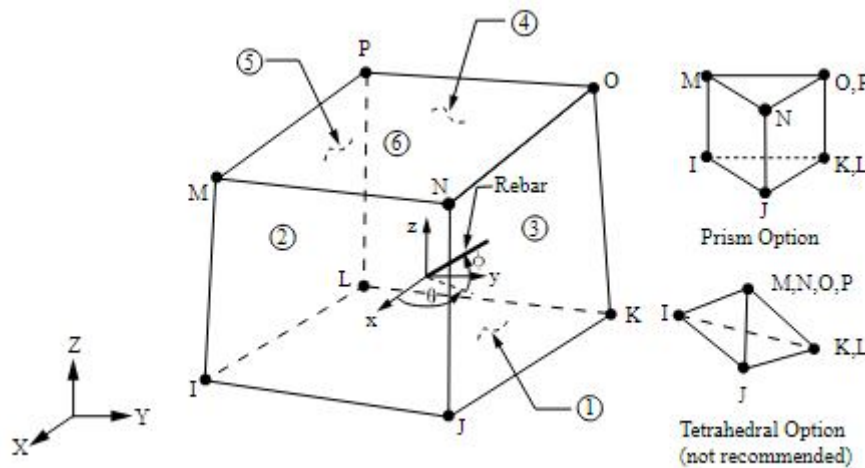


Figure IV-4 Géométrie de l'élément SOLID65

SOLID185 a été utilisé pour modéliser les plaques rigides. Il est défini par huit nœuds, ayant trois degrés de liberté à chaque nœud : des translations dans les directions nodales X, Y et Z. L'élément dispose de capacités de plasticité, d'hyper-élasticité, de rigidification sous contrainte, de fluage, de grandes déformations et de grands déplacements. Il possède également une formulation mixte permettant de simuler les déformations des matériaux élastoplastiques quasi

incompressibles et des matériaux hyper-élastiques totalement incompressibles et le système de coordonnées est illustré à la Figure IV-5.

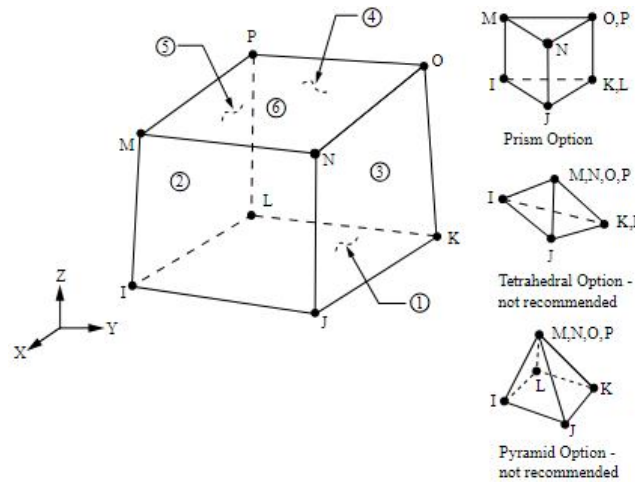


Figure IV-5 Géométrie de l'élément SOLID185

IV.3. Matériaux

Dans cette section, les propriétés des matériaux utilisés dans les modèles numériques, concernant toutes les études de cas, sont présentées, y compris les paramètres non linéaires susceptibles de conduire à la fissuration et à la déformation du béton et de l'acier respectivement. Pour le béton, le modèle de plasticité à durcissement isotrope multilinéaire (MISO) présent dans la bibliothèque de matériaux ANSYS a été utilisé. Pour l'acier, un modèle multilinéaire isotrope basé sur la formulation de Von Mises a été appliqué. Le modèle MISO dans ANSYS Mechanical APDL est un modèle de plasticité indépendant du taux, caractérisé par un critère de rendement de Von Mises, une règle d'écoulement associative et un durcissement isotrope. Notamment, le choix du modèle MISO pour cette étude a été guidé par des recherches antérieures démontrant sa validité pour simuler des poutres en béton armé [106, 107].

IV.3.1. Loi de comportement

Cette étude repose sur l'utilisation des propriétés des matériaux comme paramètres d'entrée pour simuler le comportement des poutres en béton. En conséquence, des modèles de base pour le béton autoplaçant ont été adoptés, ainsi que l'intégration de l'effet des fibres. Ces modèles fondamentaux sont représentés dans les équations analytiques qui vont suivre.

L'équation X, proposée par Aslani and Samali [88], a été utilisée pour simuler la réponse du béton autoplaçant (BAP) sous contrainte de compression à des températures élevées.

$$\frac{\sigma_{c,T}}{f'_{c,T}} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{c,T}}{\varepsilon_{max}}\right)}{n-1+\left(\frac{\varepsilon_{c,T}}{\varepsilon_{max}}\right)^n} \quad (1)$$

$$n = [1.02 - 1.17 \left(\frac{E_{sec}}{E_{c,T}}\right)]^{-0.74} \quad \text{Si} \quad \varepsilon_{c,T} \leq \varepsilon_{max} \quad (2)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{c,T}}{\varepsilon_{max}} \quad (3)$$

Où $\sigma_{c,T}$ représente la contrainte du béton, $f'_{c,T}$ la résistance maximale à la compression du béton, n est un paramètre matériel qui dépend de la forme de la courbe contrainte-déformation, $\varepsilon_{c,T}$ est la déformation du béton, ε_{max} est la déformation correspondant à la contrainte maximale $f'_{c,T}$, n est un paramètre matériel modifié pour la branche ascendante, $E_{c,T}$ est le module d'élasticité, et E_{sec} est le module d'élasticité sécant.

Les équations 4 et 5 proposées par Xu, Li [108] et al. ont été utilisées pour simuler l'impact des fibres hybrides de polypropylène et d'acier sur la résistance à la compression. L'équation 6, également proposée par Xu, Huang [109], a été utilisée pour modéliser l'effet des fibres sur la résistance à la traction.

$$\sigma_c = \sigma_{c0}(1 + 0.17\lambda_s + 0.341\lambda_p) \quad (4)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c0}(1 + 0.55\lambda_s + 0.341\lambda_p) \quad (5)$$

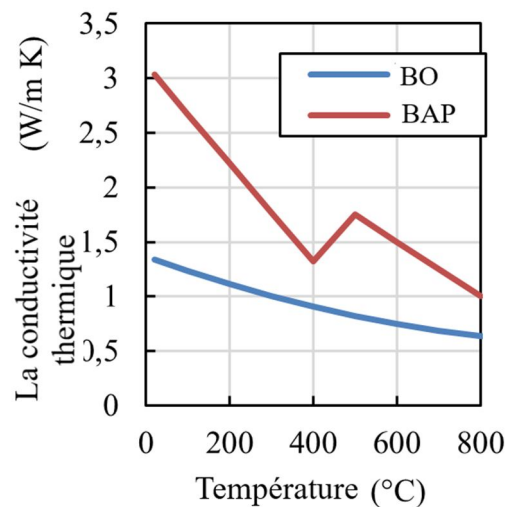
$$f_{ft} = f_{mt}(1 + \alpha\lambda_s + \beta\lambda_s\lambda_p) \quad (6)$$

$$\text{Avec} \quad \alpha = 0.379 \text{ et } \beta = 0.02$$

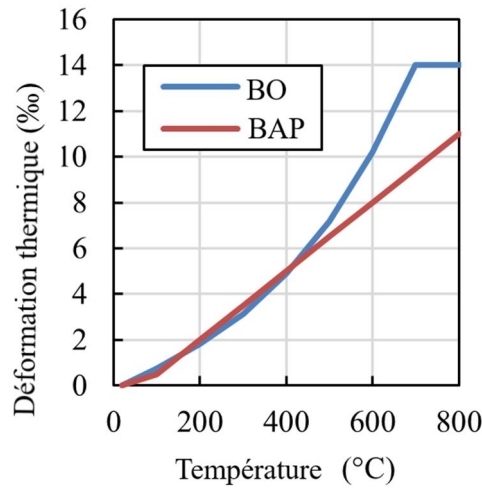
Où σ_{c0} et ε_{c0} représentent respectivement la contrainte maximale et la déformation maximale pour le béton sans fibres. λ_s et λ_p représentent les paramètres caractéristiques des fibres d'acier et de polypropylène, respectivement. Les paramètres f_{ft} et f_{mt} désignent la résistance à la traction uniaxiale du béton avec et sans fibres.

IV.3.2. Propriétés du béton

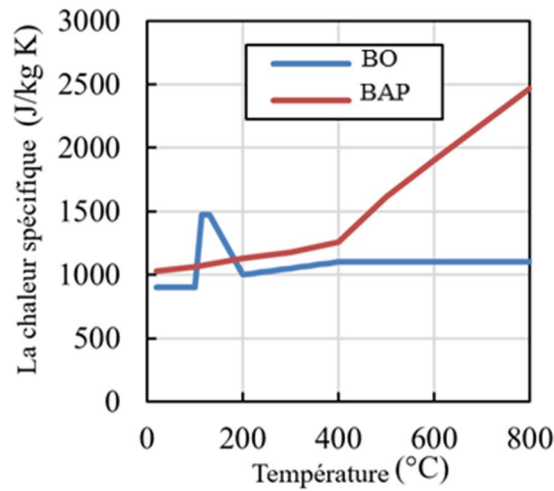
Dans cette analyse numérique, toutes les propriétés thermiques et mécaniques du béton ordinaire (BO) seront affectées par les températures selon la variation proposée dans l'Eurocode 2 Partie 1–2 [8]. Pour le béton, ANSYS utilise des valeurs standard d'énergie de fracture en traction, en faisant indirectement référence à un facteur de fissuration en traction (TCF) de 0,6 [110]. En ce qui concerne le BAP, les relations proposées par Khaliq and Kodur [75] concernant la variation de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de l'allongement thermique en fonction de la température, dont les courbes sont montrées par la Figure IV-6, ont été adoptées dans nos simulations. Sa densité a été prise selon l'Eurocode 2 Partie 1–2 [8].



(a)



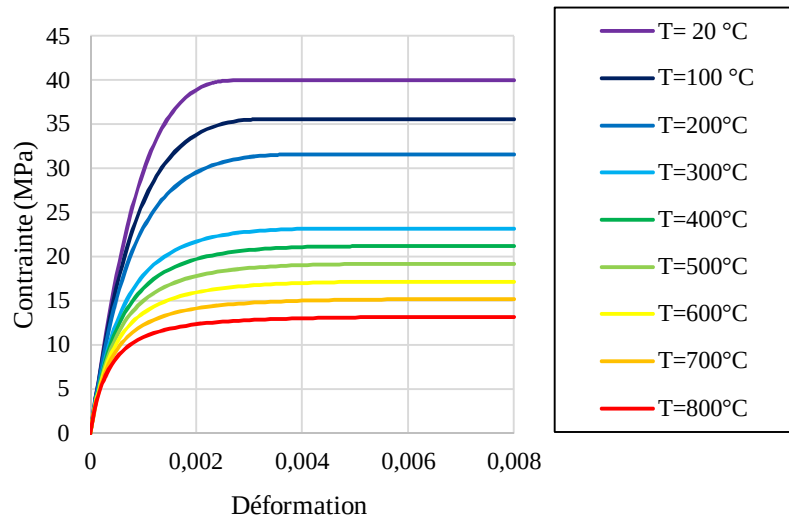
(b)



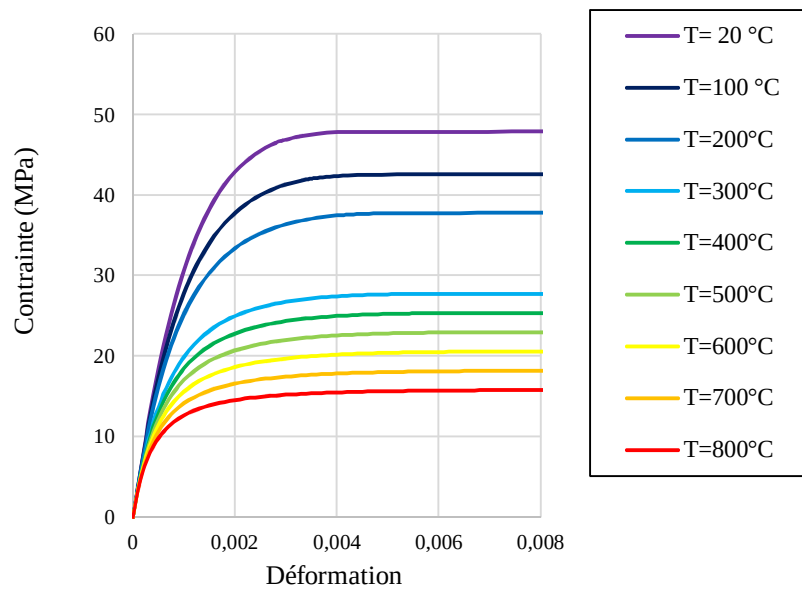
(c)

Figure IV-6 Variation des propriétés thermiques du béton en fonction de la température : a) conductivité thermique, b) chaleur spécifique et c) déformation thermique

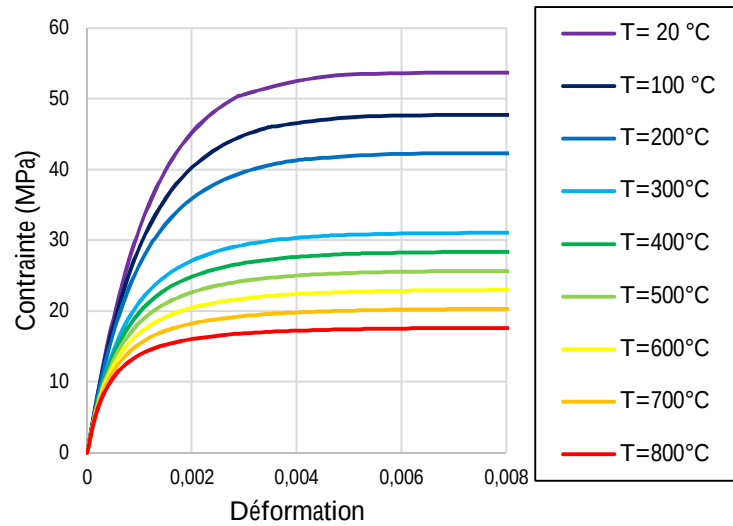
La variation des propriétés mécaniques avec la température du BO a été adoptée selon l'Eurocode 2 Partie 1-2 [8], et les courbes contrainte-déformation pour l'étude de cas C sont illustrées en Figure IV-7. Les lois constitutives du BAP proposées par Aslani and Samali [88], tenant compte des facteurs de réduction des propriétés mécaniques en fonction de la température suggérés par Khaliq and Kodur [75], ont été utilisées en adoptant les courbes contrainte-déformation du BAP à différentes températures pour chaque étude de cas, comme montrées dans la Figure IV-7, la Figure IV-8, la Figure IV-9, la Figure IV-10, la Figure IV-11 et la Figure IV-12.



BAP in B1-0

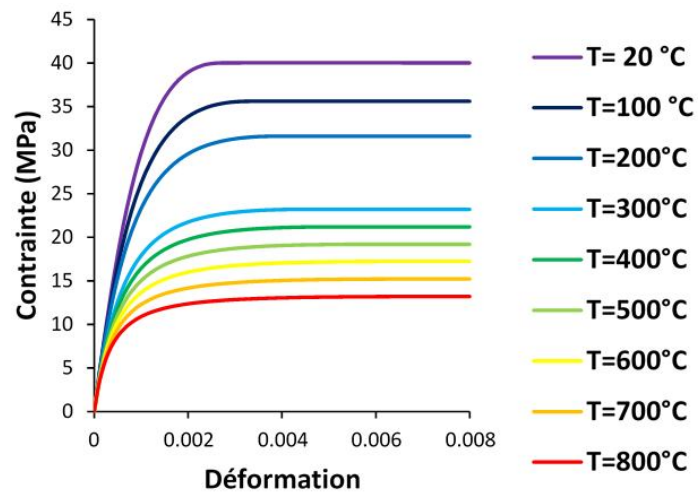


BAPF in B1-1

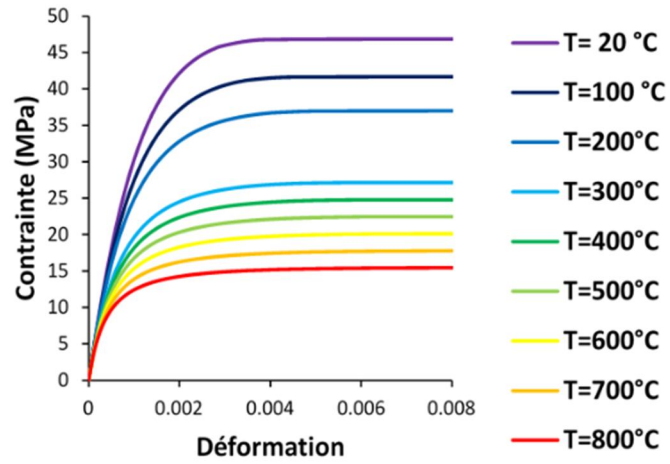


BAPF in B1-2

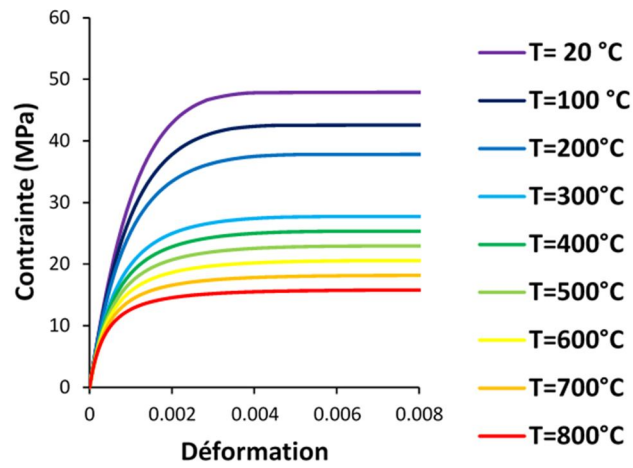
Figure IV-7 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas A à différentes températures



BAP in B2-0

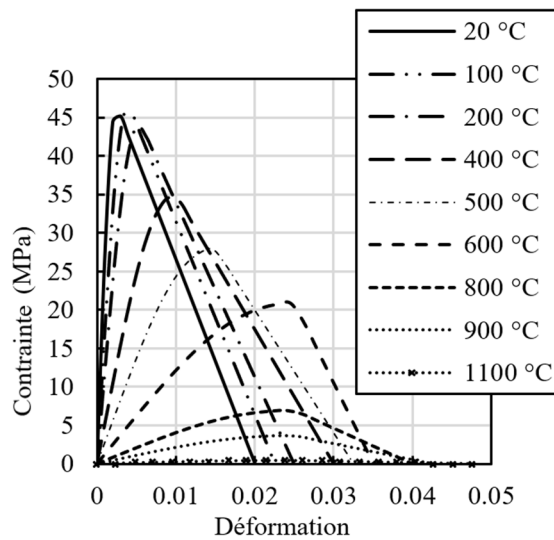


BAPF in B2-1

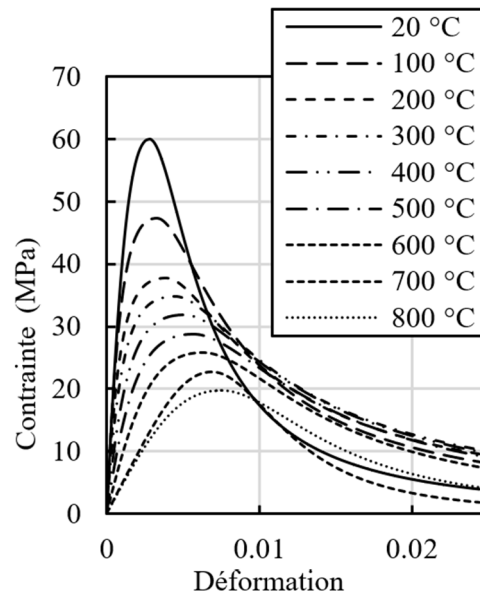


BAPF in B2-2

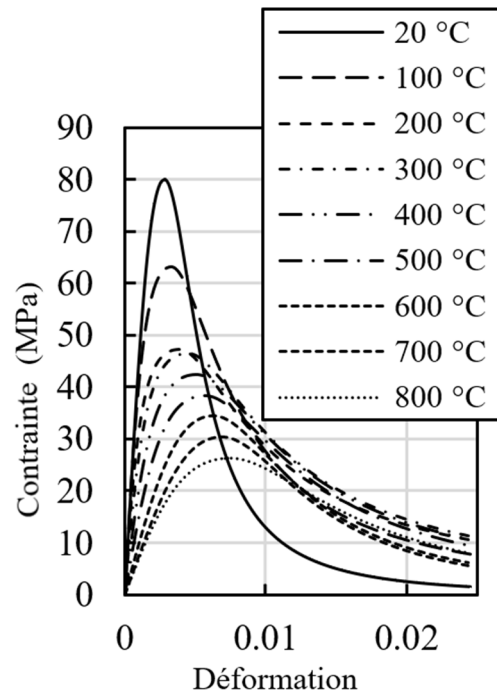
Figure IV-8 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas B à différentes températures



BO in B3-0

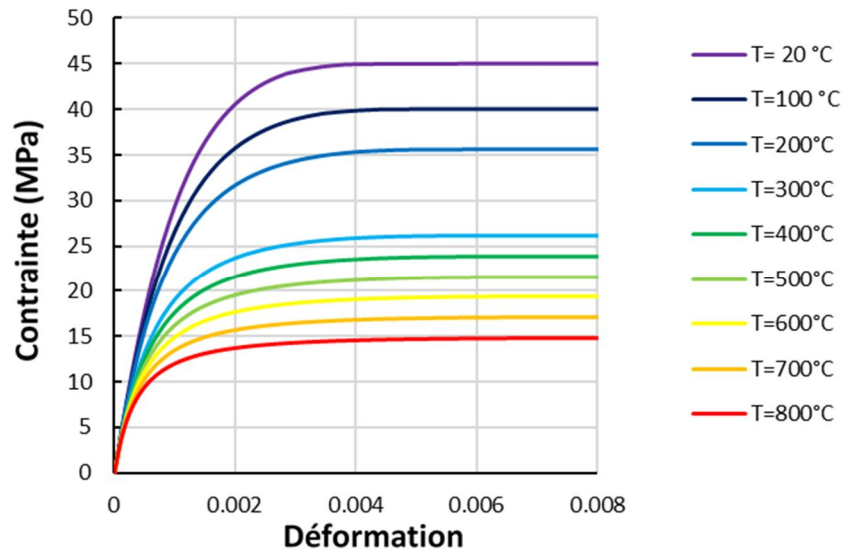


BAP in B3-1, B3-3, B3-4 and B3-5



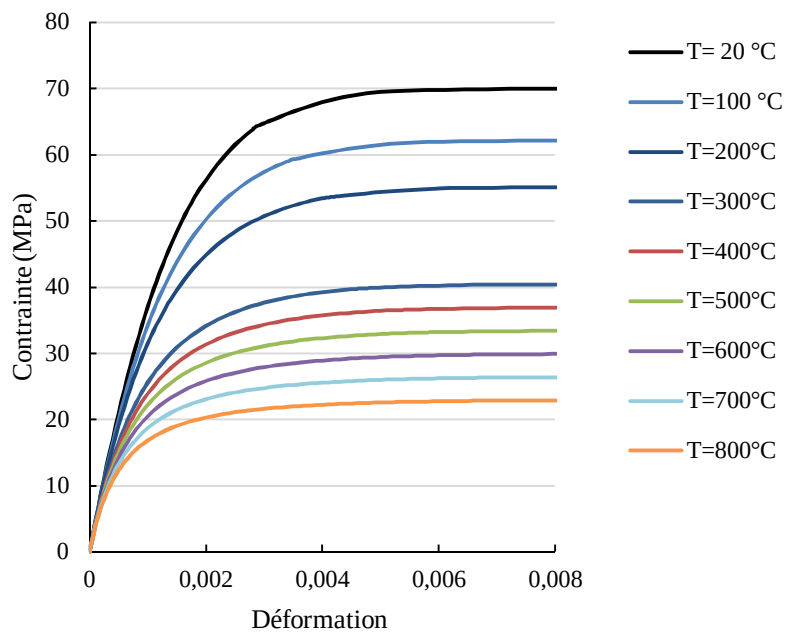
BAPF in B3-2 and B3-6

Figure IV-9 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas C à différentes températures



BAPF B4-1, B4-2, B4-3

Figure IV-10 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas D à différentes températures



BAPF in B5-1B, B5-2, B5-3

Figure IV-11 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas E à différentes températures

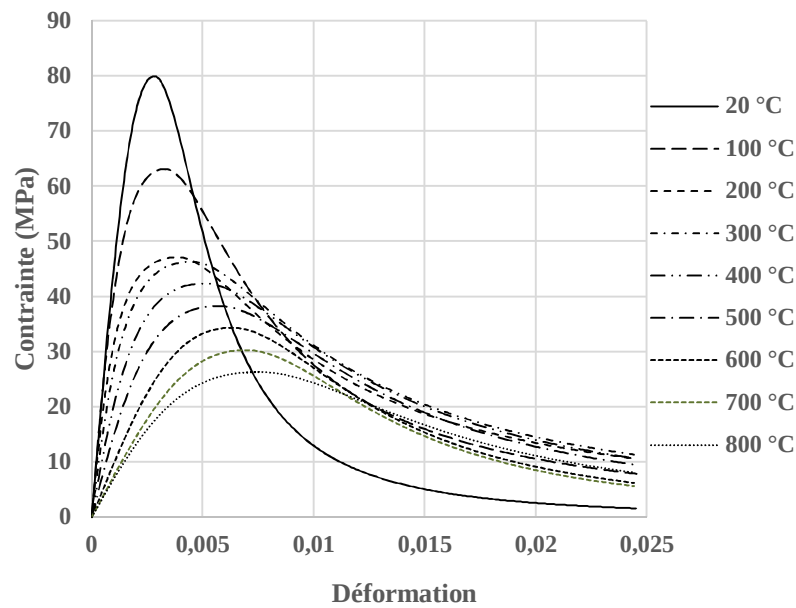


Figure IV-12 Courbes contrainte-déformation du béton pour l'étude de cas F à différentes températures

IV.3.3. Propriétés de l'acier d'armature

L'évolution des propriétés thermiques de l'acier d'armature, telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la déformation thermique en fonction de la température, est illustrée selon l'Eurocode 2 Partie 1-2 [8]. La densité de l'acier supposée égale à 7850 kg/m^3 , ainsi que les propriétés mécaniques de l'acier en fonction de la température utilisées dans cette étude sont conformément à l'Eurocode 2 Partie 1-2 [8].

IV.3.4. Fibres Hybrides

L'ajout de fibres hybrides au béton autoplaçant (BAP) a un effet négligeable sur la variation des propriétés thermiques avec la température [75], et a donc été négligé dans cette étude. Les propriétés contrainte-déformation du BAPF avec l'ajout de fibres hybrides à différentes températures sont évaluées en utilisant les lois constitutives de Aslani and Nejadi [81], en tenant compte de l'impact des fibres hybrides sur la résistance à la compression et à la traction à travers les relations suggérées par Xu, Li [108] et Xu, Huang [109], y compris le facteur de réduction des propriétés mécaniques proposé par Khaliq and Kodur [75]. Les caractéristiques des fibres de polypropylène et d'acier utilisées dans les simulations sont présentées dans le Tableau IV-1,

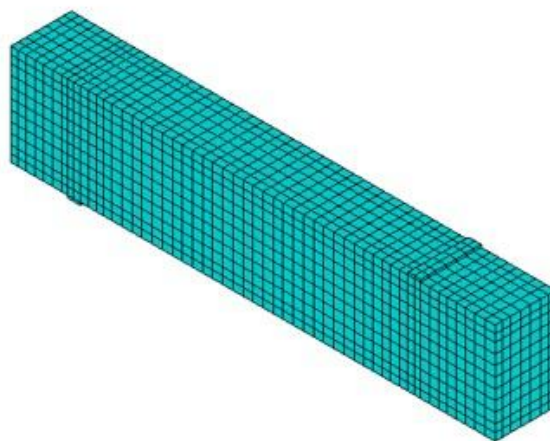
et les courbes contrainte-déformation du BAPF pour chaque étude de cas sont illustrées dans les Figures IV-7, IV-8, IV-9, IV-10, IV-11 et IV-12.

Tableau IV-1 Propriétés mécaniques et physiques des fibres

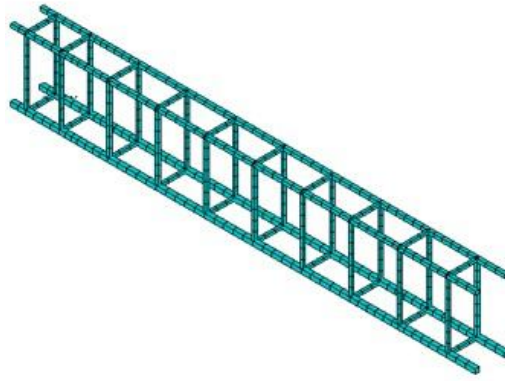
Type de fibre	Densité (Kg/m3)	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Acier	7850	60	0.75	1050	200
Polypropylène	905	65	0.85	250	3

IV.4. Maillage et conditions aux limites

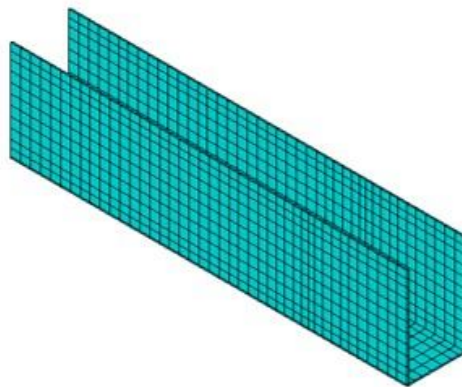
La réduction des propriétés des matériaux induite par la température entraîne de nombreux problèmes de convergence dans l'analyse de la résistance au feu en raison de changements significatifs de la rigidité. Une telle diminution peut rendre la matrice de rigidité globale mal conditionnée, ce qui peut entraîner une non-convergence à un instant donné. Lorsque l'analyse ne converge pas après un nombre spécifié d'itérations en raison d'une combinaison de non-linéarité matérielle et géométrique, l'incrément de temps est affiné avec des pas plus petits pour faciliter la convergence. Une taille de maille de 20 mm pour le béton, les armatures en acier et l'isolation contre le feu est choisie comme étant optimale pour atteindre la convergence et l'efficacité, comme montré à la Figure IV-13.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-13 Maillage par éléments finis pour a) béton, b) armature et c) isolation contre le feu

Il a été montré dans la section précédente que les dimensions des éléments et les géométries choisies ne présentaient aucune dépendance vis-à-vis de la maille. Pour simplifier la génération de la maille, une surface carrée équivalente a été utilisée pour les armatures en acier, permettant ainsi une connexion complète des nœuds entre le béton, les barres longitudinales et les étriers.

La chaleur due à l'incendie est appliquée selon le modèle de feu ISO834 et transférée aux surfaces des poutres sur les trois côtés longitudinaux par convection et rayonnement. Ce modèle utilise un coefficient de convection de 25 W/m^2 , une émissivité de surface de 0,7, la constante de Boltzmann de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, et une émissivité du feu de 1. Le côté non exposé est soumis à la température ambiante de 20°C avec un coefficient de transfert de chaleur de 9 W/m^2 . Les conditions aux limites thermiques (convection et rayonnement) sont montrées dans la Figure IV-14.

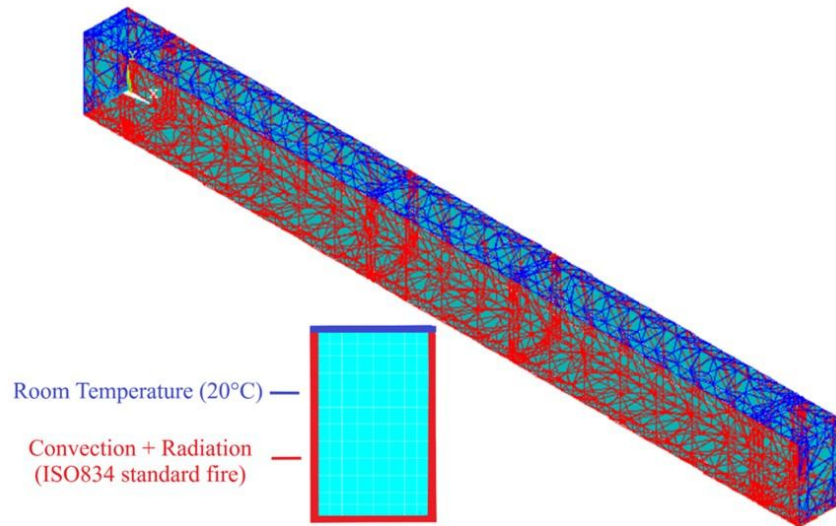


Figure IV-14 Conditions aux limites thermiques

Les supports articulés et à rouleaux sont positionnés en bas de la plaque rigide, spécifiquement aux nœuds centraux. Les charges mécaniques sont appliquées en haut de la plaque rigide à tous les nœuds centraux, comme indiqué dans la Figure IV-15.

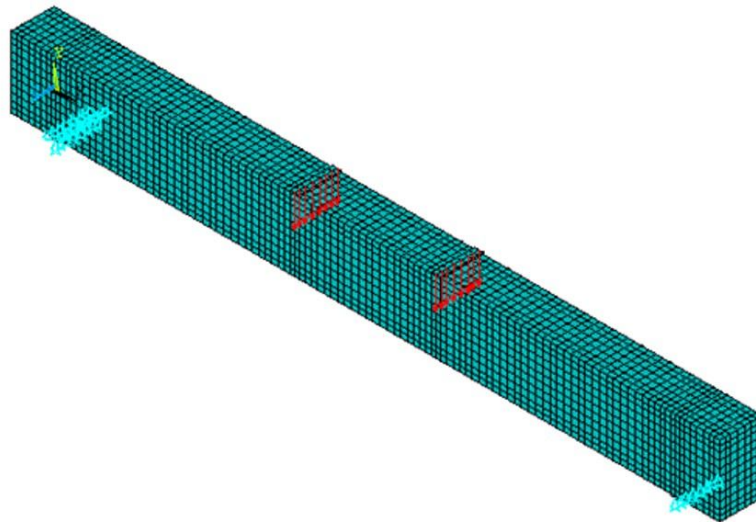


Figure IV-15 Emplacement de la charge et des supports dans la poutre

IV.5. Hypothèses de l'analyse numérique

Les études de cas ont été simulés en développant un modèle EF via le code de calcul ANSYS Mechanical Parametric Design Language (APDL) pour étudier le comportement thermo-mécanique des poutres en béton armé autoplaçant (BAP) sous l'effet des hautes températures dues aux incendies. ANSYS Mechanical APDL, qui fait référence à l'interface en ligne de commande toujours présente dans les versions actuelles, comprend également une interface

graphique. APDL est utilisé pour les analyses nécessitant des algorithmes de résolution non conventionnels, permettant aux utilisateurs de travailler avec des macros écrites en ANSYS Parametric Design Language.

Les études de cas A et B, ont été simulés en utilisant une analyse mécanique, tandis que les cas C, D, E et F ont impliqué à la fois une analyse thermomécanique et une analyse mécanique totalement indépendante uniquement pour déterminer la valeur de la charge ultime pour chaque poutre.

IV.5.1. Analyse mécanique

Les études de cas A et B ont été simulés à l'aide d'une analyse structurelle détaillée, en prenant en compte uniquement les propriétés mécaniques non linéaires des matériaux à la température spécifiée. Cette approche permet de modéliser avec précision le comportement du béton armé et de l'acier de renforcement sous des conditions des hautes températures. L'analyse a été effectuée en plusieurs étapes : d'abord, les propriétés mécaniques non linéaires, telles que la relation contrainte-déformation pour le béton en compression et la résistance ultime à la traction pour l'acier, ont été intégrées en fonction des températures spécifiques. Ensuite, les conditions aux limites appropriées ont été appliquées pour représenter fidèlement les contraintes de support et les charges imposées aux poutres dans chaque étude de cas. Les charges ont été appliquées en considérant les scénarios de chargement prévus, permettant ainsi une évaluation approfondie du comportement structural sous différentes températures. Enfin, une analyse temporelle a été réalisée pour évaluer les performances des structures à diverses températures, fournissant une vue complète de leur comportement sous des charges mécaniques et thermiques combinées.

Les hypothèses adoptées pour cette analyse indiquent que :

- L'analyse intègre des considérations complètes sur les non-linéarités géométriques et matérielles afin de capturer avec précision le comportement structural dans des conditions variables.
- La partie descendante de la courbe idéale contrainte-déformation du béton, qui indique un ramollissement de la déformation, a été négligée, conformément aux recommandations des études antérieures [111].
- Une adhésion totale est supposée entre le béton et l'acier de renforcement, ce qui signifie qu'il n'y a pas de glissement et donc aucun élément de contact spécifique n'est attribué.

L'exclusion de l'élément de contact du modèle présente deux avantages : le premier est la simplicité du modèle, et le second est de faciliter le processus de convergence.

- L'éclatement explosif du béton est négligé.

IV.5.2. Analyse thermomécanique

La simulation des études de cas C, D, E et F, dans le but de prédire la résistance au feu de ces poutres, a été réalisée à travers une analyse thermomécanique via la méthode de couplage séquentiel, qui consiste à effectuer d'abord l'analyse thermique, suivie de l'analyse structurelle basée sur les résultats de la première. Cette approche prend en compte la non-linéarité des propriétés thermiques (conductivité, chaleur spécifique, densité) et mécaniques des matériaux (relation contrainte-déformation pour la résistance en compression du béton et résistance ultime à la traction de l'acier de renforcement), ainsi que la non-linéarité géométrique (effets $P-\Delta$). Cependant, elle ne prend pas en compte les variations du champ de température qui peuvent entraîner une exposition supplémentaire du noyau interne des éléments structurels au stress thermique une fois la rupture survenue.

Dans le développement du modèle EF 3D, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Les propriétés mécaniques du béton et des armatures en acier à différentes températures sont considérées comme isotropes et homogènes.
- L'éclatement du béton est négligé dans cette étude, car la résistance à la compression du béton auto-plaçant (BAP) et du béton ordinaire (BO) est inférieure à 70 MPa, et le béton auto-plaçant renforcé de fibres (BAP-H) contient des fibres de polypropylène [112].
- On suppose une adhérence complète entre le béton et les armatures en acier, et la contrainte totale dans les armatures est similaire à celle dans le béton [112].

La simulation numérique vise d'abord à prédire l'évolution de la température en fonction du temps par le biais d'une analyse thermique transitoire. L'analyse thermique de la poutre en béton armé sous conditions d'incendie commence par l'application d'une charge thermique basée sur la courbe d'incendie ISO 834, un modèle largement reconnu qui définit une relation standardisée entre le temps et la température en cas d'incendie. La chaleur est transférée aux surfaces exposées au feu par convection et rayonnement, qui sont des mécanismes cruciaux dans l'analyse thermique. La convection se produit lorsque le feu chauffe l'air entourant la poutre, et cet air chaud transfère de la chaleur aux surfaces de la poutre. Le transfert de chaleur

par convection est caractérisé par un coefficient de convection, qui indique le taux auquel la chaleur est transférée par unité de surface par degré de différence de température entre la surface et l'air ambiant. Le taux de transfert de chaleur par convection est régi par l'équation suivante :

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_{\text{surface}} - T_{\text{ambient}})$$

Où Q_{conv} représente le flux de chaleur convectif, h est le coefficient de transfert de chaleur convectif, A est la surface exposée au feu, T_{surface} est la température de la surface de la poutre, et T_{ambiante} est la température ambiante. Dans cette étude, et selon l'Eurocode 1 partie 1-2 [8], le coefficient de convection est pris égal à 25 W/m² pour le côté exposé au feu, tandis que pour le côté non exposé (20°C), il est de 9 W/m².

Le rayonnement thermique est modélisé en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann, qui quantifie l'énergie rayonnée par un corps en fonction de sa température. Le transfert de chaleur par rayonnement vers la poutre est donné par :

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot A \cdot (T_{\text{fire}}^4 - T_{\text{surface}}^4)$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m²K⁴), ϵ_1 est l'émissivité de la surface de la poutre (supposée être de 0,7), A est la surface d'échange et T_{fire} représente la température du feu. L'émissivité du feu ϵ_{fire} , est supposée être de 1 correspondant à un corps noir parfait.

Une fois l'analyse thermique terminée, on passe à l'analyse structurelle. Lors de cette phase, l'objectif principal est de prédire la résistance au feu en suivant l'évolution des déformations sous l'effet combiné des températures élevées et des charges mécaniques. Cette phase commence par la définition des conditions aux limites mécaniques suivies par l'application des charges mécaniques. Ensuite, les effets thermiques sont intégrés en introduisant les données de température obtenues de l'analyse thermique comme charges thermiques dans l'analyse structurelle. Ces données influencent les propriétés des matériaux et induisent des contraintes thermiques. Après avoir incorporé ces éléments, la simulation est effectuée pour évaluer le comportement des poutres BAP sous l'effet combiné des charges thermiques et mécaniques.

IV.6. Validation du modèle

IV.6.1. Test de Rafi, Nadjai et al. (2007)

Pour valider le modèle EF mécanique développé, les résultats expérimentaux issus de la poutre BRS1, testée par Rafi, Nadjai [113], ont été spécifiquement choisis en raison de leur évaluation précise. Cette poutre avait une longueur totale de 2000 mm, une section rectangulaire de 120×200 mm, et était simplement appuyée sur une portée de 1750 mm. Elle était armée par deux barres longitudinales en acier haute résistance de 10 mm de diamètre disposées en traction, complétées par des armatures supérieures de 8 mm et des étriers fermés de 6 mm espacés de 100 mm. Le béton utilisé était un béton ordinaire. La résistance à la compression mesurée sur cubes à 28 jours était de 52 MPa, correspondant à une résistance cylindrique équivalente de 47 MPa pour la poutre BRS1. La Figure IV-16 présente une comparaison entre les résultats mesurés à partir des tests expérimentaux et ceux prédits. Pour s'assurer qu'il n'y avait pas de dépendance à la maille [114], la taille de la maille EF a été modifiée de 40 mm à 20 mm. Notamment, la convergence a été atteinte avec des tailles de maille inférieures à 20 mm, ce qui a donné des résultats très proches de ceux des tests expérimentaux.

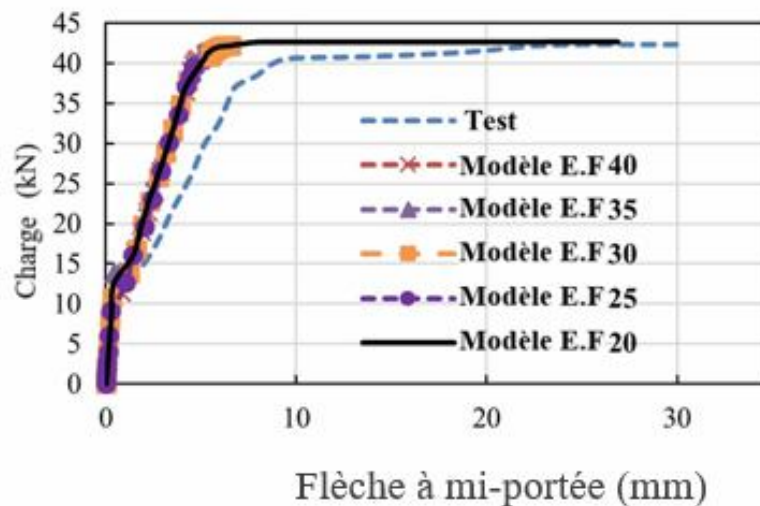
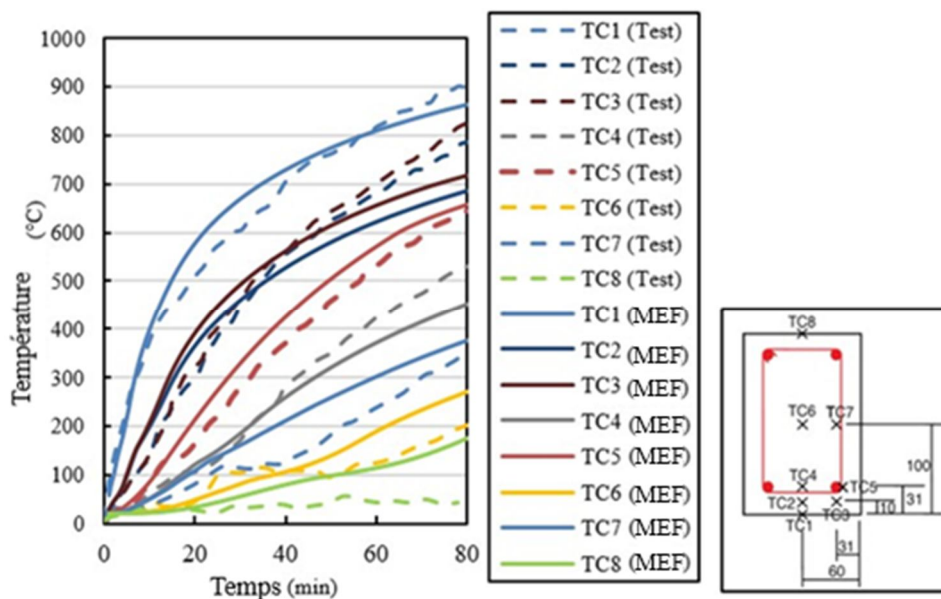


Figure IV-16 Charge vs. Flèche à mi- portée de la poutre BRS1 à température ambiante : Test de Rafi, Nadjai et al. (2007) - modèle EF avec différents maillages

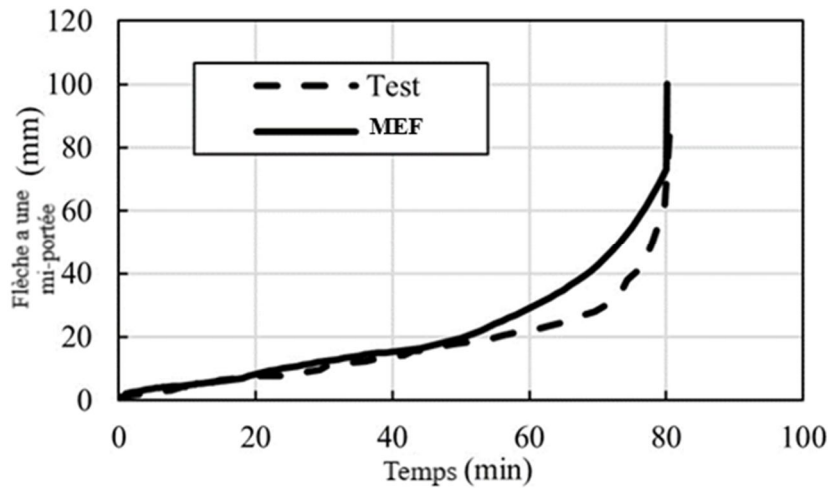
IV.6.2. Test de Rafi, Nadjai [115]

Pour vérifier l'exactitude des résultats thermiques et thermomécaniques prédits par le modèle EF, la poutre BESS20-1, testée par Rafi, Nadjai [115] a été choisie. Cette poutre avait une longueur totale de 2000 mm, une section rectangulaire de 150×250 mm, et était simplement

appuyée sur une portée de 1800 mm. Elle était renforcée par deux barres longitudinales en acier de 12 mm de diamètre en traction, complétées par deux barres de compression de 10 mm de diamètre et des étriers fermés de 8 mm espacés de 100 mm. Le béton utilisé était un béton ordinaire. La résistance à la compression mesurée sur cubes à 28 jours était de 42 MPa, correspondant à une résistance cylindrique équivalente de 38 MPa pour la poutre BESS20-1. La Figure IV-17(a) montre l'évolution de la température en fonction du temps dans différents points de la poutre où on relève un bon accord entre les résultats mesurés expérimentalement et ceux prédits, avec de petites différences attribuables à des facteurs négligés tels que le lien entre l'acier d'armature et le béton, ainsi que la teneur en humidité. La réponse structurale de la poutre, représentée par l'évolution de la flèche en fonction du temps, est montrée dans la Figure IV-17(b). Le déplacement maximal prédit correspond étroitement aux valeurs mesurées pendant le test jusqu'à 50 minutes, après quoi elle progresse légèrement plus rapidement pour atteindre le même temps de rupture et le même déplacement maximal de la poutre. Malgré cela, le temps prédit de rupture de la poutre s'aligne étroitement avec les résultats mesurés, soulignant la précision du modèle EF développé pour la prédiction de la performance de la résistance au feu des poutres en béton armé.



(a)



(b)

Figure IV-17 Comparaison des résultats prédits par EF et ceux mesurés par le test de **Rafi, Nadjai [115]**: Déplacement vs. Température, a) réponse thermique et b) réponse structurale

IV.6.3. Test de Hou, Ren et al. (2019)

Une troisième validation du modèle EF a été effectuée en se référant à la poutre désignée RPCL-1, testée par Hou, Ren [98], qui a été fabriquée en BPR avec une résistance à la compression de 127 MPa et contenait 2 % de fibres d'acier et 0,2 % de fibres de polypropylène en fraction volumique. Cette poutre a une longueur de 4900 mm, avec une portée de 4500 mm et une section transversale de 200 mm × 400 mm. Elle est renforcée par trois barres de $\phi 25$ mm avec une limite d'élasticité de 463,3 MPa en tant qu'armature de traction, et deux barres de $\phi 10$ utilisées comme armature de compression, et des étriers de renforcement au cisaillement de $\phi 8$ avec une limite d'élasticité de 415,2 MPa. L'essai de la résistance au feu de la poutre a été réalisé en la soumettant à des actions combinées de charge structurale et d'exposition au feu. Il a été appliqué une charge statique correspondant à 30 % de la capacité de charge 30 minutes avant l'exposition au feu, jusqu'à ce que la déformation se stabilise et n'augmente plus. Ensuite, la poutre a été soumise sur ses trois faces longitudinales à un feu ISO834, tout en maintenant la charge mécanique constante pendant toute la durée de l'exposition. La Figure IV-18(a) montre la comparaison entre l'évolution de la température prédite et mesurée à différents emplacements de la section transversale de la poutre. On remarque que l'évolution de la température prédite est en accord raisonnable avec les résultats expérimentaux. La comparaison entre les déplacements maximaux prédits et mesurés sous exposition au feu est représentée dans la Figure IV-18(b) où on peut conclure que les déplacements maximaux prédits sont en accord avec ceux mesurés lors des essais au feu.

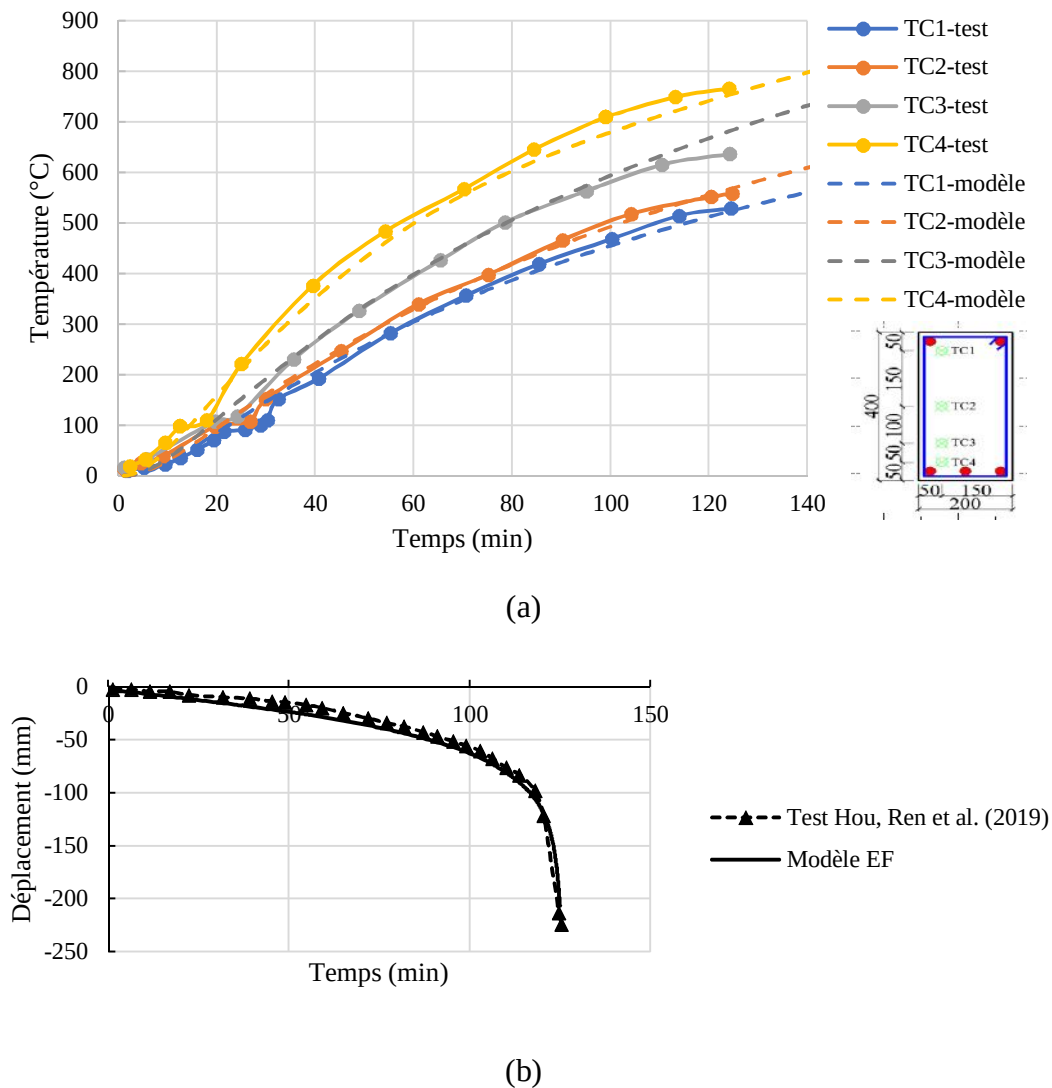


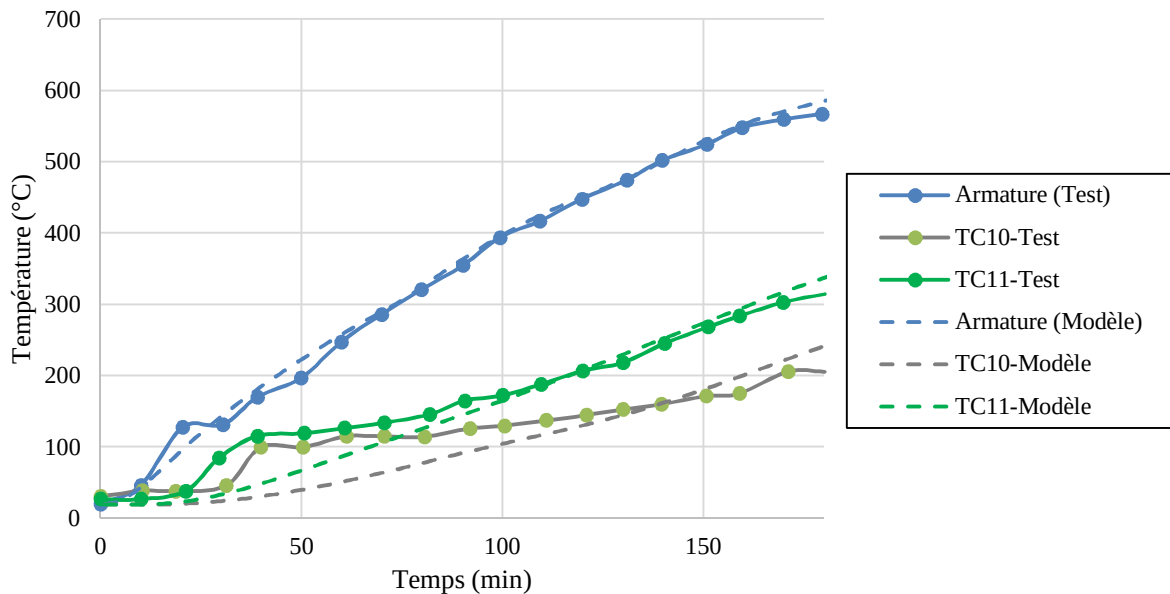
Figure IV-18 Comparaison entre les réponses prédites par EF et mesurées par le Test de Hou, Ren et al. (2019) pour RPCL-1 (a) thermique et (b) structurale

IV.6.4. Test de Dwaikat et Kodur (2009)

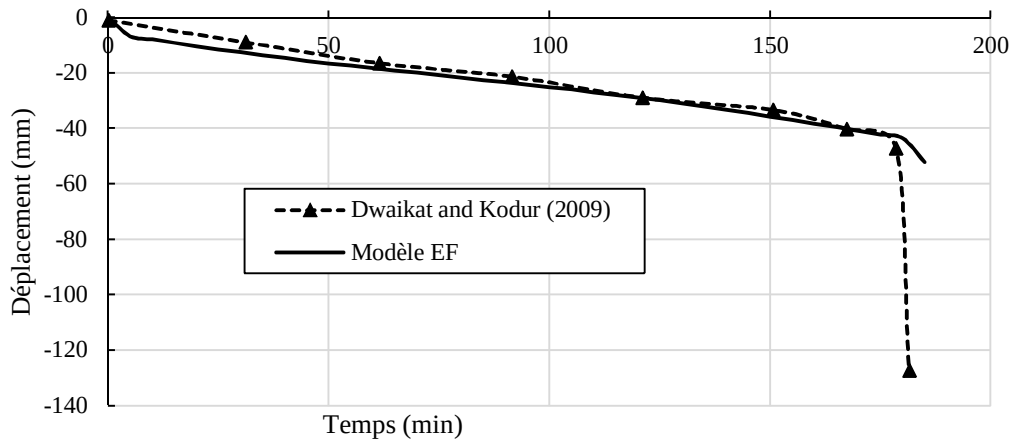
Une quatrième validation du modèle EF a été établie en comparant les résultats avec le test de Dwaikat and Kodur [92] sur une poutre en béton ordinaire (BO), désignée B1, avec une résistance à la compression de 52,2 MPa. La poutre a une longueur totale de 3969 mm et une section transversale de 406 × 254 mm. Elle est renforcée de trois barres $\phi 19$ mm de diamètre pour l'armature en traction et deux barres de $\phi 13$ mm de diamètre pour l'armature en compression, avec une limite d'élasticité spécifiée de 420 MPa. La poutre est équipée d'étriers de $\phi 6$ mm de diamètre, espacés de 150 mm sur toute la longueur, avec une limite d'élasticité spécifiée de 280 MPa.

Le test de résistance au feu a été réalisé en plaçant la poutre dans un four et en appliquant l'équivalent de 55 % de la capacité de charge comme charge statique mécanique, qui est maintenue jusqu'à ce qu'aucune augmentation supplémentaire de la déformation ne puisse être mesurée. Après 30 minutes de chargement, la poutre a été exposée au feu selon la norme ASTM E119 sur les trois côtés longitudinaux, la charge mécanique restant constante pendant toute la durée de l'exposition.

La comparaison entre l'évolution de la température prédite et mesurée à différents emplacements de la section transversale de B1 est illustrée dans la Figure IV-19 (a). On peut observer que l'évolution de la température à différents emplacements dans la section transversale, prédite par le modèle, suit avec précision celle mesurée lors des tests au feu. La Figure IV-19 (b), montre la comparaison entre le déplacement maximal prédit et mesuré sous exposition au feu pour B1 où il est à noter que le déplacement maximal prédit est en accord avec celui mesuré lors des tests.



(a)



(b)

Figure IV-19 Comparaison entre les résultats prédits et ceux mesurés lors du test de Dwaikat et Kodur (2009) : (a) résultats thermiques, (b) résultats thermomécaniques

IV.7. Conclusion

Une approche détaillée de la modélisation numérique du comportement thermomécanique des poutres en béton armé autoplaçant (BAP) soumises à des températures élevées, notamment celles résultant d'incendies, a été présentée dans ce chapitre. À travers l'utilisation du code ANSYS Mechanical Parametric Design Language (APDL), un modèle d'éléments finis a été développé et validé, permettant une analyse approfondie des effets complexes des températures sur la résistance des structures en béton armé.

La méthodologie adoptée a été soigneusement décrite, incluant des analyses mécaniques et thermomécaniques, ainsi que la sélection appropriée des éléments finis. Les propriétés des matériaux, essentielles pour la précision des simulations, ont été définies en tenant compte des comportements non linéaires du béton et de l'acier à des températures variées. Les lois de comportement utilisées, en particulier le modèle de plasticité à durcissement isotrope pour le béton, ont été validées par des études antérieures, garantissant ainsi la fiabilité des résultats obtenus.

Chapitre V. Résultats et discussion

V.1. Introduction

Les structures en béton auto-plaçant (BAP) présentent un potentiel considérable pour des applications dans des environnements exigeants, notamment en raison de leur capacité à s'auto-niveler et à atteindre une densité élevée sans la nécessité de vibration. Cependant, dans des conditions extrêmes telles que des incendies, la performance mécanique du BAP peut se dégrader, compromettant ainsi la sécurité et l'intégrité structurelle des bâtiments. Afin d'améliorer la résistance et la durabilité des poutres en BAP face à des températures élevées, l'intégration de fibres hybrides, composées de fibres de polypropylène et de fibres d'acier, a été proposée comme une solution prometteuse.

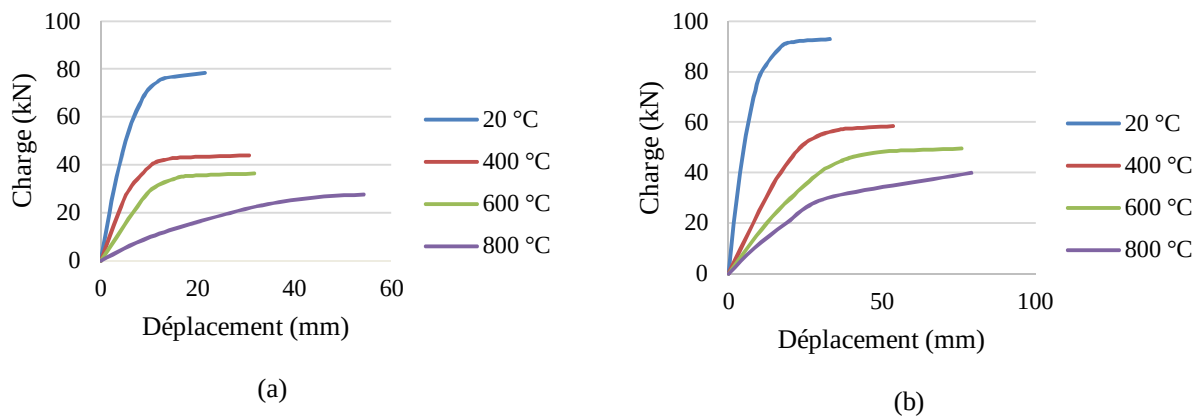
Ce chapitre se concentre sur les différents résultats et discussions de l'étude numérique approfondie visant à évaluer l'effet des fibres hybrides sur le comportement mécanique des poutres en BAP lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées. En utilisant les modèles éléments finis (EF) validés, il a été montré la performance des poutres renforcées avec différentes fractions volumiques (FV) de fibres de polypropylène et d'acier. L'objectif principal est d'analyser comment ces fibres hybrides influencent la capacité de charge ultime et la ductilité des poutres en BAP lorsqu'elles sont soumises à des conditions thermiques extrêmes.

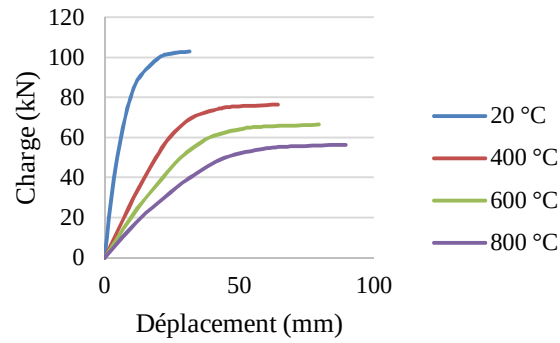
Les modèles EF validés permettent une simulation précise des poutres en BAP sous diverses conditions de température, allant de la température ambiante jusqu'à 800°C. Les résultats de cette étude visent à fournir une compréhension approfondie des avantages potentiels de l'incorporation de fibres hybrides dans le BAP, notamment en termes de réduction de la rupture prématurée et d'amélioration de la ductilité sous des charges élevées et à des températures élevées.

V.2. Influence des fibres hybrides sur le comportement mécanique des poutres en BAP à des températures élevées

V.2.1. Variation des fibres d'acier

L'analyse mécanique des poutres a été réalisée à différentes températures élevées, et les résultats de charge-déplacement maximal sont présentés dans la Figure V-1. Cette figure montre l'évolution de la charge en fonction du déplacement maximal des poutres étudiées à des températures ambiante et élevées de 400°C, 600°C et 800°C. On peut observer qu'à température ambiante (20°C), la charge ultime est de 78 MPa pour B1-0, 92 MPa pour B1-1 et 102 MPa pour B1-2, et diminue avec l'augmentation de la température. Les valeurs de cette charge ultime pour B1-0, B1-1 et B1-2 sont respectivement de 44, 58 et 76 MPa à 400°C, 36, 49 et 66 MPa à 600°C, et 27, 40 et 56 MPa à 800°C. Cette diminution est due à la détérioration de la résistance et de la rigidité à haute température. On peut noter que la charge ultime et le déplacement maximal des poutres en BAPF (B1-1 et B1-2) sont supérieurs à ceux des poutres en BAP sans fibres (B1-0) à la même température. Par conséquent, l'ajout de fibres hybrides aux poutres en BAP améliore leur ductilité à température ambiante et à haute température, tout en permettant de diminuer le taux de réduction à la fois de la résistance à la traction et du module d'élasticité. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Antonius [116], Jin, Zhang [117], Khalighi, Izadifard [118].





(c)

Figure V-1 Evolution de la charge en fonction du déplacement maximal des poutres : a) B0, b) B1, et c) B2, à différentes températures

L'étude de l'influence globale de l'incorporation des fibres hybrides, en se concentrant spécifiquement sur l'impact des fibres d'acier dans l'amélioration du comportement des poutres en BAP, a été établie en termes de taux de réduction de leur capacité de charge ultime à différentes températures élevées. Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes dans la Figure V-2. Il est à noter qu'à une température élevée de 800°C, les taux de réduction de la charge ultime atteignent respectivement 65%, 57% et 45% pour les poutres B1-0, B1-1 et B1-2. Ce taux de réduction pour les poutres en BAPF est inférieur à celui des poutres en BAP, en raison de l'effet combiné de l'ajout de fibres d'acier et de fibres hybrides qui permet d'améliorer la ductilité du béton. De plus, il est intéressant de noter que le taux de réduction pour la poutre en BAPF avec une fraction volumique (FV) de 2% de fibres d'acier est inférieur à celui de la poutre avec 1%. Cela est attribué à l'effet des fibres d'acier qui améliorent significativement la résistance à la traction du béton, ce qui est évident à différents niveaux de température. Ces résultats sont en accord avec les conclusions des études menées par Abdelrahim, Elthakeb [119], Abdulhaleem, Gülşan [120].

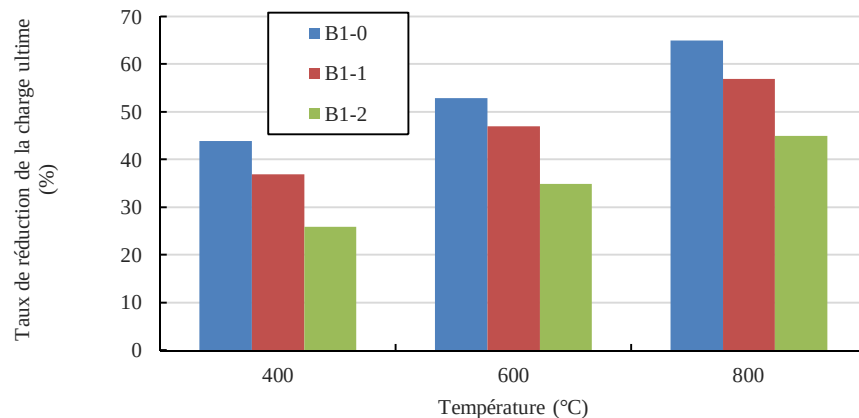


Figure V-2 Taux de réduction de la charge ultime des poutres étudiées à différentes températures

Les principales conclusions de l'analyse sont les suivantes :

L'ajout de fibres hybrides améliore considérablement la capacité de charge ultime des poutres en BAP à différents niveaux de température (20°C, 400°C, 600°C et 800°C), entraînant une augmentation de la déformation et de la ductilité. À température ambiante, l'incorporation de 0,1% de fibres de polypropylène et 1% de fibres d'acier augmente la capacité de charge ultime de 78 MPa à 92 MPa dans les poutres en BAP. De plus, l'augmentation de la fraction volumique (FV) des fibres d'acier de 1% à 2% conduit à une capacité de charge ultime de 102 MPa.

De même, à 800°C, l'introduction de 0,1% de fibres de polypropylène et 1% de fibres d'acier augmente la capacité de charge ultime de 27 MPa à 40 MPa, avec une nouvelle augmentation à 56 MPa en augmentant la FV des fibres d'acier à 2%.

L'inclusion de fibres hybrides dans les poutres en BAP s'avère efficace pour atténuer le taux de réduction de la capacité de charge ultime lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées (400°C, 600°C et 800°C). Par exemple, à 800°C, l'utilisation de 0,1% de fibres de polypropylène et 1% de fibres d'acier réduit le taux de réduction de la capacité de charge ultime de 65% à 57%, avec une diminution supplémentaire de 45% en augmentant la FV des fibres d'acier de 1% à 2%.

V.2.2. Variation des fibres polypropylène

Le comportement mécanique des poutres en béton armé autoplaçant sous l'effet des températures élevées, avec et sans fibres hybrides a été étudié via des simulations numériques par EF. La Figure V-3 présente ce comportement charge - déplacement des poutres B2-0, B2-1 et B2-2 à hautes températures. On observe que la charge ultime des poutres B2-1 et B2-2 est supérieure à celle des poutres B2-0 à différentes températures. À température ambiante, les charges ultimes des poutres B2-0, B2-1 et B2-2 sont respectivement de 57, 65 et 68 kN. À 800°C, ces charges sont de 22, 33 et 33 kN respectivement. De plus, comme le montre la Figure V-5, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la charge ultime de toutes les poutres, avec un taux de réduction plus important pour les poutres B2-0 par rapport aux poutres B2-1 et B2-2. Lorsque les poutres sont exposées à des températures de 600, 700 et 800°C, la charge ultime de la poutre B2-0 est réduite respectivement de 44, 52 et 61 %, tandis que celle de la poutre B2-1 est réduite de 31, 42 et 49 %. De même, la charge ultime de la poutre

B2-2 est réduite de manière similaire que celle de la poutre B2-1, avec des réductions de 34, 45 et 51 % aux mêmes températures. Le faible taux de réduction des poutres B2-1 et B2-2 par rapport à B2-0 est attribué à l'ajout de fibres hybrides, qui augmentent la ductilité du béton à différentes températures.

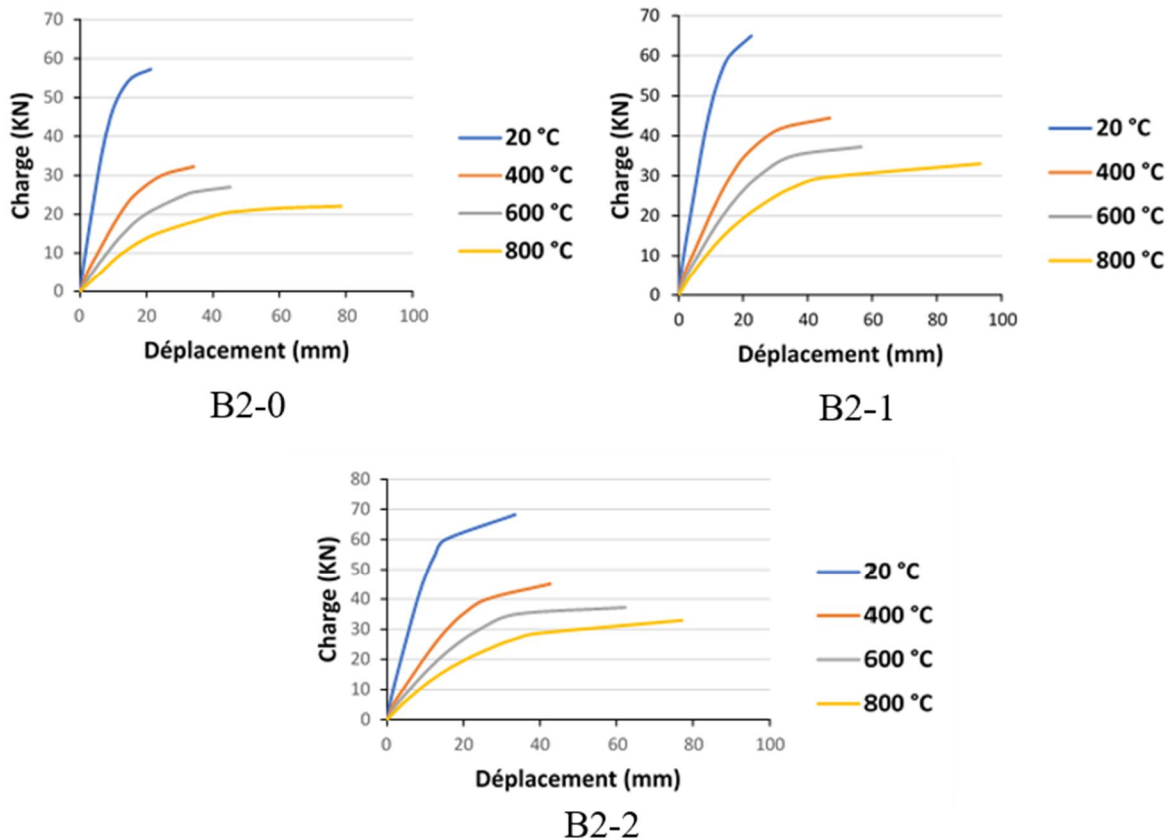


Figure V-3 Evolution de la charge en fonction du déplacement maximal des poutres du étude de cas B à différentes températures

L'analyse de cette étude de cas a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La charge ultime des poutres en bétons armé auto-plaçant avec et sans fibres hybrides diminue avec l'augmentation de la température.
- L'ajout de fibres hybrides à des poutres en béton armé auto-plaçant permet une augmentation de la charge ultime à différentes températures.
- Le taux de réduction de la charge ultime des poutres en béton armé auto-plaçant sous l'effet des températures élevées diminue avec l'ajout de fibres hybrides.
- L'augmentation de la fraction volumique des fibres polypropylène de 0.1 à 0.2 % n'a pas d'influence sur le comportement mécanique des poutres en béton armé auto-plaçant de fibres hybrides.

V.3. Effet des fibres hybrides et de l'isolation coupe-feu sur la résistance au feu des poutres

V.3.1. Comparaison entre la résistance au feu de BAP et BO

Pour mener une prédiction approfondie sur la résistance au feu des poutres en BAP, une comparaison a été faite entre une poutre en béton auto-plaçant (BAP) et une poutre en béton ordinaire (BO). L'évolution du déplacement des deux poutres, B3-1 en BAP et B3-0 en BO sous l'effet d'incendie, est présentée dans la Figure V-4. On peut observer que le déplacement maximal de la poutre B3-1 progresse plus rapidement que celui de la poutre B3-0. Le temps de résistance au feu de la poutre B3-1 est de 72 minutes, soit 8 % de moins que celui de la poutre B3-0. Cette différence peut être attribuée à la détérioration rapide des propriétés mécaniques du BAP par rapport au BO à des températures élevées, en raison de sa conductivité thermique plus élevée, ce qui entraîne un transfert de chaleur plus rapide dans l'armature et le béton, comme le montre la Figure V-5. Cela conduit à une diminution plus rapide de la résistance et de la rigidité des poutres en BAP.

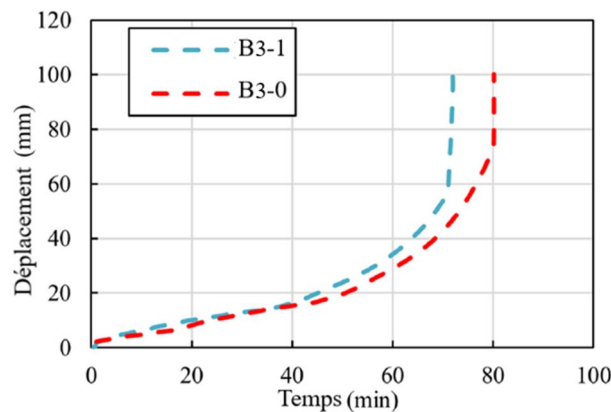


Figure V-4 Évolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres BO et BAP

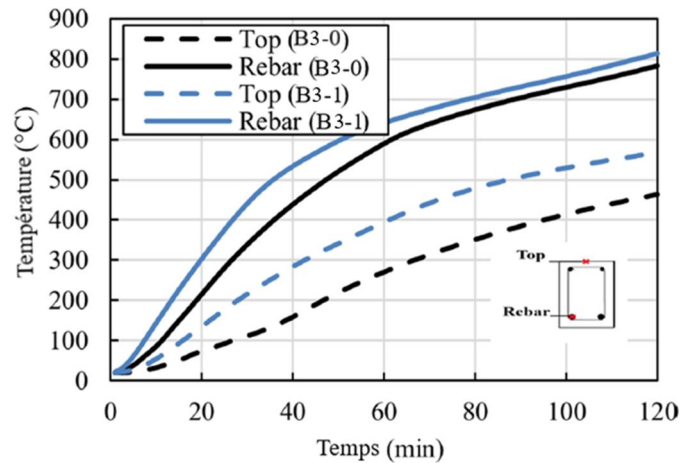


Figure V-5 Évolution de la température en fonction du temps dans les armatures et le sommet des poutres BO et BAP

V.3.2. Effet des fibres hybrides

Les résultats de l'étude ont révélé que l'ajout de fibres hybrides a un impact très significatif sur la performance de résistance au feu des poutres en béton autoplaçant (BAP) étudiées. La Figure V-6 montre que le déplacement de la poutre B3-2 avec des fibres hybrides progresse plus lentement par rapport à la poutre B3-1 sans fibres, avec une amélioration de la résistance au feu de 17% et un temps limite de 84 minutes. Cela est dû à l'effet combiné sur le BAP, où les fibres de polypropylène ralentissent la détérioration de la résistance et du module d'élasticité à des températures élevées, tandis que les fibres d'acier améliorent la contrainte de traction à différents niveaux de température. La Figure V-7 illustre la distribution de la déformation dans les barres d'armature en traction pour les deux poutres B3-1 et B3-2 à 72 minutes (le temps de rupture de B3-1). Cette figure révèle que les barres d'armature en traction dans la poutre B3-2 ont subi une déformation nettement moindre. Cette observation suggère que le BAPF a démontré une plus grande résistance à la contrainte de traction par rapport au BAP.

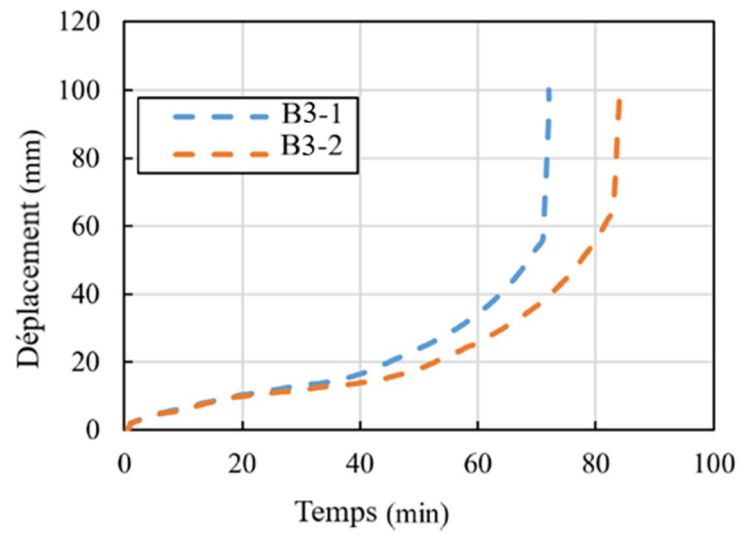
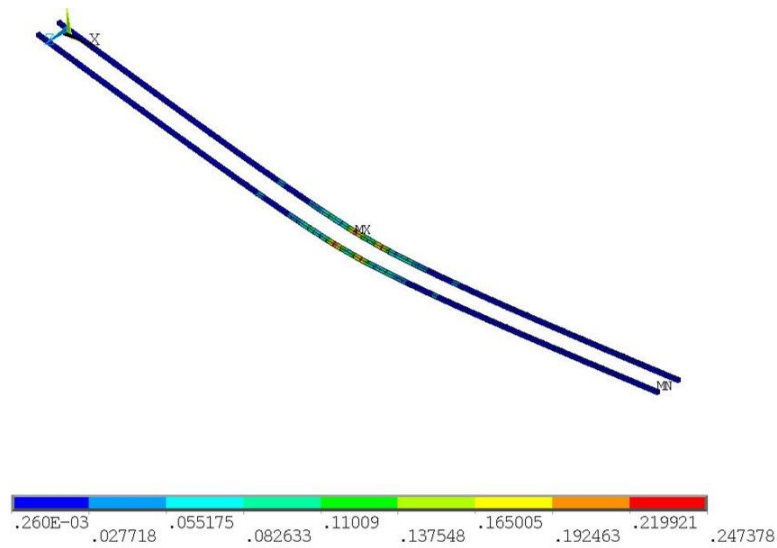
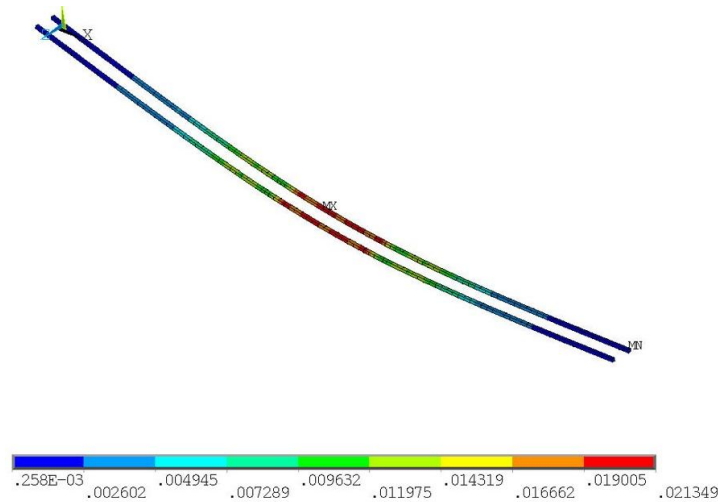


Figure V-6 Effet des fibres hybrides sur le déplacement maximal des poutres BAP du étude de cas C sous les conditions d'incendie



(a)



(b)

Figure V-7 Distribution de la déformation des barres d'armature en traction à 72 minutes d'exposition au feu (a) B3-1 et (b) B3-2

V.3.3. Effet de l'isolation coupe-feu

L'effet de l'isolation coupe-feu sur la performance de résistance au feu des poutres en béton autoplaçant (BAP) a été évalué en comparant différentes poutres, comme le montre la Figure V-8. Les poutres avec isolation coupe-feu ont montré une progression plus lente de déplacement maximal et une durée de résistance au feu plus longue. Ce comportement est attribué à la faible conductivité thermique de l'isolation, qui réduit les taux de chauffage à la surface de la poutre, comme illustré à la Figure V-9. Par conséquent, la pénétration de la température à travers la section transversale des poutres diminue, ralentissant ainsi efficacement la détérioration de la résistance et de la rigidité des poutres isolées. La poutre B3-5, qui utilisait l'isolation contre le feu Carboline Type-5MD, a montré une résistance au feu de 92 minutes, tandis que les poutres B3-3 et B3-4, avec les isolations contre le feu Tyfo WR-AFP et CAFCO 300 respectivement, ont atteint une résistance au feu de 82 minutes. Cette différence de temps de résistance au feu entre les poutres est due à la faible conductivité thermique des isolations. L'utilisation de l'isolation contre le feu Carboline Type-5MD sur les poutres en BAP améliore leur résistance au feu de 28 %. La poutre B3-6 a atteint le temps de résistance au feu le plus long, avec 103 minutes, soit 43 % de plus que la poutre B3-1, bénéficiant de l'effet combiné des fibres hybrides et de l'isolation coupe-feu.

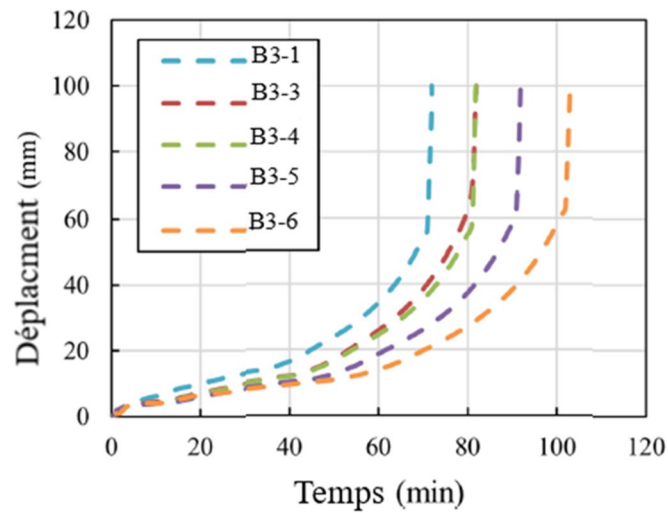


Figure V-8 Effet de l'isolation coupe-feu sur le déplacement maximal des poutres BAP sous conditions d'incendie

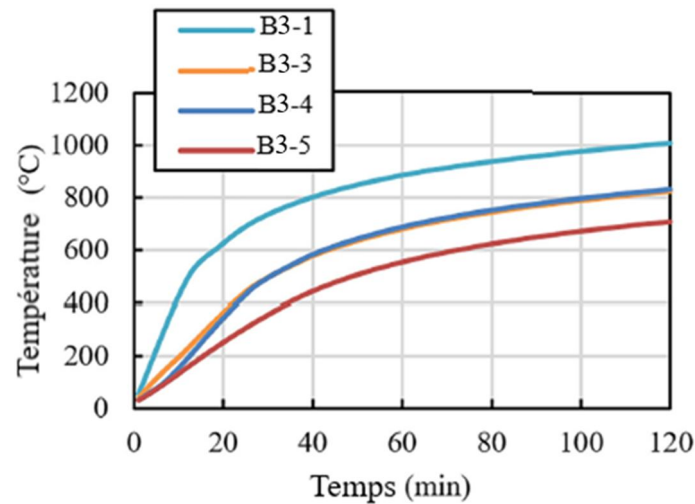


Figure V-9 Évolution de la température en fonction du temps au bas des poutres de cas d'étude C

V.4. Influence des différents paramètres sur la résistance au feu des poutres en BAP

V.4.1. Effet de l'enrobage

L'évolution de la charge en fonction du déplacement à température ambiante des poutres BAPF est montrée dans la Figure V-10. On peut observer que les valeurs du déplacement maximal des poutres B4-1, B4-2 et B-3 sont de 28,20 ; 46,74 et 45,09 mm, avec une charge ultime de 110 ; 162,5 et 178,26 kN respectivement. La charge ultime des poutres BAPF augmente de 62 % lorsqu'on passe d'un enrobage de 15 à 25 mm.

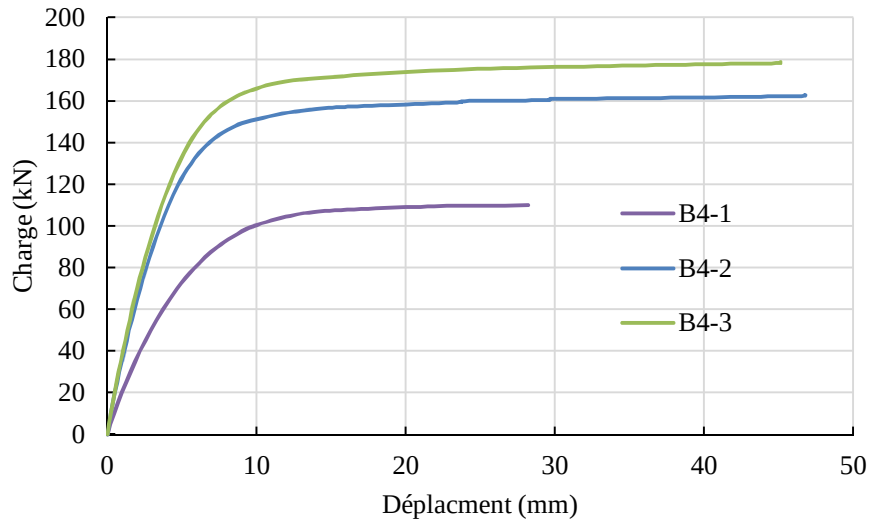


Figure V-10 Charge-Déplacement maximal à température ambiante des poutres BAPF

La Figure V-11 montre la variation du déplacement en fonction du temps d'exposition au feu des poutres B4-1, B4-2 et B4-3, qui ont atteint respectivement des valeurs de 94,05 ; 99,34 et 122 mm. On peut noter que le temps de résistance au feu des poutres B4-1, B4-2 et B4-3 est de 44, 60 et 64 minutes respectivement. Lorsque l'enrobage augmente de 15 à 25 mm, le temps de résistance au feu des poutres BAPF augmente de 45 %. Cela est principalement dû à une augmentation plus lente de la température des barres d'armature provoquée par l'enrobage accru, ce qui entraîne une détérioration plus lente de la résistance et de la rigidité des poutres BAPF et, par conséquent, une meilleure résistance au feu.

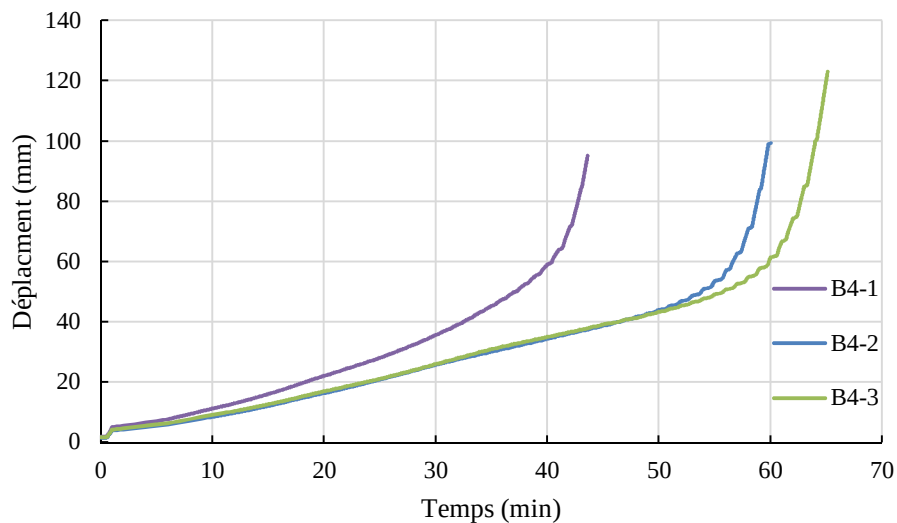


Figure V-11 Évolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres BAPF

Les conclusions suivantes ont été tirées :

- À température ambiante, l'augmentation de l'enrobage de 15 à 25 mm des poutres en béton autoplaçant renforcé de fibres hybrides entraîne une augmentation de la charge ultime.
- Le déplacement maximal et le temps de résistance au feu des poutres en béton autoplaçant renforcé de fibres hybrides augmentent avec l'augmentation de l'enrobage.
- La variation de l'enrobage des poutres en béton autoplaçant renforcé de fibres hybrides de 15 à 25 mm conduit à une amélioration de leur résistance au feu de 45 %.

V.4.2. Effet de la section transversale

Le comportement mécanique, à température ambiante, des poutres étudiées numériquement en termes de charge-déplacement est montré dans la Figure V-12. On peut remarquer, que les valeurs atteintes du déplacement maximal des poutres B5-1, B5-2 et B5-3 sont 19.81 ; 19.83 et 30.26 mm, respectivement avec des charges ultimes respectives de 75 ; 110 et 155 kN. La charge ultime des poutres BAPH croît linéairement avec leur section transversale avec une faible augmentation du déplacement maximal.

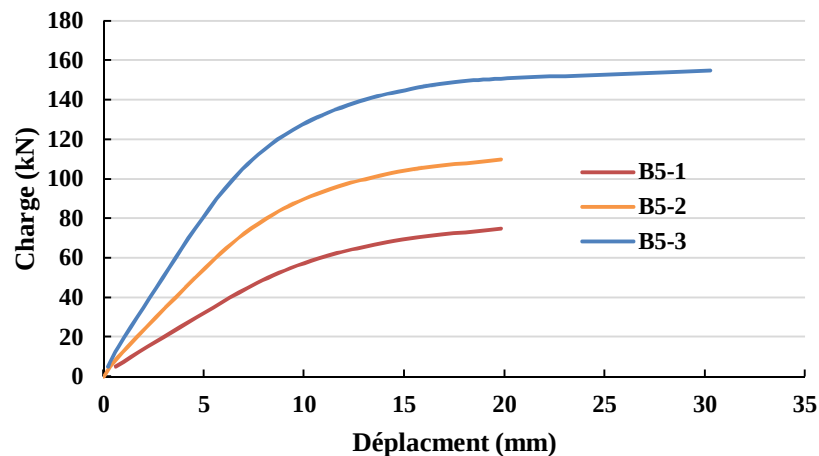


Figure V-12 Comportement à la flexion des poutres de cas d'étude E à 20°C

La Figure V-13 illustre l'évolution du déplacement en fonction du temps d'exposition au feu pour les poutres B5-1, B5-2 et B5-3 en observant une durée de résistance au feu respective de 42, 63 et 109 minutes. L'augmentation de la section transversale des BAPH a permis une amélioration de la résistance au feu, due à la diminution du taux de détérioration des propriétés mécaniques (dureté et résistance) causée par la capacité du béton à absorber la chaleur.

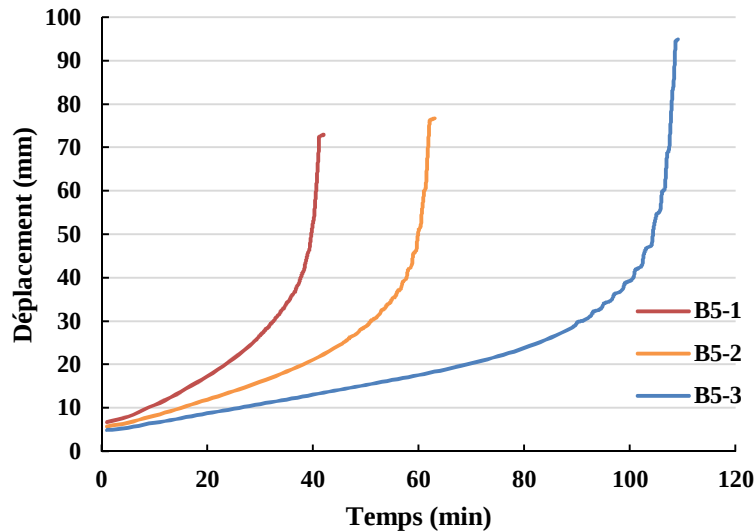


Figure V-13 Evolution du déplacement maximal en fonction de temps d'exposition au feu des poutres du cas d'étude E

L'étude de cas e E a permis de tirer les conclusions suivantes :

- La charge ultime et le déplacement maximal des poutres en béton armé auto-plaçant renforcé par des fibres hybrides augmentent avec l'augmentation de la section transversale.
- L'augmentation de la section transversale améliore le comportement à la flexion des poutres en béton armé auto-plaçant de fibres hybrides.
- Une augmentation de la durée de la résistance au feu des poutres de béton armé autoplaçant de fibres hybrides a été observée avec l'accroissement de la section transversale.

V.4.3. Effet de la variation de la longueur

L'effet de la variation de la longueur des poutres en BAPF a été étudié en les analysant avec des longueurs de 3000, 3200, 3400, 3600, 3800 et 4000 mm. La variation de la longueur des poutres en BAPF n'affecte pas l'évolution de la température dans la section transversale, mais son effet est plutôt évident sur la réponse structurelle. La Figure V-14 montre l'évolution du déplacement en fonction du temps d'exposition au feu avec la variation de la longueur. On peut constater que plus la portée est grande plus la progression de la flèche est rapide. Cela est dû à la faible rigidité en flexion. Après 50 minutes, la flèche à mi- portée se chevauche, pour atteindre finalement un temps de résistance au feu équivalent. L'augmentation de la portée n'a pas affecté le temps de résistance au feu. Cela est dû au fait que l'augmentation de la longueur n'affecte pas la distribution thermique dans la section transversale.

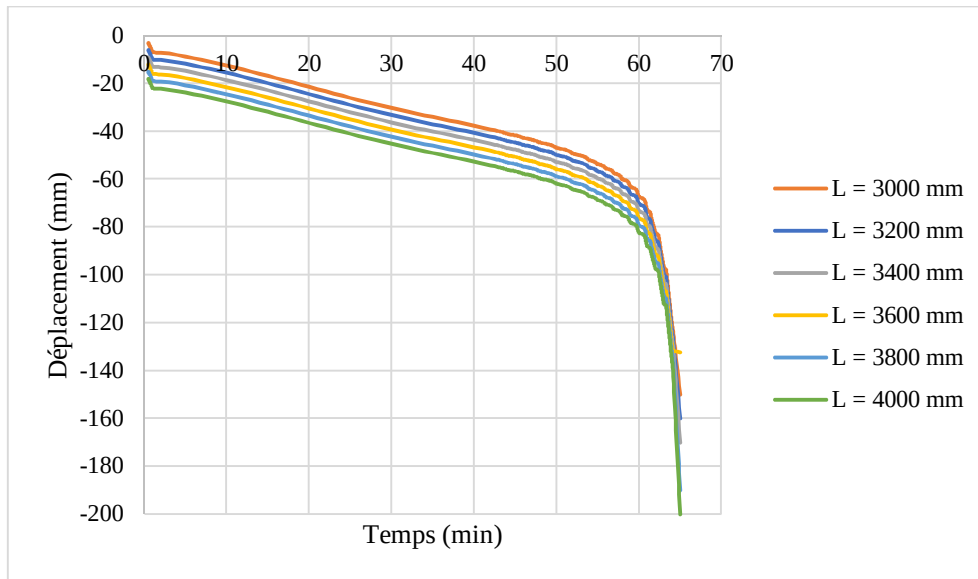


Figure V-14 Evolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu des poutres en BAPF avec variation de la longueur

V.4.4. Effet de la variation de ratio de charge

Les poutres en BAPF ont été analysées avec l'application de 40 %, 35 % et 30 % de la charge ultime pour étudier l'effet du ratio de charge sur le comportement de la poutre en BAPF sous des conditions de feu. L'effet du ratio de charge se manifeste uniquement dans la réponse structurelle des poutres en BAPF, car il est appliqué lors de la deuxième étape de l'analyse. La Figure V-15 montre l'évolution du déplacement en fonction du temps d'exposition au feu avec la variation du ratio de charge. On peut constater qu'un faible ratio de charge ralentit la progression du déplacement maximal des poutres en BAPF et prolonge leur temps de résistance au feu. Avec l'application de 35 % de la capacité de charge, la résistance au feu a augmenté de 61 %, tandis qu'aucune rupture ne s'est produite pendant 180 minutes pour la poutre avec 30 % de la capacité de charge appliquée. Cela est principalement dû au fait qu'un ratio de charge réduit retardera la plastification des barres d'armature, ce qui entraîne une augmentation plus lente de leurs déformations mécaniques. Cela conduit à une détérioration plus lente de la rigidité de la poutre.

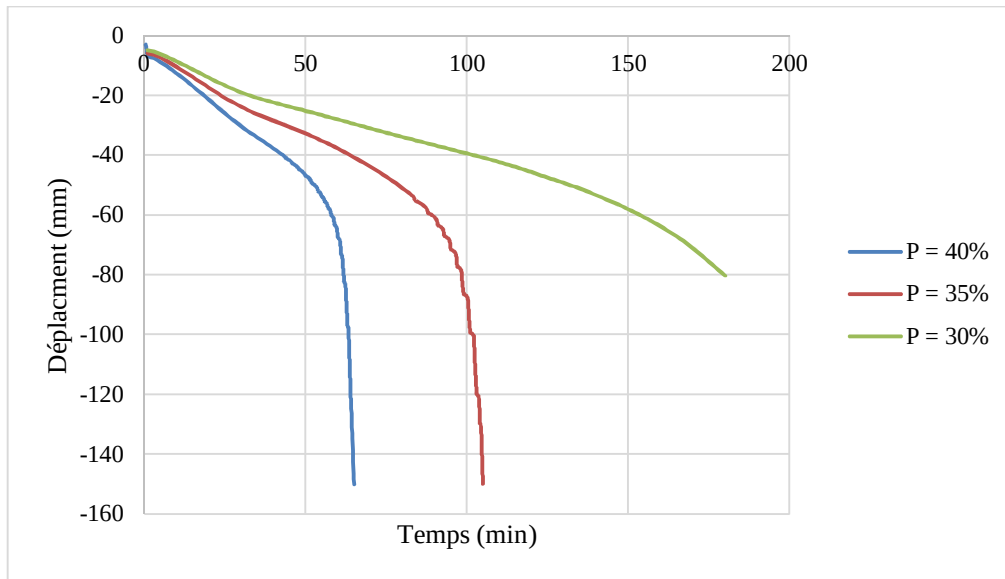


Figure V-15 Evolution du déplacement maximal en fonction du temps d'exposition au feu de la poutre en BAPF avec variation du rapport de charge

V.5. Conclusion

D'après les résultats de l'étude numérique sur la performance de résistance au feu des poutres en béton autoplaçant (BAP) et l'évaluation de l'effet de l'ajout de fibres hybrides et d'une isolation contre le feu pour améliorer leur performance, les conclusions suivantes ont été tirées :

- L'ajout de fibres hybrides aux poutres en BAP augmente leur performance de résistance au feu de 17 %.
- La poutre en BAP isolée avec Carbolite Type-5MD a montré une durée de résistance au feu de 12 % plus longue que les poutres en BAP avec les isolations Tyfo WR-AFP et CAFCO 300, et 28 % plus longue que la poutre en BAP non isolée.
- L'utilisation combinée de fibres hybrides et d'une isolation coupe-feu sur le dessous des poutres en BAP a amélioré leur résistance au feu de 43 %.
- L'augmentation de l'enrobage de 15 à 25 mm améliore significativement la résistance mécanique à température ambiante (+62 % de charge ultime) et la résistance au feu (+45 % de temps de résistance).
- Une section plus importante entraîne une augmentation quasi linéaire de la charge ultime et du temps de résistance au feu.
- L'augmentation de la portée réduit la rigidité et accélère la progression de la flèche sous feu, mais n'influence pas le temps total de résistance au feu.

- Une réduction du rapport charge appliquée/charge ultime ralentit la déformation et prolonge la résistance au feu. À 35 % de la charge ultime, la durée de résistance augmente de 61 %, et à 30 %, aucune rupture n'a été observée après 180 minutes.

Ces résultats des cas d'études, représentant avec précision la résistance au feu pour évaluer l'ajout de fibres hybrides et d'une isolation coupe-feu, permettent d'améliorer la performance des poutres en BAP sous des conditions d'incendie. Les modèles numériques avancés utilisés fourniront, par le biais d'analyses paramétriques supplémentaires, de nouvelles directives de conception pour simplifier le calcul de la résistance au feu des poutres en BAP.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Cette recherche a permis de réaliser une étude numérique approfondie sur la performance en résistance au feu des poutres en béton armé auto-plaçant (BAP). Elle a été complétée par une analyse paramétrique visant à explorer l'impact des fibres hybrides et de l'isolation coupe-feu sur l'amélioration de leur comportement en conditions d'incendie. L'influence de divers paramètres, tels que l'enrobage, la section transversale, la longueur et le ratio de charge, a également été examinée.

Des modèles par éléments finis (EF) bien calibrés ont été développés, permettant d'évaluer avec précision la résistance au feu des poutres en BAP. Ces modèles ont permis d'analyser l'effet de l'ajout de fibres hybrides et de l'isolation thermique sur l'amélioration de leur performance en conditions d'incendie. Grâce à ces modèles numériques avancés, une analyse paramétrique supplémentaire pourrait conduire à l'élaboration de nouvelles règles de conception, facilitant ainsi le calcul de la résistance au feu des poutres en BAP.

À la lumière des résultats obtenus au cours de cette investigation numérique, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. **Incorporation de Fibres Hybrides** : L'ajout de fibres hybrides entraîne une augmentation significative de la capacité de charge ultime des poutres en BAP, tout en réduisant le taux de dégradation à des températures élevées. À 800 °C, l'ajout de 0,1 % de fibres de polypropylène et de 1 % de fibres d'acier réduit la perte de capacité de charge ultime de 65 % à 57 %. De plus, en augmentant la proportion de fibres d'acier de 1 % à 2 %, cette réduction diminue encore, atteignant 45 %. En revanche, l'augmentation de la fraction volumique de fibres de polypropylène de 0,1 % à 0,2 % n'affecte pas le comportement mécanique des poutres en conditions de haute température.
2. **Amélioration de la Résistance au Feu** : Les poutres en BAP renforcées par des fibres hybrides présentent une amélioration de 17 % de la résistance au feu par rapport aux poutres sans fibres. L'association de fibres hybrides avec une isolation coupe-feu permet d'augmenter la durée de résistance au feu de 43 %.
3. **Impact de l'Enrobage** : La variation de l'enrobage des poutres en béton auto-plaçant renforcées de fibres hybrides contribue significativement à leur résistance au feu.

L'étude montre qu'une augmentation de l'enrobage de 15 à 25 mm entraîne une amélioration de 45 % de la résistance au feu.

4. **Influence de la Section Transversale** : L'accroissement de la section transversale se traduit par une prolongation de la durée de résistance au feu.
5. **Longueur des Poutres** : Il est à noter que l'augmentation de la longueur des poutres n'affecte pas leur résistance au feu, car cette variable ne modifie pas la distribution thermique au sein de la section transversale.
6. **Ratio de Charge** : Une réduction du ratio de charge retarde la plastification des barres d'armature et la rupture du béton, entraînant une progression plus lente des déformations mécaniques. Cela améliore ainsi la résistance au feu des poutres en BAP.

En somme, cette recherche souligne l'importance d'intégrer des matériaux innovants, tels que les fibres hybrides et l'isolation coupe-feu, dans le design des poutres en béton armé auto-plaçant.

Perspectives

Les résultats de ce travail ouvrent plusieurs pistes de recherche qui méritent d'être approfondies dans le cadre de futures investigations. D'une part, il serait pertinent d'élargir l'étude à d'autres combinaisons de matériaux innovants (bétons fibrés ultra-hautes performances, bétons écologiques à base de liants alternatifs, composites cimentaires renforcés) afin d'évaluer leur performance en conditions d'incendie et leur contribution à la durabilité et à la résilience des structures. De plus, l'intégration de techniques de fabrication avancées, telles que l'impression 3D du béton, pourrait permettre de concevoir des géométries optimisées et de nouvelles solutions structurelles capables d'améliorer la résistance au feu. Sur le plan numérique, le développement de modèles éléments finis encore plus sophistiqués, intégrant le couplage thermo-hydro-mécanique-chimique (THMC) et les phénomènes d'éclatement, permettrait d'obtenir une représentation plus réaliste du comportement des structures exposées au feu. Ces modèles pourraient être complétés par une approche de type intelligence artificielle (IA) ou l'apprentissage automatique (machine learning), afin de proposer des lois prédictives fiables de la résistance au feu en fonction de paramètres clés tels que l'enrobage, la section transversale, le rapport de charge et la nature des fibres utilisées. Par ailleurs, la réalisation d'essais expérimentaux à grande échelle reste une étape essentielle pour valider les simulations numériques et capter les phénomènes complexes observés en conditions réelles, notamment la

fissuration, la délamination et les déformations différées. Une approche combinée expérimental-numérique permettrait ainsi d'améliorer significativement la robustesse des modèles prédictifs. Enfin, dans une perspective plus globale, il serait intéressant d'évaluer l'impact environnemental et économique des solutions proposées, en intégrant des analyses de cycle de vie (ACV) et des critères de durabilité. Une telle démarche contribuerait à promouvoir des pratiques de construction plus sûres, plus durables et plus résilientes face aux défis contemporains, en ligne avec les objectifs internationaux en matière de transition écologique et de résilience des territoires.

Références bibliographiques

1. Ladepeche. *Gigantesque incendie hôtel à Dubaï avant les célébrations du Nouvel An* %J La Dépêche. 2015; Available from: <https://www.ladepeche.fr/article/2015/12/31/2247897-gigantesque-incendie-hotel-dubai-avant-celebrations-nouvel-an.html>.
2. CTIF, *L'incendie de la tour Grenfell en 2017*, C.T.I.d.p.e.d.e.d. Feu), Editor 2017.
3. Algérie, H. *El-Oued: Incendie au service néonatal de l'EHS Mère-Enfant "Bachir Bennacer"*. 2019 January, 2025; Available from: <https://www.24hdz.dz/el-oued-incendie-mere-enfant/>.
4. Assaf, C., *Comment la condamnation d'une société danoise jette une nouvelle lumière sur l'enquête*. 2022.
5. Babrauskas, V. *Structural fire protection: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78*. Edited by T. T. Lie. American Society of Civil Engineers, New York, August 1992, 241 pp. ISBN 0-87262-888-4. Laminated paper over boards. Price: US\$56.00. 1993.
6. ACI216.1, *Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*, ed. Aci. 2014, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute. 48.
7. Baroghel-Bouny, V. and al., *Durabilité des bétons et des ouvrages en béton – Bases scientifiques et recommandations de mise en œuvre*. 2014, Paris, France: Presses de l'ENPC.
8. EN_1992-1-2., *Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2: General Rules Structural Fire Design*. Brussels: CEN-European Committee for Standardization., 2004.
9. Buchanan, A.H. and A.K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*, ed. nd. 2017, Chichester, UK: Wiley. 437.
10. Gann, R.G., J.D. Averill, E. Johnsson, and W.W. Jones, *Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire*, 2010, National Institute of Standards and Technology (NIST): Gaithersburg, MD.
11. Blomqvist, P. and M.J.F.t. Simonson-McNamee, *Large-scale generation and characterisation of fire effluents*, 2010, Woodhead Publishing Ltd, London. p. 461-514.
12. Bezerra, A.C.S., P.S. Maciel, E.C.S. Corrêa, P.R.R. Soares Junior, M.T.P. Aguilar, and P.R. Cetlin, *Effect of High Temperature on the Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete*. 2019. 7(12): p. 100.
13. OCDE, *Resilience to Major Fire Disasters: Economic and Social Perspectives*. 2017, Paris: OECD Publishing.
14. Pfefferbaum, B., C.S. North, and B.W. Flynn, *Disaster Mental Health Services: A Guidebook for Clinicians and Administrators*. 2013, New York: Routledge.
15. Bisby, L.J.S.E., *Structural fire safety when responding to the climate emergency*. 2021. 99(2): p. 26-27.
16. Archambault, L.T.G.J.N.é., *sécurité incendie Collection Mémentos acier*. 2005.
17. Denoël, J.-F., *Sécurité incendie et constructions en béton*. 2007: FEBELCEM.
18. Harmathy, T., *A new look at compartment fires, part I*. J Fire technology, 1972. 8: p. 196-217.

19. CEN, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire*, ed. st. 2002, Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
20. Buchanan, A.H. and A.K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*. 2017, Chichester: Wiley.
21. Khoury, G.A.J.P.i.s.e. and materials, *Effect of fire on concrete and concrete structures*. 2000. **2**(4): p. 429-447.
22. Bazant, Z.P., *Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete*. 1997.
23. CEN, *Eurocode 5: Design of timber structures - part 1–2: General rules - structural fire design*, 2004, Comité Européen de Normalisation: Brussels.
24. ISO834, *Fire-resistance tests – Elements of building construction (ISO 834)*. 1999, Geneva: ISO.
25. NFPA, *NFPA 5000: Building Construction and Safety Code*. 2018, Quincy, MA: National Fire Protection Association.
26. Wróblewska, J. and R. Kowalski, *Assessing concrete strength in fire-damaged structures*. *Construction and Building Materials*, 2020. **254**: p. 119122.
27. Ni, S. and T.J.E.S. Gernay, *Predicting residual deformations in a reinforced concrete building structure after a fire event*. 2020. **202**: p. 109853.
28. Ryu, E., Y. Shin, and H. Kim, *Effect of Loading and Beam Sizes on the Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Under and After Fire*. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018. **12**(1): p. 54.
29. Kodur, V.J.I.S.R.N., *Properties of concrete at elevated temperatures*. 2014. **2014**(1): p. 468510.
30. Kordina, K.R., *Design Concrete Buildings for Fire Resistance*. 2010. 1-36.
31. Bamonte, P. and P. Gambarova, *Properties of Concrete Subjected to Extreme Thermal Conditions*. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2014. **5**(1): p. 47-62.
32. Kodur, V.K.R. and A. Agrawal, *An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire*. *Engineering Structures*, 2016. **110**: p. 293-306.
33. Agrawal, A. and V.K.R. Kodur, *A Novel Experimental Approach for Evaluating Residual Capacity of Fire Damaged Concrete Members*. *Fire Technology*, 2020. **56**(2): p. 715-735.
34. Qin, D., P. Gao, F. Aslam, M. Sufian, and H. Alabduljabbar, *A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures*. *Case Studies in Construction Materials*, 2022. **16**: p. e00843.
35. Knyziak, P., R. Kowalski, and J.R. Krentowski, *Fire damage of RC slab structure of a shopping center*. *Engineering Failure Analysis*, 2019. **97**: p. 53-60.
36. Felicetti, R. *Assessment of fire damage in concrete structures: new inspection tools and combined interpretation of results*. in *Proceedings International Conference “Structures in Fire”-SIF14*. 2014.
37. Huang, Z., *The behaviour of reinforced concrete slabs in fire*. *Fire Safety Journal*, 2010. **45**(5): p. 271-282.
38. Cho, H.-C., D.H. Lee, H. Ju, H.-C. Park, H.-Y. Kim, and K.S. Kim, *Fire Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures Using Fuzzy Theory*. 2017. **7**(5): p. 518.
39. El-Gohary, M.A. and A.A.A.J.P.d.M. Moneim, *The environmental factors affecting the archaeological buildings in Egypt," II Deterioration by severe human activities"*. 2021. **90**(2).

40. Malone, C., J. Zhu, J. Hu, A. Snyder, and E. Giannini, *Evaluation of alkali-silica reaction damage in concrete using linear and nonlinear resonance techniques*. Construction and Building Materials, 2021. **303**: p. 124538.
41. Flores Sasso, V., E. Prieto Vicioso, and J.M. García de Miguel, *Physico-chemical analysis of historic concrete structures in the Caribbean*, 2020, RE-HABEND.
42. Salvatici, T., S. Calandra, I. Centauro, E. Pecchioni, E. Intrieri, and C.A. Garzonio, *Monitoring and Evaluation of Sandstone Decay Adopting Non-Destructive Techniques: On-Site Application on Building Stones*. 2020. **3**(4): p. 1287-1301.
43. Song, Y., Z. Huang, C. Shen, H. Shi, D.A.J.C. Lange, and C. Research, *Deep learning-based automated image segmentation for concrete petrographic analysis*. 2020. **135**: p. 106118.
44. Ingham, J.P., *Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures*. Materials Characterization, 2009. **60**(7): p. 700-709.
45. Georgali, B. and P.E. Tsakiridis, *Microstructure of fire-damaged concrete. A case study*. Cement and Concrete Composites, 2005. **27**(2): p. 255-259.
46. Nimlyat, P.S., A.U. Audu, E.O. Ola-Adisa, and D. Gwatau, *An evaluation of fire safety measures in high-rise buildings in Nigeria*. Sustainable Cities and Society, 2017. **35**: p. 774-785.
47. Khoury, G., *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*. Magazine of concrete Research, 1992. **44**(161): p. 291-309.
48. Castellote, M., C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, and J. Campo, *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction*. Cement and concrete research, 2004. **34**(9): p. 1633-1644.
49. Caetano, H., G. Ferreira, J.P.C. Rodrigues, and P. Pimienta, *Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes*. Construction and Building Materials, 2019. **199**: p. 717-736.
50. Alarcon-Ruiz, L., G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlacher, *The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste*. Cement and concrete research, 2005. **35**(3): p. 609-613.
51. Noumowe, A. and P. Clastres, *Effet de hautes températures (20-600°C) sur le béton: cas particulier du béton à hautes performances*, 1995, INSA, Lyon. p. 232.
52. Lu, D., Z. Tang, L. Zhang, J. Zhou, Y. Gong, Y. Tian, and J. Zhong, *Effects of Combined Usage of Supplementary Cementitious Materials on the Thermal Properties and Microstructure of High-Performance Concrete at High Temperatures*. Materials, 2020. **13**(8): p. 1833.
53. Schneider, U., U. Diederichs, and C. Ehm, *Effect of temperature on steel and concrete for PCRV's*. Nuclear engineering and design, 1982. **67**(2): p. 245-258.
54. Alonso, C. and L. Fernandez, *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*. Journal of materials science, 2004. **39**(9): p. 3015-3024.
55. Kodur, V.K.R. and M.A. Sultan, *Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire*. Archives des publications du CNRC, 1998.
56. Khoury, G., Y. Anderberg, K. Both, J. Fellingner, N. Hoj, and C. Majorana, *Fire design of concrete structures-materials, structures and modelling*. State-of-art report, Fib Bulletin, 2007. **38**.
57. Xing, Z., A.-L. Beaucour, R. Hebert, A. Noumowe, and B. Ledesert, *Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature*. Cement and concrete research, 2011. **41**(4): p. 392-402.

58. Fourier, J.B.J., *Théorie analytique de la chaleur*. 2009: Cambridge University Press. 674.
59. Hager, I., *Comportement à haute température des bétons à haute performance: évolution des principales propriétés mécaniques*, 2004, Marne-la-vallée, ENPC.
60. Menou, A., *Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température.: Approche multi échelles de l'endommagement thermique*, 2004, Pau.
61. Piasta, J., *Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste*. Materials and Structures, 1984. **17**(6): p. 415-420.
62. Kodur, V., *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. ISRN Civil Engineering, 2014. **2014**: p. 468510.
63. al Nahhas, F., *Comportement thermo-mécanique des murs en maçonnerie de blocs creux en béton sous l'action d'un feu conventionnel*, 2004, Marne-la-Vallée.
64. Khoury, G.A., B.N. Grainger, and P.J. Sullivan, *Strain of concrete during first heating to 600 C under load*. Magazine of concrete Research, 1985. **37**(133): p. 195-215.
65. Yermak, N. *Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres*. 2015.
66. Pliya, P., *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*. Cergy: Thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, 2010.
67. Mindeguia, J.-C., *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*, in *Ecole doctorale des sciences exactes et de leurs applications* 2009, Université de Pau et des Pays de l'Adour. p. 235.
68. Haniche, R., *Contribution à l'étude des bétons portés en température/Evolution des propriétés de transfert: Etude de l'éclatement*, 2011, Lyon, INSA.
69. Zhou, J., D. Lu, Y. Yang, Y. Gong, X. Ma, B. Yu, and B. Yan, *Physical and Mechanical Properties of HighStrength Concrete Modified with Supplementary Cementitious Materials after Exposure to Elevated Temperature up to 1000° C*. Materials, 2020. **13**(3): p. 532.
70. Fares, H., *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée*, 2009.
71. NGUYEN, V.T. and N. Albert, *Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température: application à des éprouvettes de grandes dimensions*, in *Laboratoire de mécanique et matériaux du génie civil (L2MGC)* 2013, Université de Cergy-Pontoise. p. 184.
72. Kalifa, P., G. Chene, and C. Galle, *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure*. Cement and concrete research, 2001. **31**(10): p. 1487-1499.
73. Eurocode 4, *EN 1994-1-2: Design of composite steel and concrete structures*. European Committee for Standardization, 2005.
74. Kodur, V. and W. Khaliq, *Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete*. Journal of materials in civil engineering, 2011. **23**(6): p. 793-801.
75. Khaliq, W. and V. Kodur, *Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures*. Cement and Concrete Research, 2011. **41**(11): p. 1112-1122.
76. Zheng, W., B. Luo, and Y. Wang, *Microstructure and mechanical properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures*. Magazine of concrete research, 2014. **66**(8): p. 397-408.
77. Missemer, L., *Etude du comportement sous très hautes températures des bétons fibrés à ultra performances: application au BCV*, 2011, Université de Grenoble. p. 239.

78. De Schutter, G. and L. Taerwe, *Specific heat and thermal diffusivity of hardening concrete*. Magazine of concrete research, 1995. **47**(172): p. 203-208.
79. Harmathy, T., *Thermal properties of concrete at elevated temperatures*. Journal of Materials, 1970.
80. Shahraki, M., N. Hua, N. Elhami-Khorasani, A. Tessari, and M. Garlock, *Residual compressive strength of concrete after exposure to high temperatures: A review and probabilistic models*. Fire Safety Journal, 2023. **135**: p. 103698.
81. Aslani, F. and S. Nejadi, *Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression*. Composites Part B: Engineering, 2013. **53**: p. 121-133.
82. Kodur, V.K.R. and M.A. Sultan, *Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003. **15**(2): p. 101-107.
83. Zheng, W., B. Luo, and Y. Wang, *Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibres at elevated temperatures*. Construction and Building Materials, 2013. **41**: p. 844-851.
84. Abid, M., X. Hou, W. Zheng, and R.R. Hussain, *Effect of Fibers on High-Temperature Mechanical Behavior and Microstructure of Reactive Powder Concrete*. 2019. **12**(2): p. 329.
85. Yaman, I.O., H.M. Aktan, and N. Hearn, *Active and non-active porosity in concrete Part II: Evaluation of existing models*. Materials and Structures, 2002. **35**(2): p. 110-116.
86. Wang, H. and Q. Li, *Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(5): p. 1370-1379.
87. Liu, B.D., W.J. Lv, L. Li, and P.F. Li, *Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete*. Construction and Building Materials, 2014. **69**: p. 133-142.
88. Aslani, F. and B. Samali, *Constitutive relationships for self-compacting concrete at elevated temperatures*. Materials and Structures, 2015. **48**(1): p. 337-356.
89. Jansson, R., *Material properties related to fire spalling of concrete*. 2008.
90. Ulm, F.-J., O. Coussy, and Z.P. Bažant, *The "Chunnel" Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete*. 1999. **125**(3): p. 272-282.
91. Bažant, Z.P., M.F. Kaplan, and Z.P. Bazant, *Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models*. 1996.
92. Dwaikat, M. and V. Kodur, *Response of restrained concrete beams under design fire exposure*. Journal of structural engineering, 2009. **135**(11): p. 1408-1417.
93. Yermak, N., P. Pliya, A.L. Beaucour, A. Simon, and A. Noumowé, *Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties*. Construction and Building Materials, 2017. **132**: p. 240-250.
94. Hou, X., P. Ren, Q. Rong, W. Zheng, and Y. Zhan, *Effect of fire insulation on fire resistance of hybrid-fiber reinforced reactive powder concrete beams*. Composite Structures, 2019. **209**: p. 219-232.
95. Kahanji, C., F. Ali, and A. Nadjai, *Experimental study of ultra-high performance fibre reinforced concrete under ISO 834 fire*. 2016.
96. Alyaa A, A.-A., A. Mazin B, H. Hussein M, and T. Bassam A, *Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(2): p. 1966-1977.

97. Banerji, S., V. Kodur, and R. Solhmirzaei, *Experimental behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions*. Engineering Structures, 2020. **208**: p. 110316.
98. Hou, X., P. Ren, Q. Rong, W. Zheng, and Y. Zhan, *Comparative fire behavior of reinforced RPC and NSC simply supported beams*. Engineering Structures, 2019. **185**: p. 122-140.
99. Kumar, P. and V.K.R. Kodur, *Effect of fire-induced restraint forces on fire behavior of reinforced and prestressed concrete beams*. Engineering Structures, 2023. **275**: p. 115200.
100. Williams, B., L. Bisby, V. Kodur, M. Green, and E. Chowdhury, *Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006. **37**(8): p. 1151-1160.
101. Kodur, V.K.R. and A.M. Shakya, *Effect of temperature on thermal properties of spray applied fire resistive materials*. Fire Safety Journal, 2013. **61**: p. 314-323.
102. Kodur, V. and A. Arablouei, *Effective properties of spray-applied fire-resistive material for resistance to cracking and delamination from steel structures*. Construction and Building Materials, 2015. **84**: p. 367-376.
103. Ren, P., X. Hou, Q. Rong, and W. Zheng, *Quantifying Fire Insulation Effects on the Fire Response of Hybrid-Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Beams*. Fire Technology, 2020. **56**(4): p. 1487-1525.
104. Aslani, F., F. Hamidi, and Q. Ma, *Fire Performance of Heavyweight Self-Compacting Concrete and Heavyweight High Strength Concrete*. 2019. **12**(5): p. 822.
105. Tawfik, T.A., M. Slaný, and M.T. Palou, *Influence of heavyweight aggregate on the fresh, mechanical, durability, and microstructural properties of self-compacting concrete under elevated temperatures*. Journal of Building Engineering, 2023. **80**: p. 108104.
106. Džolev, I., M. Cvetkovska, Đ. Lađinović, and V. Radonjanin, *Numerical analysis on the behaviour of reinforced concrete frame structures in fire*. Computers and Concrete, 2018. **21**(6): p. 637-647.
107. Pandimani, M.R. Ponnada, and Y. Geddada, *Numerical nonlinear modeling and simulations of high strength reinforced concrete beams using ANSYS*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2021. **7**(1): p. 22.
108. Xu, L., B. Li, Y. Chi, C. Li, B. Huang, and Y. Shi, *Stress-strain relation of steel-polypropylene-blended fiber-reinforced concrete under uniaxial cyclic compression*. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. **2018**.
109. Xu, L., L. Huang, Y. Chi, and G. Mei, *Tensile Behavior of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal, 2016. **113**(2): p. 219-229.
110. Taufik, S., E. Anggarini, and I. Setiawan, *ANSYS Numerical Modeling of Confined Deep Beam with High Strength Concrete*. Int. J. Struct. Glas. Adv. Mater. Res, 2020. **4**: p. 41-55.
111. Büyükkaragöz, A.J.S.R. and Essays, *Finite element analysis of the beam strengthened with prefabricated reinforced concrete plate*. 2010. **5**(6): p. 533-544.
112. Kodur, V.K.R. and M. Dwaikat, *A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams*. Cement and Concrete Composites, 2008. **30**(5): p. 431-443.
113. Rafi, M.M., A. Nadjai, and F. Ali, *Experimental testing of concrete beams reinforced with carbon FRP bars*. Journal of composite materials, 2007. **41**(22): p. 2657-2673.
114. Lopes, B., M.R.T. Arruda, L. Almeida-Fernandes, L. Castro, N. Silvestre, and J.R. Correia, *Assessment of mesh dependency in the numerical simulation of compact*

- tension tests for orthotropic materials*. Composites Part C: Open Access, 2020. **1**: p. 100006.
115. Rafi, M., A. Nadjai, F. Ali, and P. O'Hare, *Evaluation of thermal resistance of FRP reinforced concrete beams in fire*. Journal of Structural Fire Engineering, 2011. **2**(2): p. 91-107.
 116. Antonius, P.P.H., *Experimental Study of the Flexural Strength and Ductility of Post Burned Steel Fiber RC Beams*. International Journal of Technology, 2019. **10**(2): p. 291-319.
 117. Jin, L., R. Zhang, L. Li, X. Du, and Y. Yao, *Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies*. Engineering Structures, 2019. **197**: p. 109401.
 118. Khalighi, A., R.A. Izadifard, and A. Zarifian, *Role of macro fibers (steel and hybrid-synthetic) in the residual response of RC beams exposed to high temperatures*. SN Applied Sciences, 2020. **2**(12): p. 1981.
 119. Abdelrahim, M.A.A., A. Elthakeb, U. Mohamed, and M.T. Noaman, *Effect of Steel Fibers and Temperature on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete* %J Civil and Environmental Engineering. 2021. **17**(1): p. 270-276.
 120. Abdulhaleem, K.N., M.E. Gülşan, and A.J.S.C. Çevik, *Mechanical behavior of steel fiber-reinforced self-compacting concrete corbels after exposure to elevated temperatures*. 2018. **19**(6): p. 1881-1894.