MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE « Abbès LAGHROUR »DE KHENCHELA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie Civil

N° de série : .....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Civil

Option : structure

Etude et optimisation de la protection Incendie Des structures en bâtiment

Réalisé par :

-GHOZEL Amira

Membres de jury :

-

-

Dirigé par :

-DR. REBAI Billel

Présenté le : //2026

Dédicace

« »

« Celui qui a dit : “J’en suis capable”, l’a obtenue. »

Nous n’avons franchi les premiers pas que grâce à Sa facilité, nous n’avons atteint les aboutissements que par Son consentement, et nous n’avons réalisé nos objectifs que par Sa grâce.

Je dédie ce travail à moi-même... À celle qui a su patienter, persévérer, avancer malgré les obstacles et croire que chaque effort finirait par porter ses fruits.

À ma très chère grand-mère, que Dieu la protège, pour ses prières, sa tendresse et son soutien.

À ma mère, élevée avec amour, refuge rassurant. Je t’offre ce travail avec tout mon cœur.

À ma mère, ... Ton absence est immense, mais ta place dans mon cœur reste intacte. À ta mémoire, avec amour.

À ma tante Saliha... Merci pour ton affection, ton attention depuis mon enfance. Les mots ne suffiront jamais.

À ma sœur Souad... Mon soutien dans les jours difficiles comme dans les beaux. Merci d’être toujours là.

À mon père et à mon oncle, respect et gratitude.

À mes frères Mohamed Anwar et Taher, merci pour votre présence.

À ma tante Dr Nabila, modèle de fierté, et à ses trois fils, mes frères.

À ma tante Warda et à sa fille Ibtissam (plus qu’une cousine : une sœur), et à ses frères, que Dieu les protège.

À mes chères amies, particulièrement Swssen et Randa... Merci pour ces souvenirs qui ont allégé ce chemin.

À toutes celles et ceux qui m’ont soutenue... Je dédie ce travail avec toute ma gratitude.

Avec toute ma reconnaissance.

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, Le Tout-Puissant, pour Sa grâce, Sa miséricorde et Ses innombrables bénédictions. Sans Sa volonté, ce travail n'aurait pu être mené à son terme.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, le Docteur Rabai Billel, pour son accompagnement constant, sa disponibilité et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour sa patience, ses précieux conseils, sa confiance et pour avoir su, à maintes reprises, alléger les difficultés rencontrées.

Je remercie également la Faculté de Génie Civil ainsi que l'ensemble de son corps enseignant pour la qualité de leur formation et leur engagement. J'adresse une mention particulière au Docteur Khelfaoui Kamel et au Docteur Touam Khemissi pour leur disponibilité et leurs précieux enseignements.

Mes remerciements les plus profonds vont à ma mère et à ma tante, figures essentielles de ma vie. Merci pour votre amour infaillible, votre présence réconfortante et votre soutien de chaque instant.

À ma sœur, mon soutien quotidien, merci d'avoir toujours été à mes côtés dans les moments clés comme dans les épreuves du quotidien.

À chaque membre de ma famille, je témoigne ma reconnaissance pour votre affection, vos encouragements et votre présence bienveillante tout au long de ce parcours.

À mes amies, merci pour les moments partagés, pour votre soutien moral et pour votre gentillesse qui ont rendu cette aventure plus légère.

Enfin, je remercie sincèrement toutes les personnes avec qui j'ai eu la chance de collaborer. Merci pour votre aide, votre présence et pour tous ces moments qui, malgré la fatigue et les obstacles, ont rendu ce chemin plus humain et plus agréable. Ce fut un réel plaisir de partager cette expérience avec vous.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la sécurité incendie des structures en génie civil. Il étudie le comportement des structures en béton soumises à des températures élevées, typiques d'un incendie. Après avoir rappelé les généralités sur l'incendie (triangle du feu, classes de feux, propagation), le travail analyse les actions thermiques selon les Eurocodes et présente l'évolution des propriétés mécaniques du béton et de l'acier avec la température. Une attention particulière est portée aux phénomènes de fissuration et d'éclatement explosif (spalling). Ensuite, les moyens de protection incendie (passive et active) sont détaillés. Une étude expérimentale permet d'évaluer l'influence de la température sur la résistance mécanique du béton. Enfin, une étude de cas propose une optimisation technico-économique de la protection incendie d'un bâtiment en béton.

Mots-clés : incendie, béton, température, résistance au feu, Eurocode 2, protection incendie, spalling.

Abstract

This master's thesis focuses on the fire safety of structures in civil engineering. It investigates the behavior of concrete structures subjected to high temperatures typical of a fire. After recalling general concepts about fire (fire triangle, fire classes, propagation), the work analyzes thermal actions according to Eurocodes and presents the evolution of mechanical properties of concrete and steel with temperature. Special attention is given to cracking and explosive spalling phenomena. Then, passive and active fire protection measures are detailed. An experimental study evaluates the influence of temperature on the mechanical strength of concrete. Finally, a case study proposes a techno-economic optimization of fire protection for a concrete building.

Keywords : fire, concrete, temperature, fire resistance, Eurocode 2, fire protection, spalling.

Table des matières

Dédicace 1

Remerciements 2

Résumé 3

Abstract 4

Liste des figures 9

Liste des tableaux 10

Liste des abréviations 11

1 Introduction générale 12

Introduction générale 12

2 Généralités sur l'incendie : physique, développement et conséquences 15

2.1 Définition scientifique de l'incendie . . . 15
2.2 Le triangle du feu : conditions nécessaires à la combustion . . . 15
2.3 Modes de transfert thermique lors d'un incendie . . . 16
2.3.1 La conduction . . . 16
2.3.2 La convection . . . 16
2.3.3 Le rayonnement . . . 17
2.3.4 Importance pratique . . . 17
2.4 Types et classes de feux . . . 17
2.5 Développement et propagation de l'incendie . . . 18
2.5.1 Phases de développement . . . 18
2.5.2 Facteurs influençant la propagation . . . 18
2.6 Effets destructeurs de l'incendie sur les personnes et les bâtiments . . . 19
2.6.1 Effets sur les personnes . . . 19
2.6.2 Effets sur les bâtiments et les structures . . . 20
2.6.3 Seuils critiques de température pour les matériaux de construction . . . 20
2.7 Synthèse du chapitre . . . 20

3 Actions du feu et comportement thermomécanique des structures en béton 22
3.1 Actions thermiques dues à l'incendie : cadre conceptuel . . . 22
3.1.1 Définition de l'action thermique comme action accidentelle . . . 22
3.1.2 Transfert de chaleur de l'incendie vers la structure . . . 22
3.1.3 Équation générale du transfert thermique en situation d'incendie . . . 24
3.2 Effets de la température sur les propriétés mécaniques du béton et de l'acier . . . 24
3.2.1 Dégradation des propriétés mécaniques du béton . . . 24
3.2.2 Dégradation des propriétés mécaniques des armatures . . . 25
3.2.3 Dilatation thermique et contraintes induites . . . 26
3.2.4 Phénomène de spalling : éclatement explosif du béton . . . 27
3.3 Courbes de feu normalisées et paramétriques . . . 28
3.3.1 Définition et objectif des courbes de feu . . . 28
3.3.2 Courbe normalisée ISO 834 (et Eurocode) . . . 29
3.3.3 Courbes paramétriques (incendies naturels) . . . 30
3.3.4 Courbe feu extérieur et courbe hydrocarbures . . . 31
3.4 Évolution de la température dans les éléments structuraux en béton . . . 31
3.4.1 Propagation de la chaleur par conduction . . . 31
3.4.2 Gradient thermique et isothermes caractéristiques . . . 32
3.4.3 Évolution temporelle de la profondeur affectée . . . 32
3.5 Méthodes de vérification de la résistance au feu selon l'Eurocode 2 . . . 33
3.5.1 Principe général des trois niveaux de méthode . . . 33
3.5.2 Méthode de l'isotherme 500°C (section efficace) . . . 34
3.5.3 Critères de résistance au feu R, E, I, M . . . 35
3.5.4 Analyse structurale sous incendie : combinaison charge / résistance réduite 36
3.6 Synthèse du chapitre . . . 37

4 Étude expérimentale : Relation entre la température et les propriétés mécaniques du béton 38
4.1 Introduction . . . 38
4.2 Caractéristiques des matériaux . . . 39
4.2.1 Ciment . . . 39
4.2.2 Sable . . . 40
4.2.3 Gravier . . . 41
4.2.4 Eau . . . 41
4.3 Masse volumique des granulats . . . 42
4.3.1 Masse volumique absolue . . . 42
4.3.2 Masse volumique apparente . . . 42
4.4 Formulation du béton . . . 43
4.5 Essai d'affaissement au cône d'Abrams . . . 43
4.5.1 Description de l'appareillage . . . 43
4.5.2 Mode opératoire . . . 44
4.5.3 Interprétation des résultats . . . 45

4.6 Préparation des éprouvettes 45
4.6.1 Mise en place et compactage des éprouvettes 46
4.7 Démoulage et conservation des éprouvettes 48
4.8 Essai au scléromètre 49
4.8.1 Description de l'appareil et principe de mesure 49
4.8.2 Protocole d'essai et résultats 49
4.9 Découpage des éprouvettes 50
4.10 Essai aux ultrasons 51
4.10.1 Principe et description de l'appareillage 51
4.10.2 Protocole expérimental et résultats 52
4.11 Étude expérimentale : Influence du feu sur différents types de béton 54
4.11.1 Objectifs de l'étude 54
4.11.2 Préparation des échantillons et conditions initiales 54
4.11.3 Dispositif expérimental 56
4.11.4 Résultats des mesures thermiques pendant l'exposition au feu 57
4.11.5 Phase de refroidissement : immersion dans l'eau 64
4.11.6 Synthèse et discussion 66

5 Conclusion générale **67**

Conclusion générale **67**

Bibliographie **70**

Table des figures

2.1 Le triangle du feu : les trois éléments indispensables à la combustion 16

3.1 Évolution comparée de la résistance mécanique du béton et de l'acier en fonction de la température 26
3.2 Illustration du phénomène de spalling sur éprouvette de béton après exposition au feu 28
3.3 Courbe température-temps normalisée ISO 834 utilisée pour les essais de résistance au feu 30
3.4 Propagation de la chaleur par conduction dans une dalle en béton exposée au feu sur une face 32
3.5 Évolution de la profondeur affectée par la température critique 500°C en fonction du temps d'exposition 33
3.6 Réduction relative de la résistance mécanique du béton et de l'acier en fonction de la température (Eurocode 2) 33
3.7 Schéma de la méthode de l'isotherme 500°C : section réelle, champ thermique, section résiduelle efficace 35
3.8 Schéma illustrant les trois critères fondamentaux R (résistance), E (étanchéité) et I (isolation) selon l'Eurocode 35
3.9 Évolution comparée des sollicitations et de la résistance réduite d'un élément en béton armé en situation d'incendie 36

4.1 Ciment utilisé pour la formulation du béton 39
4.2 Sable jaune utilisé dans la formulation 40
4.3 Sable concassé utilisé dans la formulation 41
4.4 Gravier 8/15 utilisé dans la formulation 41
4.5 Appareillage utilisé pour l'essai au cône d'Abrams 44
4.6 Étapes de réalisation de l'essai au cône d'Abrams 44
4.7 Les différents types d'affaissement selon la norme NF EN 12350-2 45
4.8 Phase de pesée des différents constituants du béton 45
4.9 Phases de malaxage des constituants du béton 46
4.10 Aspect du mélange homogène obtenu en fin de malaxage 46
4.11 Éprouvette sans vibration (référence NV) 47
4.12 Éprouvette compactée par vibration manuelle (VM) 47

4.13 Éprouvette compactée sur table vibrante à fréquence constante (TV) 48
4.14 Éprouvettes après démoulage à 24 heures 48
4.15 Éprouvettes immergées dans l'eau pour la cure (28 jours) 48
4.16 Scléromètre utilisé pour les essais de dureté superficielle 49
4.17 Réalisation de l'essai au scléromètre sur les éprouvettes 50
4.18 Découpage des éprouvettes à la scie diamantée 51
4.19 Échantillons obtenus après découpage des éprouvettes 51
4.20 Appareil de mesure par ultrasons utilisé pour les essais 52
4.21 Réalisation de l'essai aux ultrasons sur les échantillons découpés 53
4.22 Les trois échantillons avant exposition au feu : M1 (non vibré), M2 (table vibrante), M3 (vibration manuelle) 55
4.23 Mesure des températures initiales à l'ambiante avant exposition au feu 55
4.24 Dispositif de génération de la flamme domestique (brûleur à propane) 56
4.25 Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}16$ h (9 min 36 s) 58
4.26 Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}21$ h (12 min 36 s) 59
4.27 Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}23$ h (13 min 48 s) 60
4.28 Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}28$ h (16 min 48 s) 61
4.29 Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}34$ h (20 min 24 s) 62
4.30 Cartographie thermique infrarouge à $t = 1{,}03$ h — fin de l'exposition au feu . . . 63
4.31 Immersion des éprouvettes dans le bain de refroidissement et mesure des températures de surface 64
4.32 Cartographie thermique des températures superficielles après immersion dans le bain (points P1, P2, P3) 65

Liste des tableaux

2.1 Classes de feu selon la norme NF EN 2 18
2.2 Seuils critiques de température pour les matériaux de construction 20

3.1 Coefficients de réduction du béton siliceux en fonction de la température (Eurocode 2) 25
3.2 Coefficients de réduction de la limite d'élasticité des aciers (Eurocode 2) 26

4.1 Valeurs des masses volumiques absolues des granulats 42
4.2 Valeurs des masses volumiques apparentes des granulats 42
4.3 Dosage des constituants du béton (pour 1 m^3) 43
4.4 Classes de consistance par affaissement selon la norme NF EN 206 45
4.5 Résultats de l'essai au scléromètre (à 28 jours) 50
4.6 Vitesses ultrasoniques — Éprouvette sans vibration (NV) 53
4.7 Vitesses ultrasoniques — Éprouvette avec vibration manuelle (VM) 53
4.8 Vitesses ultrasoniques — Éprouvette avec table vibrante (TV) 53
4.9 Températures initiales mesurées au centre des éprouvettes avant exposition au feu 56
4.10 Températures centrales à $t = 0{,}16$ h 58
4.11 Températures centrales à $t = 0{,}21$ h 59
4.12 Températures centrales à $t = 0{,}23$ h 60
4.13 Températures centrales à $t = 0{,}28$ h 61
4.14 Températures centrales à $t = 0{,}34$ h 62
4.15 Températures centrales à $t = 1{,}03$ h (fin d'exposition) 63
4.16 Températures mesurées dans le bain de refroidissement 65
4.17 Statistiques des températures superficielles des éprouvettes après refroidissement 66

Liste des abréviations

AN Annexe Nationale

BAES Bloc Autonome d'Éclairage de Sécurité

BHP Béton à Haute Performance

BUHP Béton à Ultra Haute Performance

C-S-H Silicates de calcium hydratés

CaO Oxyde de calcium

Ca(OH) Hydroxyde de calcium (portlandite)

CaCO Carbonate de calcium (calcaire)

CDI Centrale de Détection Incendie

CEN Comité Européen de Normalisation

CO Monoxyde de carbone

CO Dioxyde de carbone

CNP Ciment Naturel Prompt

E Étanchéité aux flammes et aux gaz

E/C Rapport eau sur ciment

EFC Exutoire de Fumée et de Chaleur

EN Norme Européenne (Eurocode)

ERP Établissement Recevant du Public

$\mathbf{f}_c$ Résistance à la compression du béton

$\mathbf{f}_y$ Limite d'élasticité de l'acier

G/S Rapport gravier sur sable

HC Hydrocarbure (courbe de feu)

HCN Cyanure d'hydrogène

HCl Chlorure d'hydrogène

I Isolation thermique

ICPÉ Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

IGH Immeuble de Grande Hauteur

IR Infrarouge

ISO Organisation Internationale de Normalisation

M Résistance aux chocs mécaniques

NF Norme Française

NV Non Vibré

R Résistance portante

SDI Système de Détection Incendie

SDIS Service Départemental d'Incendie et de Secours

SMSI Système de Mise en Sécurité Incendie

SSI Système de Sécurité Incendie

TV Table Vibrante

UV Ultraviolet

VM Vibration Manuelle

α Coefficient de dilatation thermique linéique

λ Conductivité thermique

ρ Masse volumique

σ Constante de Stefan–Boltzmann

Chapitre 1

Introduction générale

L'incendie constitue l'une des agressions les plus sévères que puissent subir les structures du génie civil. Chaque année, dans le monde, de nombreux bâtiments sont partiellement ou totalement détruits par le feu, entraînant des pertes humaines considérables et des dommages économiques majeurs. En France, la réglementation incendie impose désormais des exigences strictes en matière de résistance au feu des structures, notamment pour les établissements recevant du public, les immeubles de grande hauteur et les logements collectifs. Pourtant, le béton armé — matériau de construction le plus utilisé dans le monde — bénéficie d'une réputation parfois trompeuse de « matériau naturellement résistant au feu ». Cette perception, bien que partiellement justifiée par son caractère incombustible (Euroclasse A1), doit être fortement nuancée.

En réalité, lorsque la température dépasse certains seuils critiques, le béton subit des transformations physico-chimiques profondes et irréversibles. Dès 200 °C, l'eau libre et l'eau liée s'évaporent, créant des pressions de vapeur internes. Entre 300 et 500 °C, les silicates de calcium hydratés (C-S-H), principaux produits de l'hydratation du ciment responsables de la cohésion, se déshydratent progressivement. La portlandite se décompose à son tour, et la résistance à la compression peut chuter de 40 à 50 %. Parallèlement, les armatures en acier — qu'elles soient passives ou de précontrainte — voient leur limite d'élasticité diminuer rapidement dès 400 °C, avec une perte de 50 % à 600 °C. À ces phénomènes s'ajoute le risque d'éclatement explosif (spalling), particulièrement marqué dans les bétons à haute résistance ou à faible porosité, qui peut mettre à nu les armatures et précipiter l'effondrement de l'ouvrage. La connaissance approfondie de ces mécanismes de dégradation est donc indispensable pour concevoir des structures capables de résister à un incendie pendant la durée réglementaire.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la problématique centrale de ce mémoire : comment garantir la stabilité des structures en béton armé face à l'incendie, tout en optimisant techniquement et économiquement les solutions de protection incendie ? Pour y répondre, nous avons articulé notre démarche autour de trois objectifs complémentaires. Le premier est de comprendre et de quantifier, à partir des dispositions des Eurocodes, les phénomènes physico-chimiques et mécaniques qui régissent le comportement du béton et de l'acier sous l'effet de températures élevées. Le second objectif est de caractériser expérimentalement l'influence du mode de mise en œuvre — et plus particulièrement du compactage — sur les propriétés thermiques et méca-

niques du béton, à travers une campagne d'essais menée sur éprouvettes cubiques. Le troisième est d'analyser et d'optimiser les dispositifs de protection incendie, en distinguant la protection passive (enrobage des armatures, choix des granulats, revêtements rapportés, prévention du spalling) de la protection active (détection, alarme, extinction automatique, désenfumage), dans le cadre réglementaire des Eurocodes et des normes nationales.

Pour atteindre ces objectifs, le mémoire est structuré en cinq chapitres, complétés par une partie expérimentale détaillée. Le premier chapitre pose les bases physiques et chimiques nécessaires à la compréhension du phénomène d'incendie : triangle du feu, modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement), classification des feux selon la norme NF EN 2, phases de développement d'un sinistre (ignition, croissance, plein développement, déclin), ainsi que les effets destructeurs sur les personnes et les structures bâties. Le deuxième chapitre constitue le cœur théorique du travail : il présente les actions thermiques selon l'Eurocode 1 (EN 1991-1-2), les courbes de feu normalisées (ISO 834) et paramétriques, ainsi que les lois de dégradation des propriétés mécaniques du béton et de l'acier issues de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-2). Une attention particulière est portée au phénomène de spalling et à la méthode simplifiée de l'isotherme 500 °C, qui permet d'évaluer la section résiduelle efficace d'un élément exposé au feu.

Le troisième chapitre est consacré aux moyens de protection incendie. Il détaille d'une part la protection passive : enrobage minimal des armatures selon la classe de résistance au feu (R30, R60, R90, R120), dimensionnement des sections transversales, choix des granulats thermiquement stables (calcaires plutôt que siliceux), incorporation de fibres de polypropylène pour limiter le spalling, et revêtements rapportés (enduits, plaques de plâtre, peintures intumescentes). Il présente d'autre part la protection active : systèmes de détection incendie (SDI), systèmes de mise en sécurité (SMSI), installations d'extinction automatique (sprinklers, agents gazeux, brouillard d'eau), et désenfumage naturel ou mécanique. Le cadre réglementaire européen et national est synthétisé, en insistant sur la complémentarité entre les deux types de protection.

Le quatrième chapitre rend compte de l'ensemble de la campagne expérimentale menée. Après avoir présenté les caractéristiques des matériaux utilisés — ciment CEM I, sable jaune, sable concassé, gravier 8/15, eau potable — et la formulation retenue (350 kg/m³ de ciment, rapport eau/ciment de 0,45), nous décrivons la confection de trois éprouvettes cubiques (10 cm d'arête) selon trois modes de compactage distincts : sans vibration (référence NV), par vibration manuelle (VM), et sur table vibrante à fréquence constante (TV). Les essais de caractérisation à l'état frais (affaissement au cône d'Abrams) et à l'état durci (scléromètre, ultrasons) sont ensuite détaillés. La partie centrale de ce chapitre est l'exposition des éprouvettes à une flamme domestique simulée par brûleur à propane, représentative d'un incendie en milieu bâti. Les températures superficielles et au cœur des échantillons sont suivies en continu par caméra thermique infrarouge (Testo 855), ce qui permet d'établir des cartographies thermiques précises à différents instants (de 0,16 h à 1,03 h). Une phase de refroidissement brutal par immersion dans l'eau termine le protocole, simulant l'action des systèmes d'extinction.

Le cinquième et dernier chapitre synthétise l'ensemble des résultats expérimentaux et les confronte aux prévisions théoriques des Eurocodes. Il montre notamment que le béton compacté

sur table vibrante, bien que présentant une meilleure inertie thermique initiale (température centrale la plus basse après 9 minutes), accumule davantage de chaleur à long terme (375 °C après une heure) en raison de sa conductivité thermique plus élevée. Une inversion du comportement thermique est observée au-delà de 16 minutes d'exposition. Lors du refroidissement brutal, des gradients thermiques sévères (jusqu'à 272 °C en surface) sont enregistrés, susceptibles d'endommager la microstructure du béton. Une étude de cas sur un bâtiment de bureaux de type R+4 illustre la démarche de dimensionnement au feu selon la méthode de l'isotherme 500 °C, et des pistes d'optimisation technico-économique sont proposées (choix entre béton autoprotégé, enrobage renforcé ou protection rapportée).

L'originalité de ce travail réside dans la combinaison d'une approche normative rigoureuse (Eurocodes 1 et 2) et d'une validation expérimentale sur éprouvettes, avec une attention particulière portée à l'influence du mode de compactage sur le comportement thermique du béton — paramètre souvent négligé dans la littérature. L'utilisation de la thermographie infrarouge pour le suivi en temps réel des champs de température constitue également un apport méthodologique significatif. Au-delà de son apport scientifique, ce mémoire vise à fournir aux ingénieurs en génie civil des éléments de diagnostic et de dimensionnement directement opérationnels : choix de l'enrobage en fonction de la classe de résistance au feu requise, vérification simplifiée à l'aide de la méthode de l'isotherme 500 °C, recommandations pour la prévention du spalling dans les bétons à haute résistance, et critères de sélection entre protection passive et protection active. Ainsi, nous espérons contribuer à une meilleure conception des structures en béton armé face au risque incendie, dans le respect des exigences réglementaires et des contraintes économiques.

Chapitre 2

Généralités sur l'incendie : physique, développement et conséquences

2.1 Définition scientifique de l'incendie

Selon la norme ISO 13943, l'incendie est défini comme une combustion incontrôlée dans le temps et dans l'espace, susceptible de provoquer des dommages aux personnes, aux biens et à l'environnement.

D'un point de vue physico-chimique, le feu correspond à une réaction d'oxydation exothermique entre un combustible et un comburant, générant un dégagement important de chaleur, de fumées et de gaz chauds. Cette réaction exothermique se traduit par une élévation rapide de la température dans le compartiment sinistré, pouvant atteindre plusieurs centaines — voire dépasser 1000°C — lors d'un incendie pleinement développé.

L'augmentation de la température constitue le paramètre fondamental de l'action du feu sur les structures. Elle entraîne une dégradation progressive et irréversible des propriétés mécaniques des matériaux de construction, notamment du béton et de l'acier. Ainsi, dans le domaine du génie civil, l'incendie est considéré principalement comme une action thermique accidentelle agissant sur les structures, dont l'intensité et la durée conditionnent directement la stabilité et la sécurité des bâtiments.

2.2 Le triangle du feu : conditions nécessaires à la combustion

Le triangle du feu est un modèle conceptuel simple mais fondamental permettant de comprendre les trois éléments indispensables à toute combustion :

1. **Un combustible** : matière capable de brûler (matériaux solides comme le bois, liquides comme les hydrocarbures, gaz)
2. **Un comburant** : généralement le dioxygène de l'air (concentration minimale d'environ 15% en volume)

3. **Une énergie d'activation** : source de chaleur ou d'étincelle initiant la réaction chimique

La réaction de combustion ne peut se produire que si ces trois éléments sont réunis simultanément, chacun en quantité suffisante. La disparition (par consommation lors de la combustion) ou la suppression (par une action externe d'extinction) de l'un de ces trois éléments suffit à arrêter la combustion. Ce principe fondamental guide l'ensemble des stratégies de prévention et d'extinction des incendies.



Fig. 2.1 – Le triangle du feu : les trois éléments indispensables à la combustion

2.3 Modes de transfert thermique lors d'un incendie

Les phénomènes thermiques sont les mécanismes par lesquels la chaleur se propage lors d'un incendie. Ils jouent un rôle essentiel dans le développement et la propagation du feu aux structures voisines. Il existe trois modes principaux de transfert thermique, qui agissent simultanément dans la plupart des incendies réels :

2.3.1 La conduction

La conduction est le transfert de chaleur par contact direct entre les matériaux, sans déplacement de matière. Au niveau microscopique, l'agitation thermique se transmet d'atome à atome au sein du matériau. Ce phénomène explique par exemple comment la chaleur d'une flamme se transmet à travers une paroi métallique ou comment le béton s'échauffe progressivement depuis sa surface exposée jusqu'à son cœur.

La loi de Fourier régit ce phénomène :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

où λ est la conductivité thermique du matériau et $\frac{dT}{dx}$ le gradient de température.

2.3.2 La convection

La convection correspond au transfert de chaleur par le mouvement des fluides chauds, comme l'air ou les gaz de combustion. L'air chaud, moins dense, s'élève naturellement et trans-

porte la chaleur vers les parties hautes du local sinistré. Ce phénomène explique l'accumulation d'une couche de gaz brûlants sous le plafond (stratification thermique) et la propagation rapide de l'incendie par les gaines techniques et les circulations verticales (effet cheminée).

$$q_{\text{conv}} = h(T_f - T_s) \tag{2.2}$$

où h est le coefficient d'échange convectif, T_f la température des gaz chauds et T_s la température de la surface.

2.3.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques, principalement dans l'infrarouge, sans nécessité de contact direct ni de milieu matériel intermédiaire. On ressent la chaleur d'un feu à distance principalement par rayonnement. Ce mode de transfert est particulièrement redoutable car il permet la propagation du feu d'un bâtiment à l'autre, même en l'absence de contact direct, et reste actif même en l'absence de convection. L'intensité du flux radiatif croît avec la puissance quatrième de la température absolue :

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_s^4) \tag{2.3}$$

où ε est l'émissivité, σ la constante de Stefan-Boltzmann, T_f la température des gaz et T_s la température de surface.

2.3.4 Importance pratique

Ces trois phénomènes thermiques expliquent comment la chaleur se déplace dans un incendie et contribuent à l'extension du feu aux matériaux voisins. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour concevoir des systèmes de protection contre l'incendie (isolation, compartimentage, désenfumage) et pour étudier le comportement des matériaux exposés à la chaleur.

2.4 Types et classes de feux

Les feux peuvent être classés selon la nature des matériaux en combustion. Cette classification, normalisée internationalement (norme NF EN 2), permet de choisir les agents d'extinction les mieux adaptés et d'éviter les interactions dangereuses (exemple : ne pas utiliser d'eau sur un feu de graisse ou de métaux).

Tab. 2.1 – Classes de feu selon la norme NF EN 2

Classe	Type et exemples	Agents d'extinction
A	Matériaux solides : bois, papier, textiles	Eau, poudre ABC, mousse
B	Liquides : essence, huile, solvants	Poudre BC, CO , mousse
C	Gaz : propane, butane, hydrogène	Poudre BC, coupure alimentation
D	Métaux : magnésium, aluminium, sodium	Poudre spéciale classe D (pas d'eau)
E	Équipements électriques sous tension	CO , poudre ABC (non conducteurs)
F	Huiles et graisses de cuisson	Extincteur spécial classe F

La connaissance rigoureuse de ces classes est essentielle pour appliquer les techniques d'extinction adaptées, éviter les accidents (explosion d'un feu d'hydrocarbures par projection d'eau, éclatement d'un feu de métaux) et assurer la sécurité des personnes intervenant sur le sinistre.

2.5 Développement et propagation de l'incendie

2.5.1 Phases de développement

L'incendie débute généralement par une petite source de chaleur ou une étincelle. Lorsque les conditions du triangle du feu (combustible, comburant, énergie d'activation) sont réunies en proportions suffisantes, la combustion s'initie puis se développe selon plusieurs phases successives, chacune ayant des implications spécifiques pour la structure :

1. **Ignition (allumage)** : apparition locale de la flamme, source encore localisée et de faible puissance thermique. C'est la phase la plus propice à l'intervention manuelle.

2. **Croissance (développement)** : augmentation progressive de la température, propagation des flammes aux matériaux voisins, montée de la puissance calorifique. La stratification thermique s'établit sous le plafond.

3. **Développement complet (Fully Developed Fire)** : embrasement généralisé du compartiment (flashover), toutes les surfaces combustibles sont enflammées, températures maximales atteintes (800-1100°C selon la charge calorifique). C'est la phase la plus sévère pour la structure.

4. **Déclin (décroissance)** : après consommation de la majeure partie du combustible, la température diminue progressivement, mais les gradients thermiques demeurent élevés. Le refroidissement rapide (ex : intervention des sprinklers) peut générer des contraintes thermiques additionnelles.

2.5.2 Facteurs influençant la propagation

Plusieurs facteurs influencent la cinétique de développement et la propagation de l'incendie :

- **La nature, la quantité et la disposition des matériaux combustibles** : charge calorifique totale et densité surfacique influencent directement la durée et l'intensité maximale du feu.
- **La ventilation du lieu** : l'apport d'oxygène frais (par ouvertures, fenêtres, gaines techniques) conditionne le régime de combustion. Un apport limité peut produire une combustion lente et incomplète génératrice de fumées toxiques (feu couvant) ; un apport abondant peut provoquer un embrasement explosif (backdraft).
- **La configuration architecturale du bâtiment** : le compartimentage (cloisonnement), la présence de circulations verticales (escaliers, ascenseurs, gaines), la hauteur sous plafond et la forme des volumes influencent la stratification thermique et la propagation des gaz chauds.
- **Les propriétés thermiques des matériaux de construction** : conductivité thermique, diffusivité, capacité calorifique et inertie thermique conditionnent la pénétration de la chaleur dans les éléments porteurs et la tenue mécanique sous charge.

2.6 Effets destructeurs de l'incendie sur les personnes et les bâtiments

2.6.1 Effets sur les personnes

L'incendie provoque plusieurs types de dommages chez les individus, dont la gravité dépend de l'intensité et de la durée d'exposition :

- **Brûlures** : résultant du contact direct avec les flammes ou la chaleur intense. On distingue les brûlures du 1er degré (épiderme, rougeur), 2ème degré (épiderme et derme, cloques) et 3ème degré (destruction de toutes les couches cutanées, nécessitant des greffes). Les brûlures étendues constituent une urgence vitale absolue.
- **Intoxication par inhalation de fumées** : les fumées d'incendie contiennent un cocktail toxique incluant le monoxyde de carbone (CO — asphyxiant majeur responsable de plus de 80% des décès en incendie), le cyanure d'hydrogène (HCN — toxique cellulaire), le chlorure d'hydrogène (HCl — irritant respiratoire), et le dioxyde de carbone (CO — hypercapnie). L'inhalation massive peut entraîner une suffocation rapide ou des troubles respiratoires graves à retardement.
- **Panique et mouvement de foule** : dans les établissements recevant du public, la panique peut causer des blessures accidentelles lors de l'évacuation (bousculades, chutes, piétinement) et entraver l'évacuation ordonnée.
- **Conséquences psychologiques post-traumatiques** : stress aigu, trouble de stress post-traumatique (TSPT), anxiété durable, dépression réactionnelle, pouvant persister longtemps après le sinistre.

2.6.2 Effets sur les bâtiments et les structures

Les incendies ont un impact significatif sur les structures bâties, allant de la dégradation esthétique à l'effondrement total :

- **Dommages structurels profonds** : affaiblissement irréversible des matériaux porteurs (béton et acier) sous l'effet de la chaleur, pouvant entraîner des effondrements partiels ou totaux de l'ouvrage. La perte de résistance mécanique est directement corrélée à la température maximale atteinte et à la durée d'exposition.
- **Destruction des équipements et des finitions** : systèmes électriques, réseaux de câblage, installations de chauffage-ventilation-climatisation, mobilier fixe, infrastructures technologiques, revêtements muraux, sols, peintures et enduits décoratifs.
- **Dégradations différées (post-incendie)** : réhydratation de la chaux libre (CaO) issue de la décomposition de la portlandite et de la décarbonatation des granulats calcaires. Cette réaction exothermique accompagnée d'une expansion volumique peut faire éclater le béton plusieurs heures ou jours après l'incendie, aggravant les dommages déjà subis.
- **Corrosion accélérée des armatures** : après sinistre, la carbonatation du béton superficiel et la présence éventuelle d'eau d'extinction peuvent initier ou accélérer la corrosion des armatures, réduisant la durabilité résiduelle de l'ouvrage.

2.6.3 Seuils critiques de température pour les matériaux de construction

Le tableau ci-dessous synthétise les températures critiques au-delà desquelles les principaux matériaux de construction subissent des dégradations significatives :

Tab. 2.2 – Seuils critiques de température pour les matériaux de construction

Matériau	**Phénomène observable**	**Temp. critique**
Béton ordinaire	Début de dégradation (déshydratation C-S-H)	200-300°C
Béton ordinaire	Perte de 50% de la résistance	500-550°C
Béton hautes perfs.	Risque élevé de spalling (éclatement)	Dès 200°C
Acier doux (armatures)	Début de perte de résistance	400-450°C
Acier doux (armatures)	Perte de 50% de la limite élastique	600°C
Acier précontrainte	Début de perte rapide de résistance	Dès 300°C
Bois massif	Inflammation (départ flamme autonome)	250-300°C
Aluminium (structure)	Ramollissement, perte quasi totale	200-250°C

2.7 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a présenté les notions fondamentales relatives à l'incendie : sa définition scientifique basée sur le triangle du feu, les trois modes de transfert thermique (conduction, convection,

rayonnement), les différents types et classes de feux permettant de choisir les agents d'extinction adaptés, les phases successives de développement d'un sinistre et les facteurs influençant sa propagation, ainsi que les effets destructeurs sur les personnes et les structures bâties.

La compréhension approfondie de ces phénomènes physico-chimiques et thermiques constitue un prérequis indispensable pour aborder, dans le chapitre suivant, l'étude du comportement spécifique des structures en béton soumises à des températures élevées — notamment l'évolution de leurs propriétés mécaniques, la pénétration de la chaleur par conduction, et les méthodes réglementaires de dimensionnement au feu selon les Eurocodes.

—

Chapitre 3

Actions du feu et comportement thermomécanique des structures en béton

3.1 Actions thermiques dues à l'incendie : cadre conceptuel

3.1.1 Définition de l'action thermique comme action accidentelle

En situation d'incendie, la structure n'est pas soumise uniquement aux charges mécaniques classiques que sont le poids propre, les charges d'exploitation, la neige ou le vent. Elle subit également une action thermique de nature accidentelle. Selon l'Eurocode 1 (EN 1991-1-2), l'incendie est classé comme une **action accidentelle**, car il s'agit d'un phénomène exceptionnel dont la probabilité d'occurrence sur la durée de vie de l'ouvrage est faible, mais dont les conséquences potentielles (effondrement, pertes humaines) sont extrêmement graves.

L'élévation de température agit comme une charge indirecte qui modifie simultanément et de manière couplée trois aspects fondamentaux de la réponse structurale :

- Les propriétés mécaniques des matériaux (résistance, module d'élasticité, limite d'élasticité, ductilité)
- Les dimensions des éléments par dilatation thermique différentielle
- L'état des contraintes internes, avec apparition de contraintes thermiques additionnelles en structure hyperstatique

3.1.2 Transfert de chaleur de l'incendie vers la structure

Lors d'un incendie, l'énergie thermique dégagée par la combustion est transmise à l'élément en béton selon trois mécanismes agissant simultanément à la surface exposée :

Transfert par rayonnement thermique

Le rayonnement correspond au transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques émises par les flammes et par les gaz chauds. Il s'agit du mode de transfert prédominant aux températures élevées (supérieures à 600°C), représentant souvent plus de 70% du flux thermique incident sur une paroi exposée. Le flux radiatif net reçu par la surface s'exprime par :

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon_{\text{résultant}}\, \sigma\, (T_g^4 - T_s^4) \tag{3.1}$$

Où :

- $\varepsilon_{\text{résultant}}$: émissivité résultante du système gaz-surface (généralement comprise entre 0,6 et 0,9)
- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\,\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$: constante de Stefan-Boltzmann
- T_g : température des gaz chauds (généralement plusieurs centaines de degrés Celsius)
- T_s : température de surface de l'élément structurel (en Kelvin)

La dépendance en puissance quatrième de la température explique pourquoi le rayonnement devient prépondérant et croît très rapidement lorsque l'incendie atteint son plein développement.

Transfert par convection

La convection correspond à l'échange thermique entre les gaz chauds en mouvement (flammes, fumées, air surchauffé) et la surface du béton. Le flux convectif s'exprime linéairement en fonction de l'écart de température :

$$q_{\text{conv}} = h_c(T_g - T_s) \tag{3.2}$$

Où h_c est le coefficient d'échange convectif (exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{\,2} \cdot \text{K}^{\,1}$), dont la valeur dépend de la vitesse d'écoulement des gaz et de la position de l'élément (paroi verticale ou horizontale). En situation d'incendie standard, l'Eurocode 1 recommande généralement $h_c = 25\,\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ pour la face exposée, valeur conservative par rapport aux phénomènes réels.

Transfert par conduction dans l'épaisseur

Une fois la surface chauffée par rayonnement et convection, la chaleur pénètre progressivement dans l'épaisseur du matériau par conduction. Ce transfert interne est décrit par la loi de Fourier, qui relie le flux de chaleur au gradient de température :

$$q = -\lambda(T)\, \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.3}$$

Où :

- $\lambda(T)$: conductivité thermique du béton ($\text{W} \cdot \text{m}^{\,1} \cdot \text{K}^{\,1}$), qui dépend fortement de la température, du taux d'humidité et de la nature des granulats

- $\frac{\partial T}{\partial x}$: gradient thermique à travers l'épaisseur (K/m)

Le béton possède une conductivité thermique relativement faible (typiquement 1,3 à 2,0 $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$ selon sa composition), ce qui lui confère une inertie thermique appréciable et ralentit la propagation de la chaleur vers le cœur de l'élément. Cette propriété favorable explique pourquoi une épaisseur suffisante de béton peut protéger efficacement les armatures.

3.1.3 Équation générale du transfert thermique en situation d'incendie

La combinaison des trois modes de transfert aboutit à l'équation de la chaleur transitoire, qui gouverne l'évolution du champ de température dans l'élément structurel :

$$\rho(T)\, c_p(T)\, \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\, \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\, \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \dot{Q}_{\text{source}} \tag{3.4}$$

Où :

- $\rho(T)$: masse volumique du béton ($\mathrm{kg/m^3}$), qui diminue avec la température sous l'effet des départs d'eau
- $c_p(T)$: capacité thermique massique ($\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$), qui présente un pic important entre 100°C et 120°C en raison de la chaleur latente de vaporisation de l'eau libre
- $\dot{Q}_{\text{source}}$: terme source éventuel (réactions chimiques endothermiques ou exothermiques)

Dans la plupart des cas pratiques, on néglige $\dot{Q}_{\text{source}}$ et on traite le problème en deux dimensions (section transversale de l'élément), l'évolution longitudinale étant supposée uniforme.

3.2 Effets de la température sur les propriétés mécaniques du béton et de l'acier

3.2.1 Dégradation des propriétés mécaniques du béton

Lorsqu'il est soumis à une montée progressive en température, le béton traverse une succession de stades de dégradation dont la nature et l'ampleur dépendent du niveau thermique atteint et de la durée d'exposition. Les phénomènes physico-chimiques sous-jacents sont les suivants :

- **De 20 à 200°C** : évaporation de l'eau libre contenue dans les pores capillaires et de l'eau physisorbée. Ce processus s'accompagne d'un léger retrait, d'une augmentation modérée de la porosité et d'une légère diminution de la résistance. Cette plage de température est partiellement réversible après refroidissement.
- **De 200 à 400°C** : début de la déshydratation des silicates de calcium hydratés (C-S-H), principaux produits de l'hydratation du ciment responsables de la cohésion et de la résistance mécanique. La structure cristalline se dégrade progressivement, entraînant une perte de résistance de l'ordre de 20 à 40% et une chute notable du module d'élasticité.

- **De 400 à 600°C** : décomposition thermique de la portlandite Ca(OH) en oxyde de calcium (CaO) et vapeur d'eau. Cette réaction endothermique s'accompagne d'une diminution brutale de la résistance résiduelle. C'est également dans cette plage thermique que le risque de spalling est le plus élevé, en raison de l'accumulation de pression de vapeur. La résistance résiduelle peut être réduite à 40-60% de la valeur initiale.
- **Au-delà de 600°C** : effondrement quasi-total de la structure cristalline de la pâte de ciment hydratée. Pour les bétons à granulats calcaires, la décarbonatation (CaCO $\rightarrow$ CaO + CO) libère du dioxyde de carbone et génère des contraintes internes supplémentaires. La résistance résiduelle est inférieure à 30% de la valeur à température ambiante.

Coefficients de réduction selon l'Eurocode 2

L'Eurocode 2 (EN 1992-1-2, Annexe B) fournit des facteurs de réduction normalisés pour le béton à granulats siliceux, exprimant la résistance résiduelle $f_{c,\theta}$ en fonction de la température θ :

Tab. 3.1 – Coefficients de réduction du béton siliceux en fonction de la température (Eurocode 2)

Temp. (°C)	**Résistance relative** $k_c(\theta)$	**Module relatif** $E_{c,\theta}/E_c$	**Observations**
20	1,00	1,00	État de référence
100	1,00	1,00	Évaporation eau libre
200	0,95	0,90	Début déshydratation C-S-H
300	0,85	0,75	Dégradation progressive
400	0,75	0,60	Décomposition portlandite
500	0,60	0,45	Seuil isotherme 500°C
600	0,45	0,30	Début décarbonatation
700	0,30	0,15	Perte de cohésion avancée
800	0,15	0,08	Dégradation sévère
900	0,08	0,04	Quasi-destruction

3.2.2 Dégradation des propriétés mécaniques des armatures

Les aciers d'armature sont encore plus sensibles à l'élévation de température que le béton, avec des conséquences potentiellement critiques sur la capacité portante des éléments fléchis ou comprimés. L'Eurocode 2 distingue deux catégories d'aciers :

- **Aciers doux pour armatures passives (nuance B500B, etc.)** : ils conservent leur limite d'élasticité jusqu'à environ 350-400°C, puis subissent une diminution rapide. La limite conventionnelle d'utilisation est fixée à 500°C, température à laquelle la résistance résiduelle est d'environ 78% de la valeur à froid.
- **Aciers de précontrainte (torons, fils, barres)** : très vulnérables à la chaleur, ils commencent à perdre significativement leur résistance dès 300°C. À 400°C, la résistance

résiduelle n'est plus que de 50%, et à 600°C, elle tombe à 10%. La température critique conventionnelle est fixée à 350°C dans les calculs réglementaires.

Tab. 3.2 – Coefficients de réduction de la limite d'élasticité des aciers (Eurocode 2)

Température (°C)	**Acier doux (passif)** $k_s(\theta)$	**Acier de précontrainte (actif)**
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	1,00	0,90
300	1,00	0,70
400	1,00	0,50
500	0,78	0,30
600	0,47	0,10
700	0,23	0,05
800	0,11	—

Cette sensibilité thermique élevée explique l'importance cruciale de l'enrobage des armatures : le béton environnant doit jouer le rôle de barrière thermique suffisante pour maintenir les aciers en dessous de leur température critique pendant toute la durée de résistance au feu exigée.

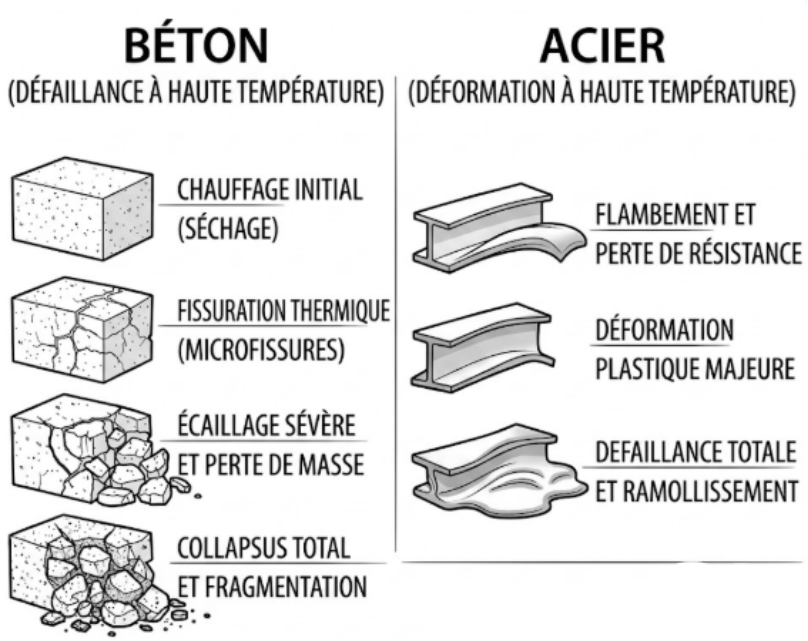


Fig. 3.1 – Évolution comparée de la résistance mécanique du béton et de l'acier en fonction de la température

3.2.3 Dilatation thermique et contraintes induites

L'élévation de température provoque une augmentation des dimensions linéaires de tout matériau selon la relation fondamentale :

$$\Delta L = \alpha \, L_0 \, \Delta T \tag{3.5}$$

Où :

- α : coefficient de dilatation thermique linéaire
- L_0 : longueur initiale à la température de référence
- ΔT : variation de température (positive en échauffement)

Pour le béton ordinaire, le coefficient de dilatation thermique est généralement compris entre 8×10^{-6} et $12 \times 10^{-6}\,°\text{C}^{-1}$. L'Eurocode 2 retient la valeur $\alpha_c = 10 \times 10^{-6}\,°\text{C}^{-1}$ comme valeur conventionnelle.

La difficulté majeure en structure hyperstatique (c'est-à-dire comportant des liaisons empêchant le libre déplacement — poutres continues, portiques, voiles, dalles solidaires) est que la dilatation thermique est partiellement ou totalement empêchée. Il en résulte l'apparition de **contraintes thermiques additionnelles** qui viennent s'ajouter aux contraintes d'origine mécanique (charges permanentes et d'exploitation). Ces contraintes supplémentaires peuvent être très élevées et provoquer :

- La fissuration prématurée du béton, avant même que la perte de résistance due à la température ne devienne critique
- Le flambement d'éléments comprimés (poteaux) sous l'effet combiné de la charge appliquée et de la dilatation thermique bloquée
- Le cisaillement d'ancrages ou de liaisons entre éléments adjacents

3.2.4 Phénomène de spalling : éclatement explosif du béton

Le spalling (écaillage thermique) est un phénomène brutal et potentiellement catastrophique qui peut survenir dans les premières minutes ou premières heures d'un incendie sévère. Il se manifeste par l'expulsion violente de fragments de béton depuis la surface exposée, pouvant atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur.

Deux mécanismes principaux, souvent couplés, sont à l'origine du spalling :

1. **Spalling par pression de vapeur** : sous l'effet de la chaleur, l'eau libre et l'eau liée contenues dans les pores du béton se vaporisent. Si le béton est peu perméable — cas des bétons à haute résistance et des bétons à faible rapport eau/ciment — la vapeur d'eau ne peut pas s'évacuer suffisamment vite vers les zones froides. La pression de vapeur augmente alors jusqu'à dépasser la résistance en traction du béton, provoquant l'explosion locale.
2. **Spalling par contraintes thermomécaniques** : le gradient thermique très élevé entre la surface brûlante (souvent $> 600°\text{C}$) et le cœur encore froid (20-50°C) génère des contraintes de compression intenses dans la peau exposée et des contraintes de traction dans la zone

sous-jacente. Lorsque ces contraintes de traction dépassent la résistance résiduelle du béton à cette profondeur, des fissures se propagent et des plaques se détachent.

Les conséquences du spalling sont graves :

- Réduction rapide et imprévisible de la section résistante
- Mise à nu des armatures, qui se trouvent alors directement exposées aux flammes et perdent leur résistance beaucoup plus vite
- Possibilité d'effondrement prématuré de l'élément, avant la durée de résistance au feu calculée théoriquement

Les bétons à haute résistance ($f_c > 50$ MPa) et les bétons à ultra-haute performance sont paradoxalement les plus vulnérables, en raison de leur très faible perméabilité. L'Eurocode 2 impose donc des dispositions spécifiques pour ces bétons.

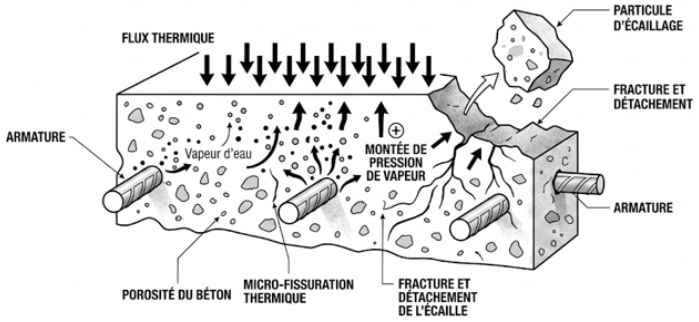


Fig. 3.2 – Illustration du phénomène de spalling sur éprouvette de béton après exposition au feu

3.3 Courbes de feu normalisées et paramétriques

3.3.1 Définition et objectif des courbes de feu

Les courbes de feu représentent l'évolution de la température des gaz dans un compartiment en fonction du temps, depuis l'ignition jusqu'à la phase de déclin. Elles constituent l'entrée thermique indispensable pour tout calcul de résistance au feu des structures. Selon l'Eurocode 1 (EN 1991-1-2), on distingue deux grandes familles de courbes :

- **Courbes de feu normalisées (nominales)** : modèles théoriques conventionnels, indépendants de la charge calorifique réelle et de la ventilation. Elles sont utilisées pour les vérifications réglementaires de base et le classement des éléments (R30, R60, etc.).
- **Courbes de feu paramétriques (naturelles)** : modèles qui prennent en compte les caractéristiques réelles du compartiment (charge calorifique mobilisable, taux de ventilation, dimensions géométriques). Elles relèvent de l'ingénierie du feu et permettent une approche performantielle plus réaliste.

3.3.2 Courbe normalisée ISO 834 (et Eurocode)

La courbe ISO 834 (nommée également courbe standard ou courbe cellulosique) est la plus utilisée dans le monde pour le dimensionnement normalisé au feu des bâtiments courants (bureaux, logements, commerces, établissements recevant du public). Elle est définie par l'équation suivante :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \tag{3.6}$$

Où :

- θ_g : température des gaz dans le compartiment (°C)
- t : temps écoulé depuis le début de l'incendie (minutes)
- 20 : température ambiante initiale (°C)

Cette courbe, initialement établie à partir d'essais sur des feux de bois en laboratoire, présente une montée en température rapide dans les 30 premières minutes, puis une croissance plus lente. Elle constitue un scénario sévère mais standardisé, permettant de comparer les performances de différents éléments structurels dans des conditions identiques.

La durée de résistance au feu d'un élément est exprimée en minutes selon cette courbe : R30, R60, R90, R120, R180, R240. Par exemple, un classement R60 signifie que l'élément a satisfait aux critères de performance pendant 60 minutes d'exposition à la courbe ISO 834.

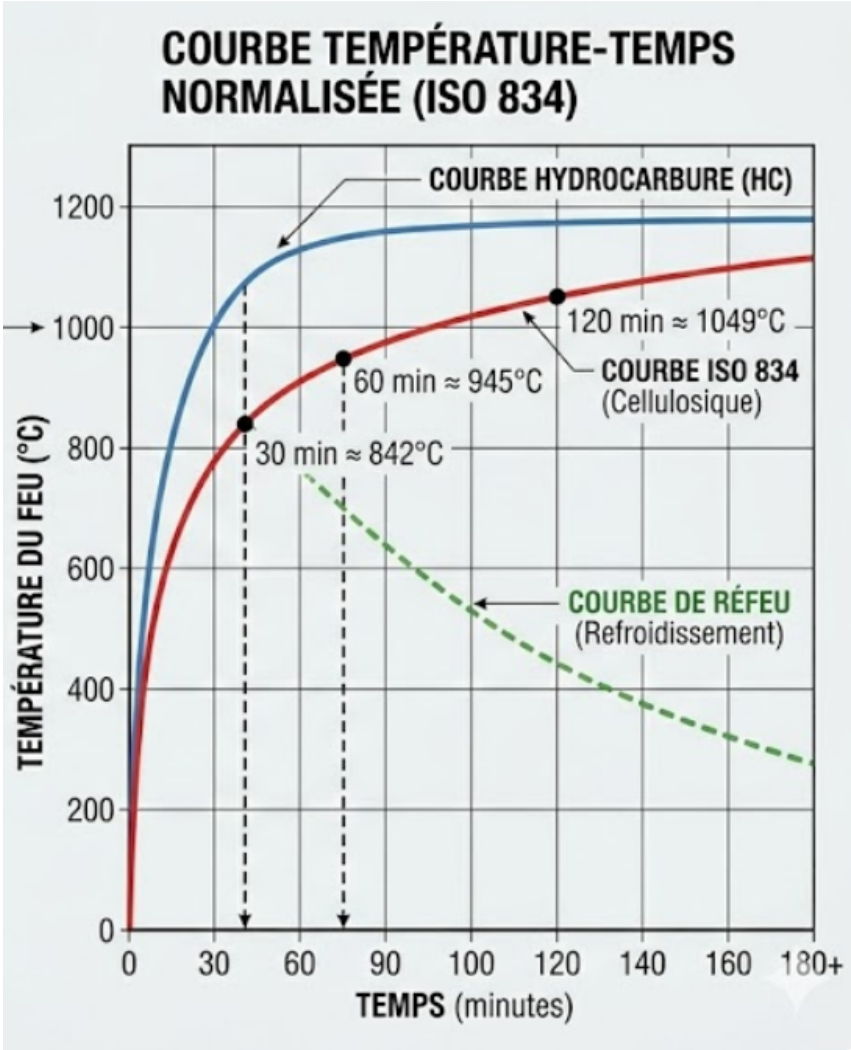


Fig. 3.3 – Courbe température-temps normalisée ISO 834 utilisée pour les essais de résistance au feu

3.3.3 Courbes paramétriques (incendies naturels)

Les courbes paramétriques, définies à l'annexe A de l'EN 1991-1-2, visent à représenter de façon plus réaliste le développement d'un incendie dans un compartiment donné, en tenant compte des paramètres suivants :

- **Charge calorifique mobilisable** q_f : quantité d'énergie thermique potentiellement libérable par la combustion des matériaux présents dans le compartiment (meubles, revêtements, stockage). Exprimée en MJ/m^2 de surface au sol.
- **Taux de ventilation** : déterminé par les dimensions des ouvertures (fenêtres, portes) qui permettent l'entrée d'oxygène frais et la sortie des gaz chauds. Il est caractérisé par le facteur d'ouverture O (en m$^{1/2}$).
- **Inertie thermique des parois** $b = \sqrt{\lambda \rho c}$: capacité des parois du compartiment (murs, planchers, plafonds) à absorber la chaleur, retardant ainsi l'élévation de la température des gaz.

- **Type de combustible** : bois, matières plastiques, liquides inflammables, etc.

Les courbes paramétriques présentent généralement une phase de montée plus ou moins rapide, un palier plus ou moins long à température maximale (incendie fully developed), puis une phase de déclin lorsque le combustible est consommé. Elles sont plus proches de la réalité physique que la courbe ISO 834, mais leur mise en œuvre nécessite des données plus détaillées et une modélisation plus fine.

3.3.4 Courbe feu extérieur et courbe hydrocarbures

Deux autres courbes nominales sont parfois utilisées pour des cas particuliers :

- **Courbe feu extérieur** : définit l'échauffement d'une façade exposée à un incendie provenant d'un local voisin (exemple : feu sortant par une fenêtre). L'équation est similaire à ISO 834 mais avec une température maximale plafonnée à 680°C.
- **Courbe hydrocarbures (HC)** : utilisée pour les tunnels routiers, les parkings, les industries pétrochimiques et les zones de stockage de liquides inflammables. La montée en température est beaucoup plus rapide qu'ISO 834, atteignant 1100°C en 30 minutes seulement :

$$\theta_g = 20 + 1080\left(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}\right) \tag{3.7}$$

3.4 Évolution de la température dans les éléments structuraux en béton

3.4.1 Propagation de la chaleur par conduction

Lors d'un incendie, la température ne se répartit pas uniformément dans l'élément structural. Elle évolue dans le temps et dans l'espace en fonction :

- De la courbe de feu appliquée sur la face exposée
- Des propriétés thermiques dépendantes de la température du béton (conductivité, capacité calorifique, masse volumique)
- De la géométrie de la section transversale (épaisseur, forme, rapport surface exposée / volume)
- Des conditions aux limites sur les faces non exposées (isolation, présence d'autres matériaux)

La propagation de la chaleur dans le béton est régie par l'équation de la chaleur transitoire en conduction, dont la résolution (numérique pour les cas réels) fournit le champ de température $T(x, y, t)$ dans toute la section à chaque instant.

3.4.2 Gradient thermique et isothermes caractéristiques

Le gradient thermique correspond à la variation spatiale de la température à l'intérieur d'un élément exposé au feu. Il s'exprime mathématiquement par la dérivée spatiale :

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \right) \tag{3.8}$$

Plus ce gradient est élevé, plus la variation de température entre deux points proches est importante. Les conséquences d'un gradient thermique élevé sont :

- Des contraintes thermiques internes (traction dans les zones froides, compression dans les zones chaudes)
- Un risque accru de fissuration et de spalling
- Une zone affectée par la température critique (500°C) bien délimitée

On définit traditionnellement des **isothermes caractéristiques** :

- **Isotherme 500°C** : seuil au-delà duquel la contribution mécanique du béton est négligée en calcul simplifié (méthode de la section efficace)
- **Isotherme 350°C** : seuil critique pour les armatures de précontrainte
- **Isotherme 100°C** : front d'évaporation de l'eau libre

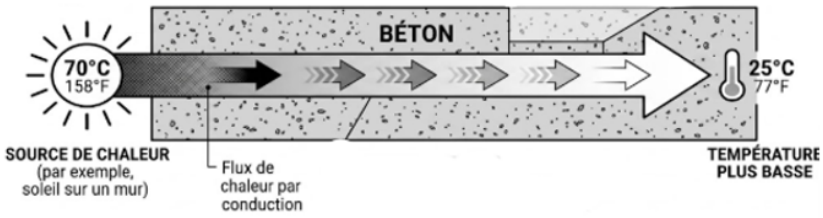


Fig. 3.4 – Propagation de la chaleur par conduction dans une dalle en béton exposée au feu sur une face

3.4.3 Évolution temporelle de la profondeur affectée

Avec le temps d'exposition :

- La chaleur pénètre progressivement en profondeur, repoussant l'isotherme 500°C vers l'intérieur
- La zone affectée par des températures critiques ($\geq 500°C$) augmente en épaisseur
- La section résiduelle efficace (zone où $T < 500°C$) diminue
- La capacité portante de l'élément se réduit en conséquence

Cette évolution temporelle conditionne directement la durée de résistance au feu de l'élément : l'effondrement survient lorsque la section efficace résiduelle n'est plus capable de reprendre les sollicitations appliquées.

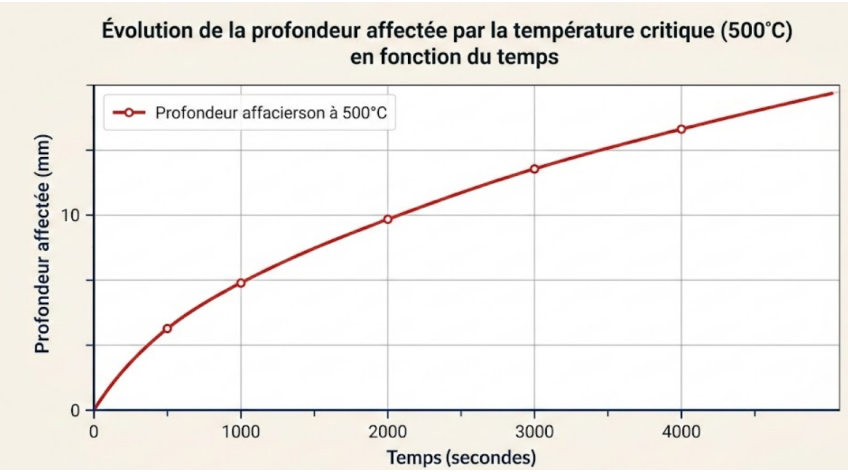


Fig. 3.5 – Évolution de la profondeur affectée par la température critique 500°C en fonction du temps d'exposition

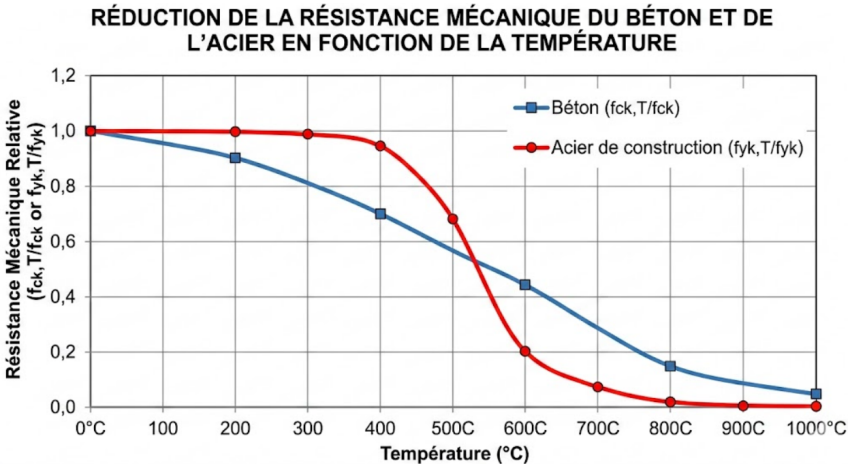


Fig. 3.6 – Réduction relative de la résistance mécanique du béton et de l'acier en fonction de la température (Eurocode 2)

3.5 Méthodes de vérification de la résistance au feu selon l'Eurocode 2

3.5.1 Principe général des trois niveaux de méthode

L'Eurocode 2 (EN 1992-1-2) propose trois niveaux de méthodes pour vérifier la résistance au feu des structures en béton, du plus simple au plus sophistiqué :

1. **Méthodes tabulaires** : les plus simples, elles consistent à consulter des tableaux préétablis donnant directement les dimensions minimales de section et les enrobages d'armatures

en fonction de la classe de résistance au feu requise (R30, R60, R90, R120). Ces tableaux sont issus de nombreuses simulations thermomécaniques et validés par essais.

2. **Méthodes simplifiées** (méthode de l'isotherme 500°C, méthode des zones) : elles nécessitent un calcul thermique préalable (par abaques ou par résolution numérique simple) pour déterminer le champ de température dans la section, puis réduisent mécaniquement la section résistante aux zones où $T < 500°C$. Le calcul mécanique est ensuite réalisé avec les propriétés à température ambiante.

3. **Méthodes avancées (numériques)** : modélisation complète par éléments finis couplant le calcul thermique transitoire et le calcul mécanique non linéaire, en intégrant les lois de comportement dépendantes de la température (y compris la déformation différée, le fluage thermique, l'endommagement). Ces méthodes sont réservées aux structures complexes, aux classes de résistance élevées ou aux projets d'ingénierie du feu.

3.5.2 Méthode de l'isotherme 500°C (section efficace)

La méthode de l'isotherme 500°C, définie à l'annexe B de l'EN 1992-1-2, est la méthode simplifiée la plus largement utilisée dans la pratique courante pour les poutres, poteaux, dalles et voiles en béton armé. Elle repose sur les étapes suivantes :

1. Détermination du champ de température dans la section transversale de l'élément à l'instant t d'exposition (généralement 60, 90 ou 120 minutes). Cette détermination peut se faire :

   - Par les abaques thermiques fournis par l'Eurocode 2
   - Par résolution numérique simple (logiciel de différences finies)
   - Par des formules approchées pour les géométries courantes

2. Identification de l'isotherme 500°C dans la section : toute zone dont la température dépasse ce seuil est considérée comme ne contribuant plus à la résistance mécanique, et est purement et simplement exclue de la section résistante.

3. La **section résiduelle** est constituée de l'ensemble des zones où $T < 500°C$. Pour les armatures, on vérifie que leur température est inférieure à leur seuil critique (500°C pour aciers passifs, 350°C pour précontrainte).

4. Calcul de la résistance de la section résiduelle en utilisant les propriétés mécaniques à température ambiante (pas de coefficients de réduction supplémentaires car la coupure à 500°C est déjà conservative).

5. Vérification que la résistance ainsi calculée est suffisante pour reprendre les sollicitations de calcul en situation d'incendie (combinaison accidentelle selon EN 1990).

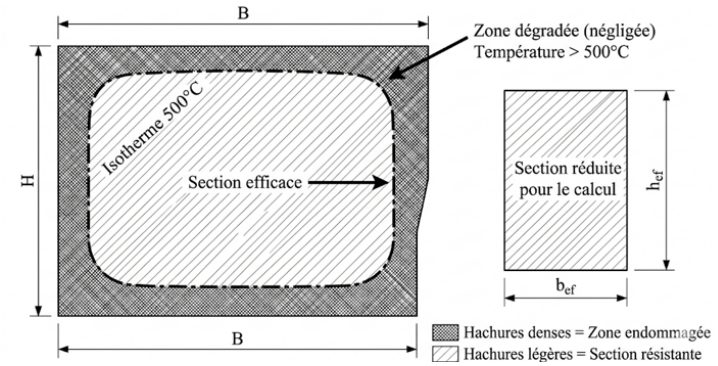


Fig. 3.7 – Schéma de la méthode de l'isotherme 500°C : section réelle, champ thermique, section résiduelle efficace

3.5.3 Critères de résistance au feu R, E, I, M

Le classement de résistance au feu d'un élément structurel est exprimé par la combinaison des critères suivants, chacun devant être satisfait pendant toute la durée d'exposition :

- **R (Résistance portante / Résistance mécanique)** : l'élément conserve sa capacité à transmettre les efforts mécaniques (flexion, compression, cisaillement, torsion) dans les conditions de calcul en situation d'incendie, sans déformation excessive ni ruine.
- **E (Étanchéité aux flammes et aux gaz)** : l'élément (paroi, cloison, plancher) empêche le passage des flammes, des gaz chauds et des fumées toxiques vers la face non exposée. Cette exigence est déterminante pour le compartimentage coupe-feu.
- **I (Isolation thermique)** : la température moyenne de la face non exposée ne dépasse pas 140°C d'élévation par rapport à la température ambiante initiale (ou 180°C en tout point), afin d'éviter l'inflammation des matériaux situés de l'autre côté de la paroi.
- **M (Résistance aux chocs mécaniques)** : l'élément résiste à un choc mécanique représentant la chute de débris ou l'effondrement partiel de structures voisines. Ce critère est essentiellement requis pour les éléments de compartimentage coupe-feu majeurs.

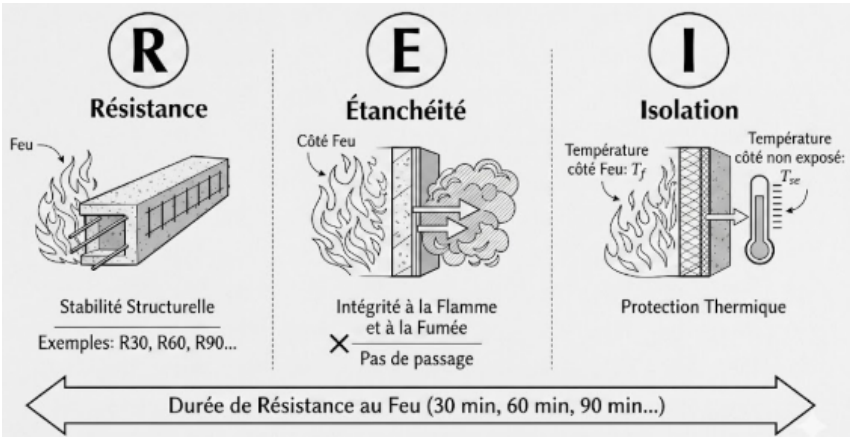


Fig. 3.8 – Schéma illustrant les trois critères fondamentaux R (résistance), E (étanchéité) et I (isolation) selon l'Eurocode

3.5.4 Analyse structurale sous incendie : combinaison charge / résistance réduite

En situation d'incendie, deux phénomènes antagonistes évoluent simultanément dans le temps :

- Les charges appliquées à la structure (poids propre, charges d'exploitation réduites, neige, vent) restent présentes, bien qu'avec des coefficients partiels de sécurité adaptés à la situation accidentelle.
- La résistance des matériaux (béton et acier) diminue progressivement avec l'élévation de température, selon les lois de réduction présentées précédemment.

La ruine (ou la perte de stabilité) survient à l'instant t_{ruine} lorsque l'inégalité suivante est vérifiée :

$$S_d(t) > R_d(t) \tag{3.9}$$

où $S_d(t)$ est la sollicitation agissante (qui peut elle-même varier dans le temps sous l'effet des déformations thermiques bloquées) et $R_d(t)$ la résistance réduite de la section efficace à l'instant t.

L'objectif du dimensionnement au feu est de garantir que, pour toute durée t inférieure à la durée de résistance nominale visée (par exemple 60 minutes pour R60), la capacité résistante reste supérieure aux sollicitations.

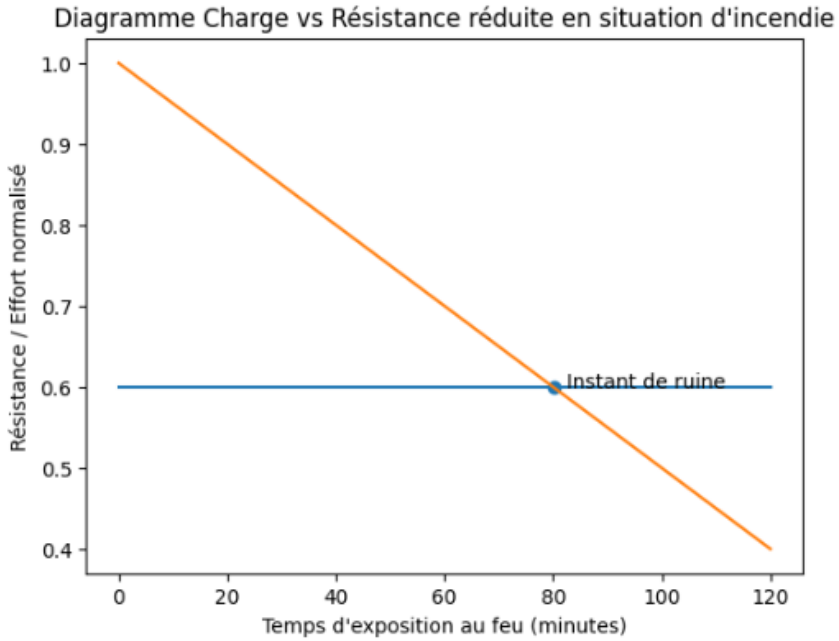


Fig. 3.9 – Évolution comparée des sollicitations et de la résistance réduite d'un élément en béton armé en situation d'incendie

3.6 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a présenté de façon approfondie les actions thermiques induites par un incendie sur les structures en béton, ainsi que les effets de la température sur les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs. L'élévation de température constitue une action accidentelle majeure, régie par les trois modes de transfert thermique — rayonnement, convection et conduction — dont les lois physiques ont été explicitées.

Les coefficients de réduction normalisés de l'Eurocode 2 pour le béton et l'acier permettent de quantifier la dégradation progressive des résistances : le béton perd 40% de sa résistance à 500°C et plus de 85% à 800°C ; l'acier de précontrainte perd 70% de sa résistance dès 400°C. Cette sensibilité thermique impose des dispositions constructives rigoureuses : enrobage suffisant des armatures, choix de granulats thermiquement stables, et incorporation éventuelle de fibres de polypropylène contre le spalling.

Les courbes de feu normalisées (ISO 834) et paramétriques constituent l'entrée thermique du dimensionnement. La méthode de l'isotherme 500°C, méthode simplifiée de référence, permet d'évaluer la section résiduelle efficace et de vérifier la stabilité pour les classes courantes R30 à R120. La compréhension de l'ensemble de ces mécanismes — couplant thermique et mécanique — est indispensable pour concevoir des structures en béton capables de résister à un incendie pendant la durée réglementaire et d'assurer ainsi la sécurité des personnes et la pérennité des ouvrages.

Chapitre 4

Étude expérimentale : Relation entre la température et les propriétés mécaniques du béton

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble de la démarche expérimentale menée afin d'évaluer l'influence de la température sur les propriétés mécaniques du béton. L'étude s'articule autour de deux volets complémentaires : d'une part, la caractérisation des matériaux constitutifs et la formulation du béton ; d'autre part, l'analyse du comportement thermique de différents types d'éprouvettes soumises à une exposition au feu de type domestique.

La connaissance du comportement du béton en situation d'incendie revêt une importance capitale dans le domaine du génie civil, notamment pour la conception d'ouvrages résistants au feu et pour l'évaluation de la sécurité structurelle des bâtiments existants. En effet, lorsque le béton est soumis à des températures élevées, ses propriétés mécaniques — résistance à la compression, module d'élasticité, cohésion de la pâte de ciment — se dégradent de manière significative. Ces phénomènes sont étroitement liés à la microstructure du matériau, à son mode de mise en œuvre et à la nature de ses constituants.

Dans ce contexte, la présente étude vise à :

- caractériser les matériaux utilisés (ciment, sables, gravier, eau) et établir une formulation de béton adaptée ;
- préparer des éprouvettes selon différents modes de compactage (sans vibration, vibration manuelle, table vibrante) ;
- évaluer les propriétés mécaniques initiales du béton par des méthodes non destructives (essai au scléromètre, essai aux ultrasons) ;
- étudier l'évolution de la distribution thermique au sein des éprouvettes lors d'une exposition à une flamme domestique, par thermographie infrarouge.

4.2 Caractéristiques des matériaux

Les matériaux utilisés pour la formulation du béton sont le ciment, le sable, les granulats et l'eau. Leurs caractéristiques physiques ont été déterminées en laboratoire afin d'assurer une formulation rigoureuse et reproductible du béton.

4.2.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui durcit sous l'action de l'eau ; il constitue l'élément actif de la liaison dans le béton. Il est fabriqué par cuisson à très haute température (environ 1 450 °C) d'un mélange de calcaire (70 à 80 %) et d'argile (20 à 30 %), donnant un clinker qui est ensuite broyé et additionné de gypse pour réguler la prise.

Principaux types de ciments et leurs usages :

- **CEM I (Ciment Portland pur)** : teneur en clinker supérieure à 95 % ; hautes résistances mécaniques, idéal pour le béton armé et précontraint.
- **CEM II (Ciment Portland composé)** : usage général (maçonnerie, béton armé courant) ; le clinker est partiellement substitué par des additions minérales (laitier, cendres volantes, calcaire).
- **CEM III (Ciment de haut fourneau)** : forte teneur en laitier granulé de haut fourneau ; excellente durabilité en milieux agressifs (sulfates, eaux de mer) et pour les travaux hydrauliques.
- **Ciment prompt naturel (CNP)** : prise très rapide (quelques minutes), faible retrait ; utilisé pour les travaux d'urgence et les injections.
- **Ciment blanc** : faible teneur en oxydes de fer ; usage essentiellement décoratif et architectural.



Fig. 4.1 – Ciment utilisé pour la formulation du béton

4.2.2 Sable

Deux types de sable ont été employés dans cette étude : un sable jaune naturel et un sable concassé artificiel. Leur association permet d'optimiser la granulométrie du squelette granulaire et d'améliorer la compacité du mélange.

Sable jaune

Le sable jaune est un sable fin naturel (classe granulaire 0/2 ou 0/4 mm) caractérisé par une teinte dorée à ocre, due à la présence d'oxydes de fer. Il est issu de carrières alluvionnaires et peut présenter une fraction argileuse non négligeable. Sa granulométrie fine lui confère une bonne maniabilité, mais sa teneur en fines doit être contrôlée afin de ne pas affecter les résistances mécaniques du béton.



Fig. 4.2 – Sable jaune utilisé dans la formulation

Sable concassé

Le sable concassé est un sable artificiel obtenu par broyage et criblage de roches dures (calcaire, granite). Ses grains, de forme anguleuse, offrent une excellente compacité et une forte adhérence avec la pâte de ciment, ce qui améliore les résistances mécaniques du béton. Il est dépourvu de matières organiques et est fréquemment lavé pour éliminer les particules fines ($<$ 63 µm) susceptibles d'accroître les besoins en eau.



Fig. 4.3 – Sable concassé utilisé dans la formulation

4.2.3 Gravier

Le gravier est un granulat grossier naturel ou artificiel composé de fragments rocheux dont la taille est généralement comprise entre 2 et 63 mm. Ses caractéristiques principales sont la granulométrie (classes courantes : 4/8, 6/16, 20/40 mm), la forme des grains (roulée ou concassée) et la nature géologique (calcaire, quartz, granite). Ces paramètres conditionnent directement la résistance mécanique du béton, son poids volumique et sa durabilité. Dans la présente étude, un gravier de classe 8/15 mm a été utilisé.



Fig. 4.4 – Gravier 8/15 utilisé dans la formulation

4.2.4 Eau

L'eau de gâchage est un composant essentiel du béton : elle assure l'hydratation du ciment (réaction exothermique conduisant à la formation des produits liants) et confère au mélange

frais la maniabilité nécessaire à sa mise en œuvre. L'eau utilisée dans cette étude est une eau potable du réseau, conforme aux exigences de la norme NF EN 1008. Elle est incolore, inodore et exempte de substances susceptibles d'affecter la prise et le durcissement du béton (chlorures, sulfates, huiles, etc.).

4.3 Masse volumique des granulats

La masse volumique (notée ρ) est une grandeur physique fondamentale, définie comme le rapport de la masse m d'un corps sur le volume V qu'il occupe :

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{4.1}$$

Elle permet d'identifier les matériaux et constitue une donnée indispensable pour le calcul des dosages dans la formulation du béton.

4.3.1 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue (ou vraie) est la masse par unité de volume de la matière solide seule, en excluant tout vide interparticulaire ou intragranulaire :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{\text{Masse du matériau sec}}{\text{Volume solide réel (sans vides)}} \tag{4.2}$$

Elle est mesurée à l'aide d'un pycnomètre et constitue une propriété intrinsèque du matériau, indépendante de son état de compactage.

Tab. 4.1 – Valeurs des masses volumiques absolues des granulats

Matériaux	**Sable concassé 0/4**	**Gravier 8/15**
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2 660	2 660

4.3.2 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente tient compte de l'ensemble des vides présents dans un volume de matériau en vrac : vides intragranulaires (pores) et espaces interparticulaires. Elle est essentielle pour le dosage volumétrique des constituants et varie en fonction du mode de compactage :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{\text{Masse du matériau}}{\text{Volume apparent (solide + pores + vides intergranulaires)}} \tag{4.3}$$

Tab. 4.2 – Valeurs des masses volumiques apparentes des granulats

Matériaux	**Sable concassé 0/4**	**Gravier 8/15**
Masse volumique apparente (kg/m^3)	2 180	1 900

L'écart entre les masses volumiques absolue et apparente traduit la porosité et la compacité des granulats. Pour le gravier 8/15, cet écart est plus important en raison des grands espaces intergranulaires caractéristiques des granulats grossiers.

4.4 Formulation du béton

La formulation du béton est une étape déterminante qui consiste à définir les proportions optimales des différents constituants, de manière à satisfaire simultanément les exigences de maniabilité à l'état frais et de résistance mécanique à l'état durci. La composition retenue pour cette étude est présentée dans le tableau 4.3.

Tab. 4.3 – Dosage des constituants du béton (pour 1 m^3)

Constituants	**Dosage (kg/m^3)**
Ciment	350
Sable concassé 0/4	600
Gravier 8/15	800
Eau de gâchage	160
Rapport eau/ciment (E/C)	**0,45**
Rapport gravier/sable (G/S)	**1,50**

Le rapport eau/ciment de 0,45 est un paramètre fondamental qui conditionne directement la résistance mécanique et la durabilité du béton. Un rapport E/C faible permet de limiter la porosité de la pâte de ciment hydratée, améliorant ainsi la compacité et la résistance du matériau. Le rapport granulats/sable de 1,50 assure une bonne compacité du squelette granulaire tout en maintenant une maniabilité satisfaisante.

4.5 Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai normalisé (NF EN 12350-2) réalisé sur béton frais afin de mesurer sa consistance et d'évaluer sa maniabilité. L'affaissement, couramment désigné par le terme anglais *slump*, est exprimé en millimètres.

4.5.1 Description de l'appareillage

L'essai est réalisé à l'aide des équipements suivants :

- **Plaque de base** : en acier, à surface plane, dure et non absorbante.
- **Cône d'Abrams** : moule tronconique en acier galvanisé, de diamètre intérieur à la base 200 mm, de diamètre intérieur au sommet 100 mm et de hauteur 300 mm. Cet appareil doit son nom à son inventeur, Duff Abrams (1918).
- **Tige de piquage** : tige en acier lisse de diamètre 16 mm, à extrémité arrondie, pour le damage manuel du béton.



Fig. 4.5 – Appareillage utilisé pour l'essai au cône d'Abrams

4.5.2 Mode opératoire

L'essai se déroule selon les étapes suivantes :

1. Humidifier légèrement la plaque et l'intérieur du cône ; poser et maintenir fermement le cône sur la plaque.
2. Remplir le cône en trois couches d'épaisseur approximativement égale ; piquer chaque couche 25 fois avec la tige d'acier en s'assurant que les coups pénètrent uniformément dans la couche.
3. Araser le béton en excès au sommet du cône à l'aide de la tige.
4. Soulever le cône verticalement et lentement (entre 2 et 5 secondes) en le guidant légèrement pour éviter tout mouvement latéral.
5. Mesurer immédiatement l'affaissement, défini comme la différence entre la hauteur du cône (300 mm) et la hauteur du béton affaissé en son point le plus haut.



Fig. 4.6 – Étapes de réalisation de l'essai au cône d'Abrams

4.5.3 Interprétation des résultats

L'affaissement peut prendre différentes formes selon la consistance du béton : affaissement *vrai* (le béton s'affaisse régulièrement), affaissement *par cisaillement* (une partie glisse latéralement) ou affaissement *effondrement* (le béton s'étale sans conserver de forme). Seul l'affaissement vrai est considéré comme valide selon la norme.

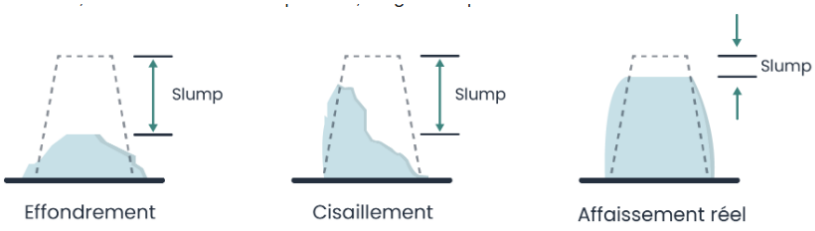


Fig. 4.7 – Les différents types d'affaissement selon la norme NF EN 12350-2

Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide et maniable. La norme NF EN 206 définit cinq classes de consistance en fonction de la valeur de l'affaissement :

Tab. 4.4 – Classes de consistance par affaissement selon la norme NF EN 206

Classe	Affaissement (mm)	Consistance
S1	10 – 40	Ferme
S2	50 – 90	Plastique
S3	100 – 150	Très plastique
S4	160 – 210	Fluide
S5	$\geq$ 220	Très fluide

4.6 Préparation des éprouvettes

Après l'établissement de la formulation, nous avons procédé à la confection des éprouvettes. Des moules cubiques de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm ont été préparés, puis enduits d'huile de démoulage sur leurs parois internes afin de faciliter l'extraction des éprouvettes après durcissement et d'éviter toute adhérence du béton au moule.

Les différents constituants du béton ont ensuite été pesés individuellement, conformément aux dosages définis dans la formulation.



Fig. 4.8 – Phase de pesée des différents constituants du béton

Le malaxage a été réalisé manuellement : le ciment, le sable et les granulats ont d'abord été mélangés à sec jusqu'à homogénéité, puis l'eau de gâchage a été ajoutée progressivement en continuant à malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et de consistance uniforme.



Fig. 4.9 – Phases de malaxage des constituants du béton



Fig. 4.10 – Aspect du mélange homogène obtenu en fin de malaxage

4.6.1 Mise en place et compactage des éprouvettes

Le béton frais a été coulé dans les moules préalablement préparés. Afin d'étudier l'influence du mode de compactage sur les propriétés du béton, trois éprouvettes ont été fabriquées selon des procédés distincts :

- **Éprouvette 1 (NV — Non vibrée)** : le béton a été coulé directement dans le moule, sans aucune opération de compactage. Cette éprouvette constitue la référence permettant d'évaluer l'effet du compactage sur les propriétés mécaniques.



Fig. 4.11 – Éprouvette sans vibration (référence NV)

- **Éprouvette 2 (VM — Vibration manuelle)** : le béton a été compacté par piquage manuel à l'aide d'une tige métallique, en plusieurs couches successives. Ce mode de compactage, moins efficace que la vibration mécanique, permet néanmoins d'éliminer une partie des bulles d'air emprisonnées.



Fig. 4.12 – Éprouvette compactée par vibration manuelle (VM)

- **Éprouvette 3 (TV — Table vibrante)** : le moule a été placé sur une table vibrante et soumis à des vibrations mécaniques à fréquence constante pendant une durée de 2 minutes. Ce procédé assure un compactage optimal du béton, en éliminant de manière efficace les vides résiduels et en améliorant la distribution des granulats.





Fig. 4.13 – Éprouvette compactée sur table vibrante à fréquence constante (TV)

À l'issue du compactage, la surface des éprouvettes a été dressée et les moules ont été couverts d'un film plastique pour prévenir l'évaporation de l'eau de gâchage au cours des premières heures de prise.

4.7 Démoulage et conservation des éprouvettes

Après 24 heures de coulage, les éprouvettes ont été démoulées avec précaution afin d'éviter toute détérioration des arêtes ou de la surface du béton encore jeune.





Fig. 4.14 – Éprouvettes après démoulage à 24 heures

Les éprouvettes ont ensuite été immergées dans un bac d'eau à température ambiante pour une cure humide d'une durée de 28 jours, conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12390-2. Cette cure en eau permet de maintenir une humidité suffisante pour assurer la poursuite des réactions d'hydratation du ciment et le développement optimal des propriétés mécaniques du béton.

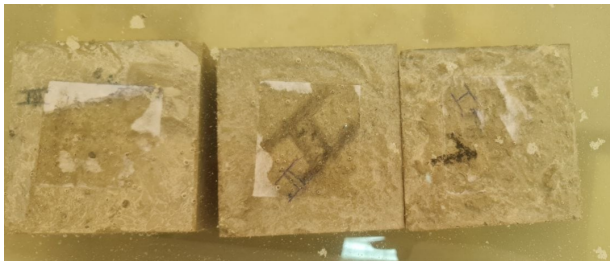


Fig. 4.15 – Éprouvettes immergées dans l'eau pour la cure (28 jours)

4.8 Essai au scléromètre

4.8.1 Description de l'appareil et principe de mesure

Le scléromètre (ou marteau Schmidt) est un appareil de contrôle non destructif permettant d'estimer la résistance à la compression superficielle du béton durci. Son principe repose sur la mesure de l'indice de rebond d'une masse métallique propulsée contre la surface du béton par un ressort calibré.

Principe de fonctionnement : Lors de l'impact, la masse rebondit sous l'effet de l'élasticité de la surface du béton. La distance de rebond, adimensionnée par rapport à la course totale de la masse, constitue l'*indice sclérométrique* R. Cet indice est d'autant plus élevé que la surface du béton est dure et résistante.

Exploitation des résultats : L'indice sclérométrique R est converti en résistance à la compression estimée (en MPa) par lecture sur des abaques fournis par le fabricant, établis à partir d'une corrélation statistique entre les deux grandeurs.

Limites de la méthode : Le scléromètre ne mesure que la dureté des quelques millimètres superficiels du béton et ne renseigne pas directement sur les propriétés mécaniques au cœur de l'éprouvette. Les résultats peuvent être influencés par la présence d'armatures proches de la surface, la nature des granulats, l'état d'humidité du béton et la carbonatation superficielle.



Fig. 4.16 – Scléromètre utilisé pour les essais de dureté superficielle

4.8.2 Protocole d'essai et résultats

À l'issue de la période de cure de 28 jours, les éprouvettes ont été retirées du bac d'eau et laissées à l'air libre pendant plusieurs heures afin d'éliminer l'excès d'humidité en surface, condition nécessaire à la validité des mesures. Dix impacts ont été effectués sur chaque face testée, et la valeur médiane retenue.



Fig. 4.17 – Réalisation de l'essai au scléromètre sur les éprouvettes

Les résultats obtenus pour les trois éprouvettes sont synthétisés dans le tableau 4.5.

Tab. 4.5 – Résultats de l'essai au scléromètre (à 28 jours)

Paramètre	**Sans vibration (NV)**	**Vibration manuelle (VM)**	**Table vibrante (TV)**
Indice sclérométrique R	18	18	20
Résistance estimée (MPa)	—	—	16
Incertitude (%)	—	—	± 4,5

L'éprouvette compactée sur table vibrante (TV) présente l'indice sclérométrique le plus élevé ($R = 20$), traduisant une dureté superficielle supérieure. Cela est cohérent avec une meilleure compacité et une réduction des vides internes due au compactage mécanique efficace. Les deux autres éprouvettes présentent le même indice ($R = 18$), mais la résistance estimée par abaque n'a pas pu être extrapolée de manière fiable en raison de la faible valeur de l'indice, en dehors de la plage d'étalonnage standard.

4.9 Découpage des éprouvettes

À l'issue des essais au scléromètre, les éprouvettes ont été sectionnées à l'aide d'une scie diamantée à refroidissement par eau. Cette opération permet d'obtenir des surfaces de coupe planes et propres, indispensables pour la réalisation des essais ultrasoniques et l'observation des sections transversales.

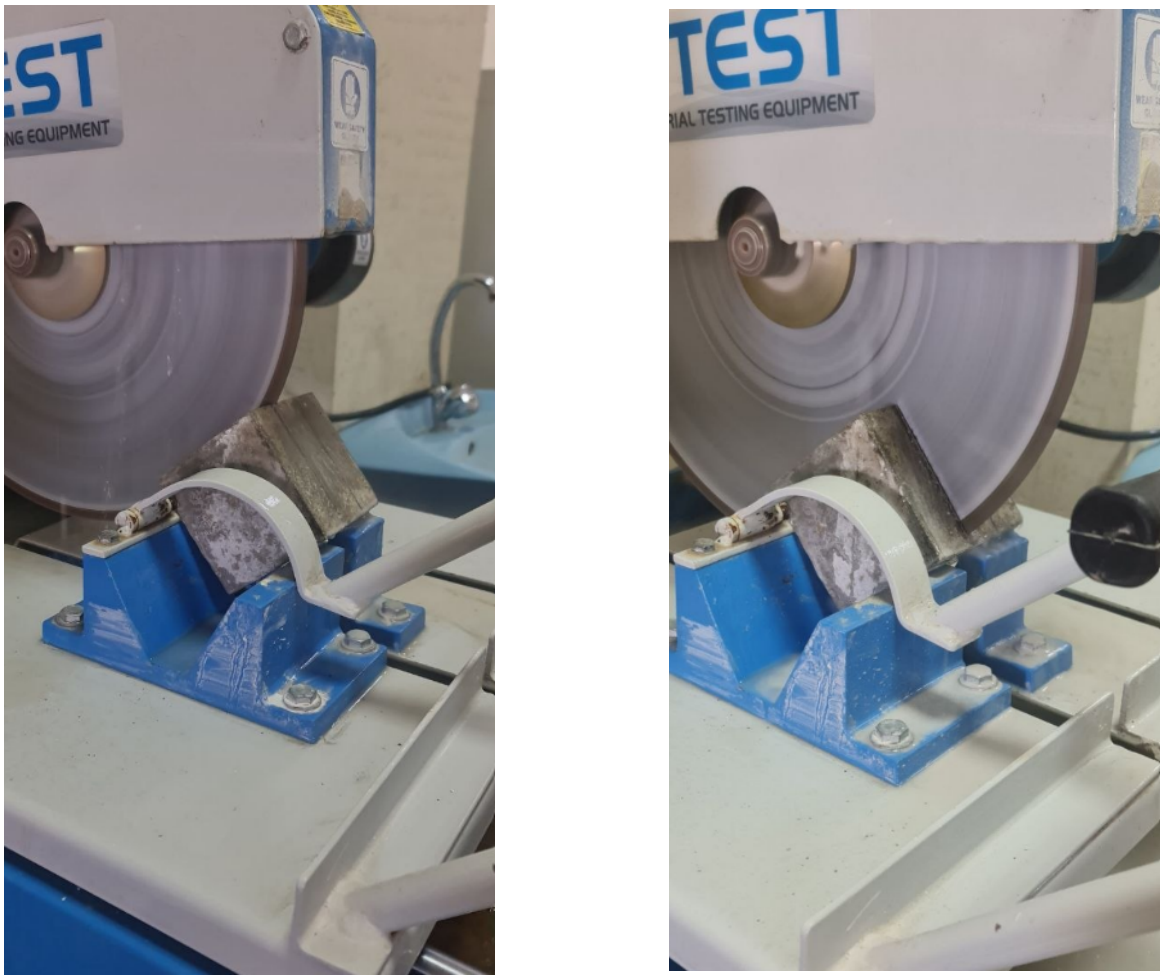


Fig. 4.18 – Découpage des éprouvettes à la scie diamantée

Chaque éprouvette cubique a été divisée en deux parties de hauteurs inégales : une partie de 4,5 cm et une partie de 5,5 cm (ou 5,55 cm selon l'éprouvette), afin de disposer de deux échantillons distincts permettant des mesures en transmission directe.



Fig. 4.19 – Échantillons obtenus après découpage des éprouvettes

4.10 Essai aux ultrasons

4.10.1 Principe et description de l'appareillage

L'essai aux ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant d'évaluer l'homogénéité interne et la qualité du béton. Le principe repose sur la mesure du temps de transit

d'une impulsion ultrasonique entre deux transducteurs (émetteur et récepteur) placés sur deux faces opposées de l'échantillon. La vitesse de propagation des ondes est calculée à partir du temps de transit et de la distance connue entre les transducteurs.

La vitesse de propagation V des ondes longitudinales dans le béton est donnée par la relation :

$$V = \frac{L}{t} \tag{4.4}$$

où L est la distance entre les transducteurs (en m) et t le temps de transit mesuré (en s). Une vitesse élevée traduit un béton dense, homogène et de bonne qualité, tandis qu'une vitesse faible révèle la présence de fissures, de vides ou de zones mal compactées.



Fig. 4.20 – Appareil de mesure par ultrasons utilisé pour les essais

4.10.2 Protocole expérimental et résultats

Après découpage, chaque demi-éprouvette a été soumise à l'essai ultrasonique en transmission directe. Les mesures ont été réalisées dans les deux directions : longitudinale (parallèle à l'axe de chargement lors du coulage) et transversale. Un couplant acoustique (gel) a été appliqué sur les faces de contact pour assurer une bonne transmission des ondes.



Fig. 4.21 – Réalisation de l'essai aux ultrasons sur les échantillons découpés

Les résultats de vitesse de propagation (en m/s) pour chaque type d'éprouvette et chaque direction de mesure sont présentés dans les tableaux suivants.

Éprouvette sans vibration (NV)

Tab. 4.6 – Vitesses ultrasoniques — Éprouvette sans vibration (NV)

	Partie 4,5 cm		**Partie 5,5 cm**	
	Longitudinale	**Transversale**	**Longitudinale**	**Transversale**
Vitesse (m/s)	26,2	10,3	27,7	16,5

Éprouvette avec vibration manuelle (VM)

Tab. 4.7 – Vitesses ultrasoniques — Éprouvette avec vibration manuelle (VM)

	Partie 4,5 cm		**Partie 5,5 cm**	
	Longitudinale	**Transversale**	**Longitudinale**	**Transversale**
Vitesse (m/s)	31,5	13,5	68,7	22,2

Éprouvette avec table vibrante (TV)

Tab. 4.8 – Vitesses ultrasoniques — Éprouvette avec table vibrante (TV)

	Partie 4,5 cm		**Partie 5,55 cm**	
	Longitudinale	**Transversale**	**Longitudinale**	**Transversale**
Vitesse (m/s)	66,0	12,3	46,0	16,7

D'une manière générale, les vitesses de propagation longitudinales sont supérieures aux vitesses transversales pour tous les types d'éprouvettes, ce qui reflète l'anisotropie de la microstructure du béton liée à la direction de coulage et de compactage. L'éprouvette compactée sur table vibrante (TV) présente les vitesses longitudinales les plus élevées dans la partie de 4,5 cm (66,0 m/s), traduisant une meilleure cohésion interne du matériau.

4.11 Étude expérimentale : Influence du feu sur différents types de béton

4.11.1 Objectifs de l'étude

Cette campagne expérimentale a pour objectif d'analyser l'influence d'une exposition à un feu de type domestique — représentatif d'un incendie en milieu bâti — sur le comportement thermique de trois types de béton se distinguant par leur mode de mise en œuvre :

- **Béton non vibré (NV)** : béton de référence coulé sans compactage, présentant une porosité plus élevée.
- **Béton compacté par table vibrante (TV)** : béton mis en place avec une vibration mécanique à fréquence constante, assurant une compacité maximale.
- **Béton vibré manuellement (VM)** : béton compacté par piquage manuel, intermédiaire entre les deux autres.

Pour chaque type de béton, l'analyse porte sur :

- l'évolution des températures superficielles selon un profil radial défini par trois segments de mesure (P1, P2, P3) ;
- les températures au cœur de l'éprouvette, relevées aux points centraux M1, M2, M3 ;
- les gradients thermiques entre la surface exposée et le cœur de l'éprouvette.

La mesure des champs de température est réalisée par **caméra thermique infrarouge Testo 855**, permettant une cartographie précise et en temps réel de la distribution thermique en surface des éprouvettes.

4.11.2 Préparation des échantillons et conditions initiales

Description des échantillons

Trois échantillons, issus du découpage des éprouvettes décrit précédemment, ont été préparés pour l'essai thermique. Ils sont désignés comme suit :

- **M1** : demi-éprouvette issue du béton non vibré (référence NV) ;
- **M2** : demi-éprouvette issue du béton compacté sur table vibrante (TV) ;
- **M3** : demi-éprouvette issue du béton vibré manuellement (VM).



Fig. 4.22 – Les trois échantillons avant exposition au feu : M1 (non vibré), M2 (table vibrante), M3 (vibration manuelle)

Conditionnement initial et températures de référence

Avant toute exposition à la flamme, les éprouvettes ont été laissées à température ambiante pendant une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique. La température au centre de chaque échantillon a été mesurée par caméra infrarouge afin d'établir une ligne de base thermique, indispensable à la comparaison ultérieure des résultats.

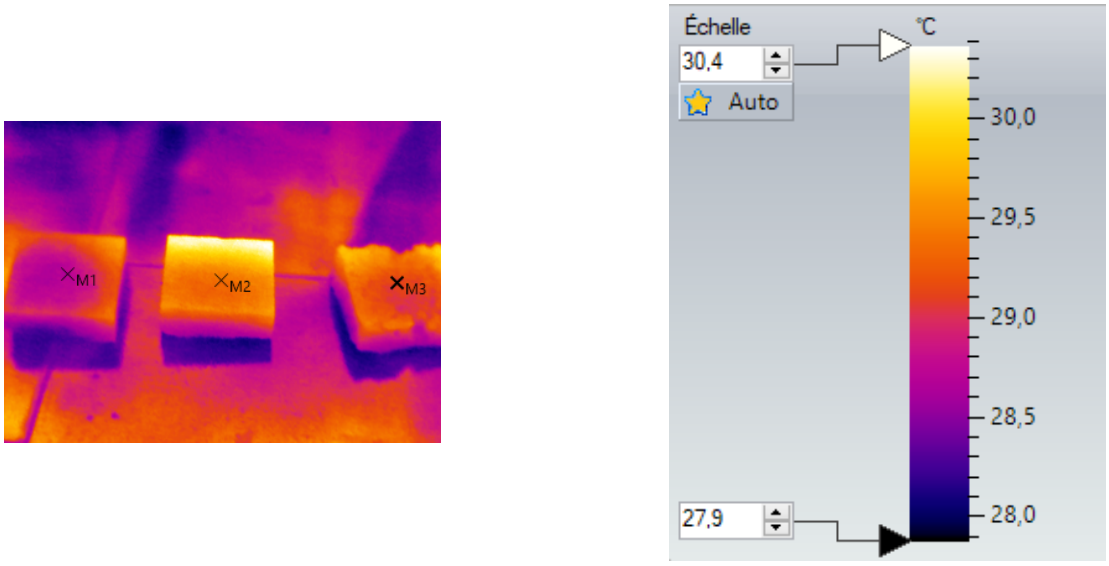


Fig. 4.23 – Mesure des températures initiales à l'ambiante avant exposition au feu

Tab. 4.9 – Températures initiales mesurées au centre des éprouvettes avant exposition au feu

Éprouvette	Type de béton	Température initiale [°C]
M1	Non vibré (NV)	28,7
M2	Table vibrante (TV)	29,4
M3	Vibration manuelle (VM)	29,1

Homogénéité des conditions initiales

Les températures initiales mesurées pour les trois échantillons sont très proches, avec une valeur moyenne de :

$$T_{\text{moy}} = \frac{28{,}7 + 29{,}4 + 29{,}1}{3} \approx 29{,}1 \text{ °C} \tag{4.5}$$

Cette quasi-homogénéité des conditions initiales ($\Delta T < 0{,}7$ °C entre les éprouvettes) garantit la validité de la comparaison des comportements thermiques lors de l'exposition au feu : les différences observées ultérieurement seront uniquement imputables à la nature et au mode de mise en œuvre des bétons, et non à des disparités de conditions initiales.

4.11.3 Dispositif expérimental

Génération de la flamme domestique

La flamme simulant un incendie domestique est produite à l'aide d'un brûleur à gaz propane. Ce type de feu est représentatif des incendies pouvant survenir dans les bâtiments d'habitation. Les échantillons sont exposés à la flamme sur leur face sciée, placée à distance constante du brûleur.

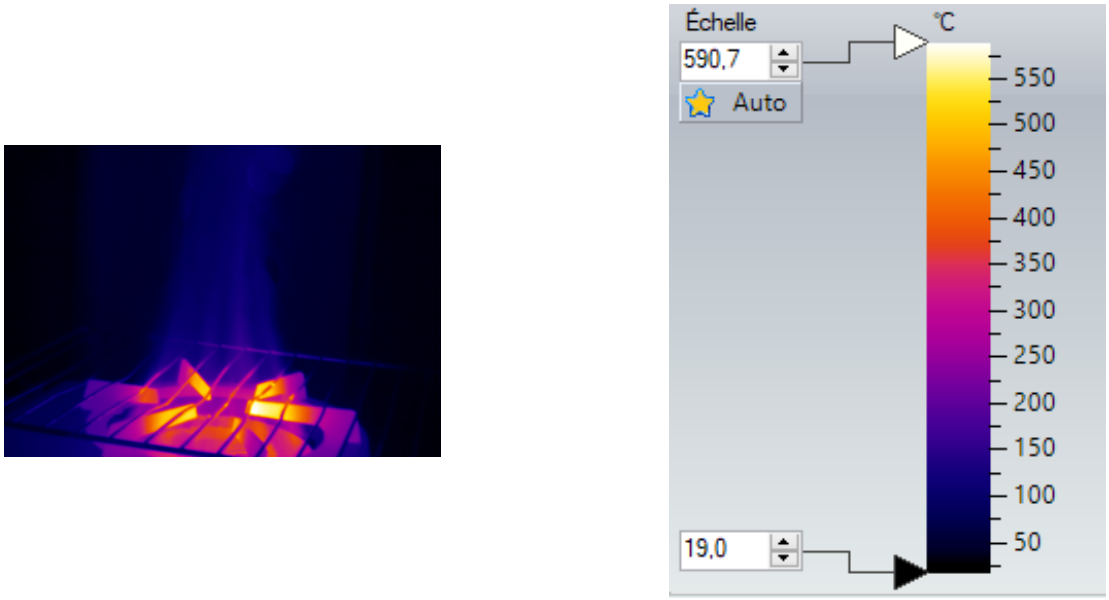


Fig. 4.24 – Dispositif de génération de la flamme domestique (brûleur à propane)

Points de mesure thermique

Les températures superficielles sont relevées le long d'un profil radial défini par trois segments de mesure **P1, P2, P3**. Simultanément, la température au cœur de chaque éprouvette est enregistrée aux points **M1, M2, M3**, situés respectivement au centre géométrique de chaque échantillon. Toutes les mesures sont effectuées par thermographie infrarouge.

4.11.4 Résultats des mesures thermiques pendant l'exposition au feu

Les mesures de température ont été réalisées à six instants successifs, couvrant une durée totale d'exposition d'environ une heure. Les résultats sont présentés sous forme de cartographies thermiques infrarouge et de tableaux de températures centrales.

Instant 1 : $t = 0{,}16$ **h (9 min 36 s)**

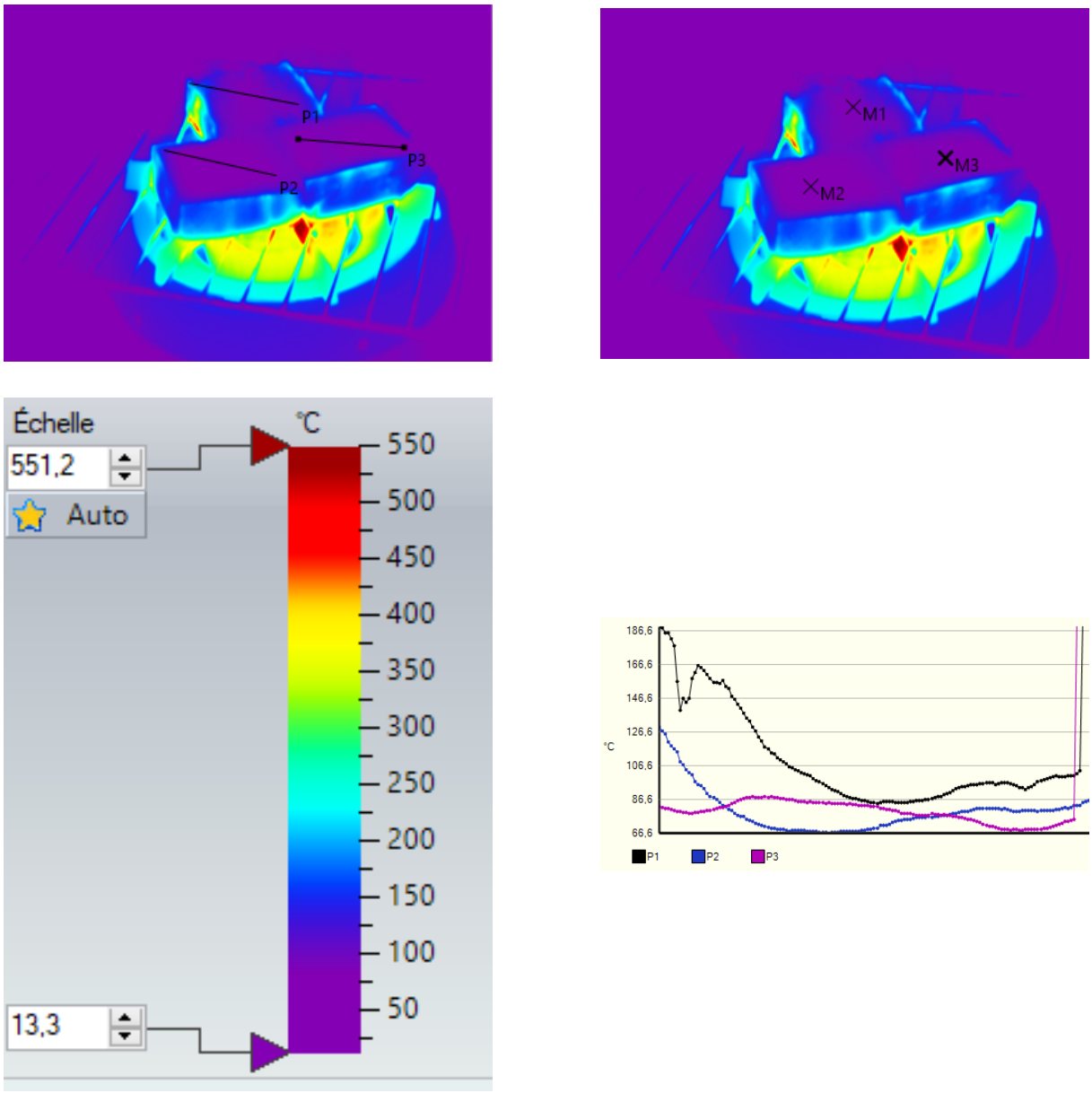


Fig. 4.25 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}16$ h (9 min 36 s)

Tab. 4.10 – Températures centrales à $t = 0{,}16$ h

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	86,2
M2	Table vibrante (TV)	65,0
M3	Vibration manuelle (VM)	83,8

Observation : Dès les premières minutes d'exposition, le béton compacté sur table vibrante (M2) présente la température centrale la plus basse (65,0 °C), soit un écart de plus de 21 °C par rapport au béton non vibré (M1 = 86,2 °C). Cet écart initial traduit une meilleure inertie

thermique du béton M2, probablement liée à sa compacité plus élevée qui ralentit la pénétration du flux thermique vers le cœur.

Instant 2 : $t = 0{,}21$ **h (12 min 36 s)**

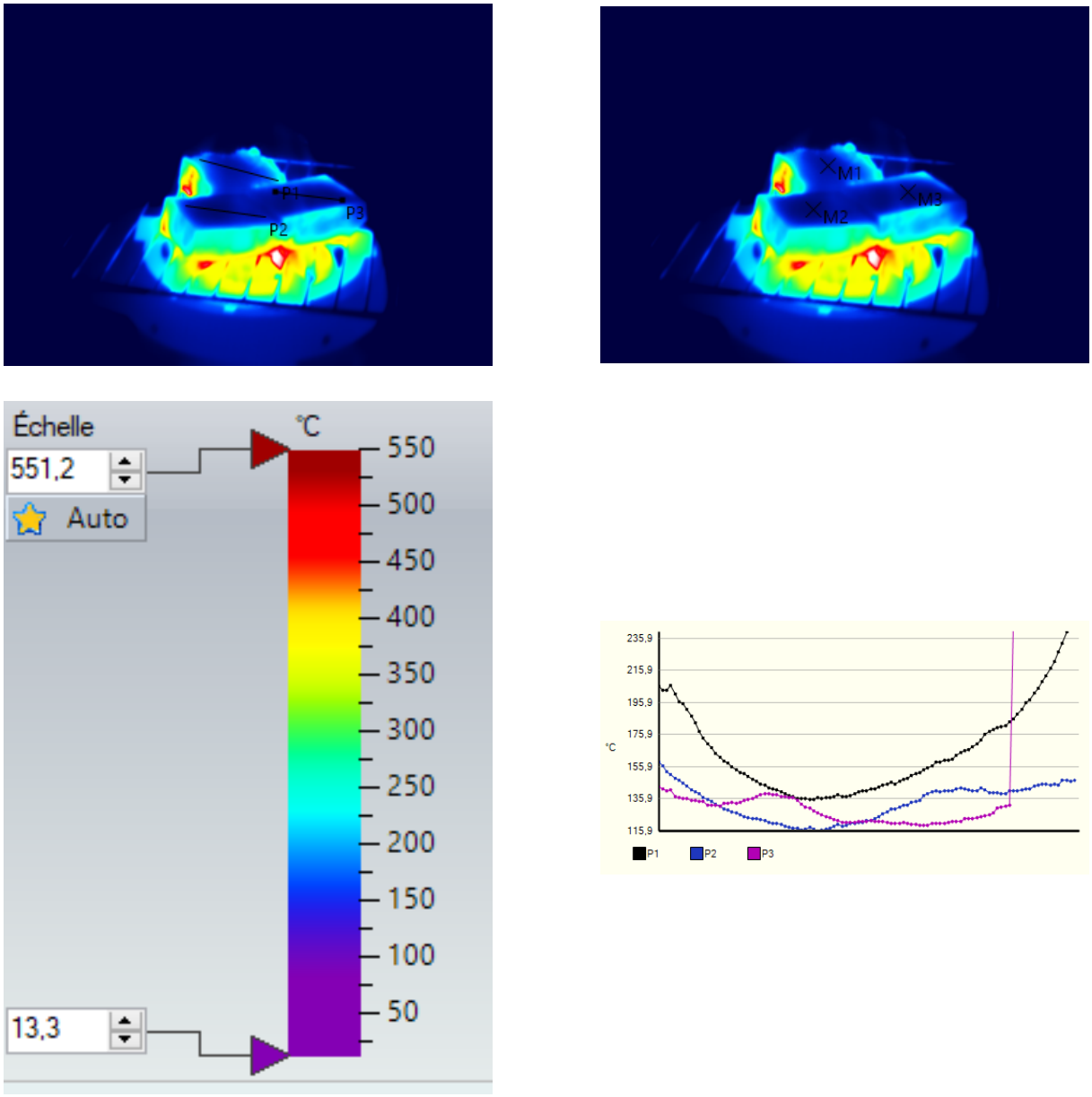


Fig. 4.26 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}21$ h (12 min 36 s)

Tab. 4.11 – Températures centrales à $t = 0{,}21$ h

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	135,4
M2	Table vibrante (TV)	119,4
M3	Vibration manuelle (VM)	123,7

Observation : La montée en température se poursuit de manière rapide pour les trois éprouvettes. M2 conserve l'avantage thermique (119,4 °C), mais l'écart avec M3 (123,7 °C) tend à se réduire. M1 reste le béton qui se réchauffe le plus vite en son cœur (135,4 °C), confirmant son caractère moins résistant thermiquement.

Instant 3 : $t = 0{,}23$ **h (13 min 48 s)**

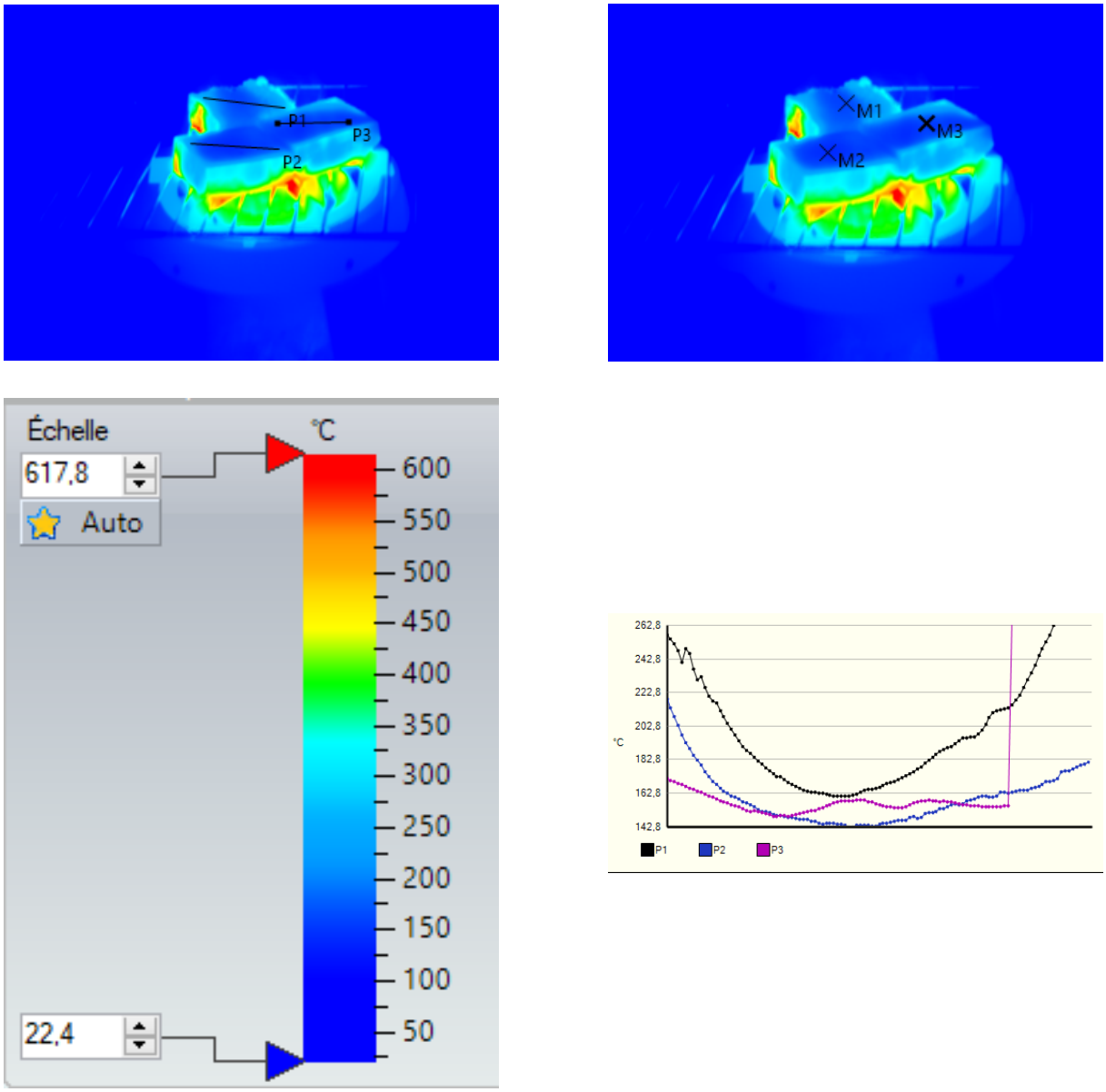


Fig. 4.27 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}23$ h (13 min 48 s)

Tab. 4.12 – Températures centrales à $t = 0{,}23$ h

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	163,7
M2	Table vibrante (TV)	143,5
M3	Vibration manuelle (VM)	161,8

Observation : À cet instant, M1 et M3 présentent des températures centrales très proches (163,7 °C et 161,8 °C respectivement), tandis que M2 reste encore nettement en dessous (143,5 °C). Le comportement de M1 et M3 confirme leur structure interne similaire, malgré la différence de compactage.

Instant 4 : $t = 0{,}28$ **h (16 min 48 s)**

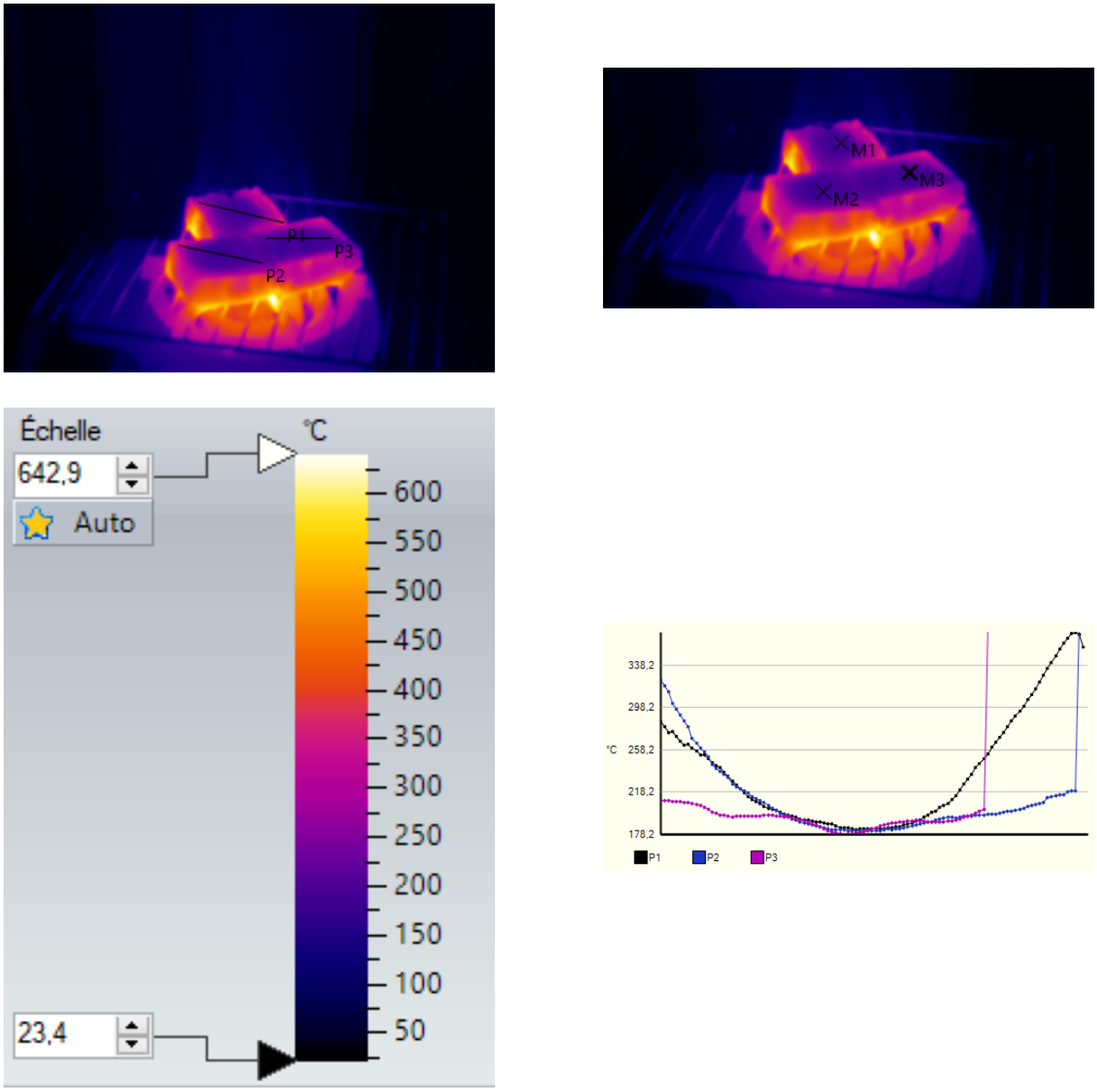


Fig. 4.28 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}28$ h (16 min 48 s)

Tab. 4.13 – Températures centrales à $t = 0{,}28$ h

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	186,2
M2	Table vibrante (TV)	183,4
M3	Vibration manuelle (VM)	181,6

Observation : À $t = 0{,}28$ h, les trois températures centrales se rapprochent sensiblement (entre 181,6 °C et 186,2 °C). L'avantage thermique initial du béton M2 s'est progressivement résorbé : la chaleur accumulée en surface a fini par diffuser vers le cœur, effaçant l'effet d'inertie constaté aux instants précédents.

Instant 5 : $t = 0{,}34$ h (20 min 24 s)

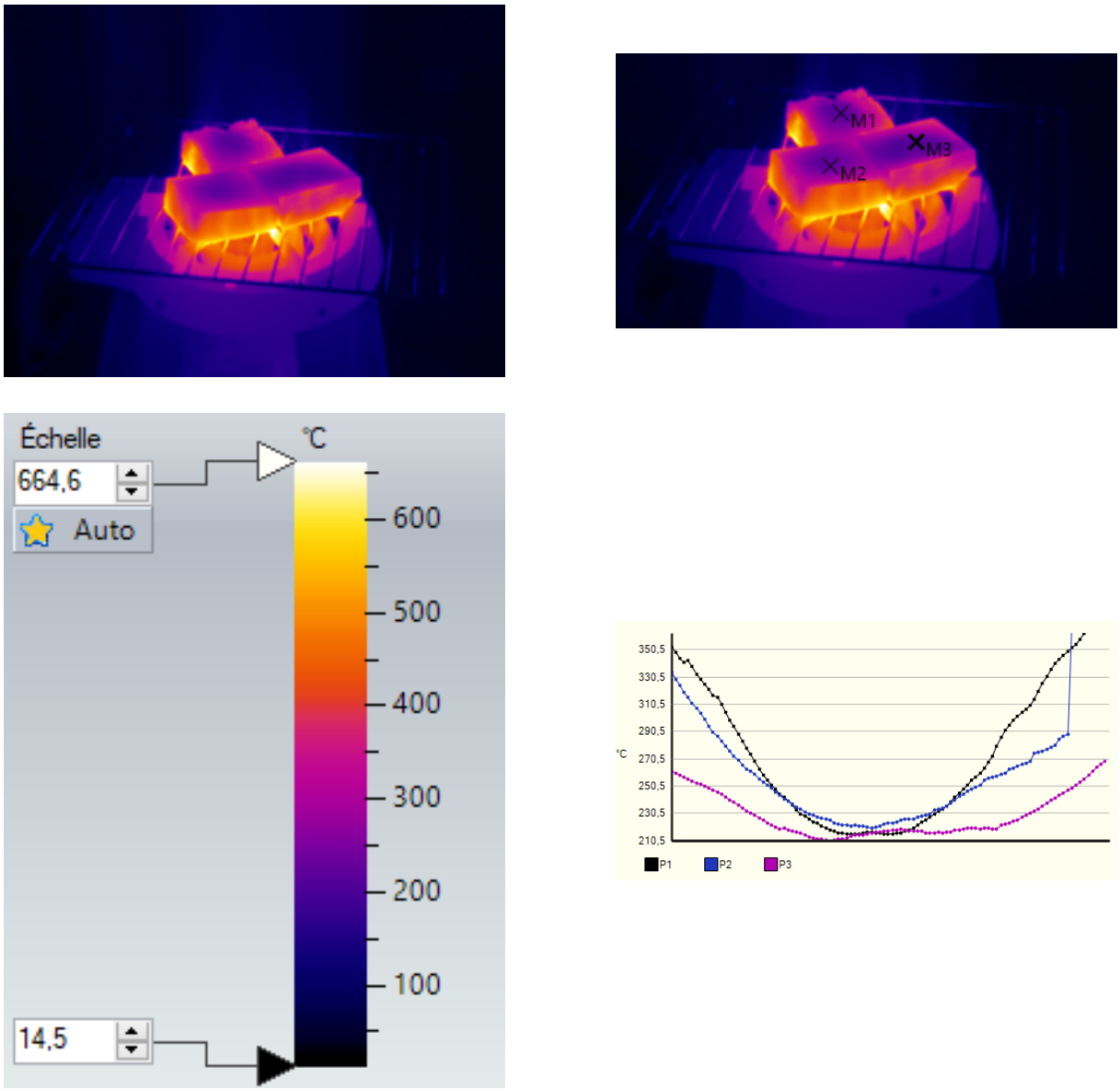


Fig. 4.29 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 0{,}34$ h (20 min 24 s)

Tab. 4.14 – Températures centrales à $t = 0{,}34$ h

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	215,1
M2	Table vibrante (TV)	226,1
M3	Vibration manuelle (VM)	219,3

Observation : À cet instant, une inversion notable se produit : le béton compacté sur table vibrante (M2) enregistre la température centrale la plus élevée (226,1 °C), dépassant désormais les deux autres éprouvettes. Ce phénomène peut s'expliquer par la capacité de stockage thermique plus importante d'un béton dense : une fois la phase transitoire dépassée, le béton plus compact accumule davantage de chaleur en profondeur.

Instant 6 : $t = 1{,}03$ h (61 min 48 s) — Fin de l'exposition

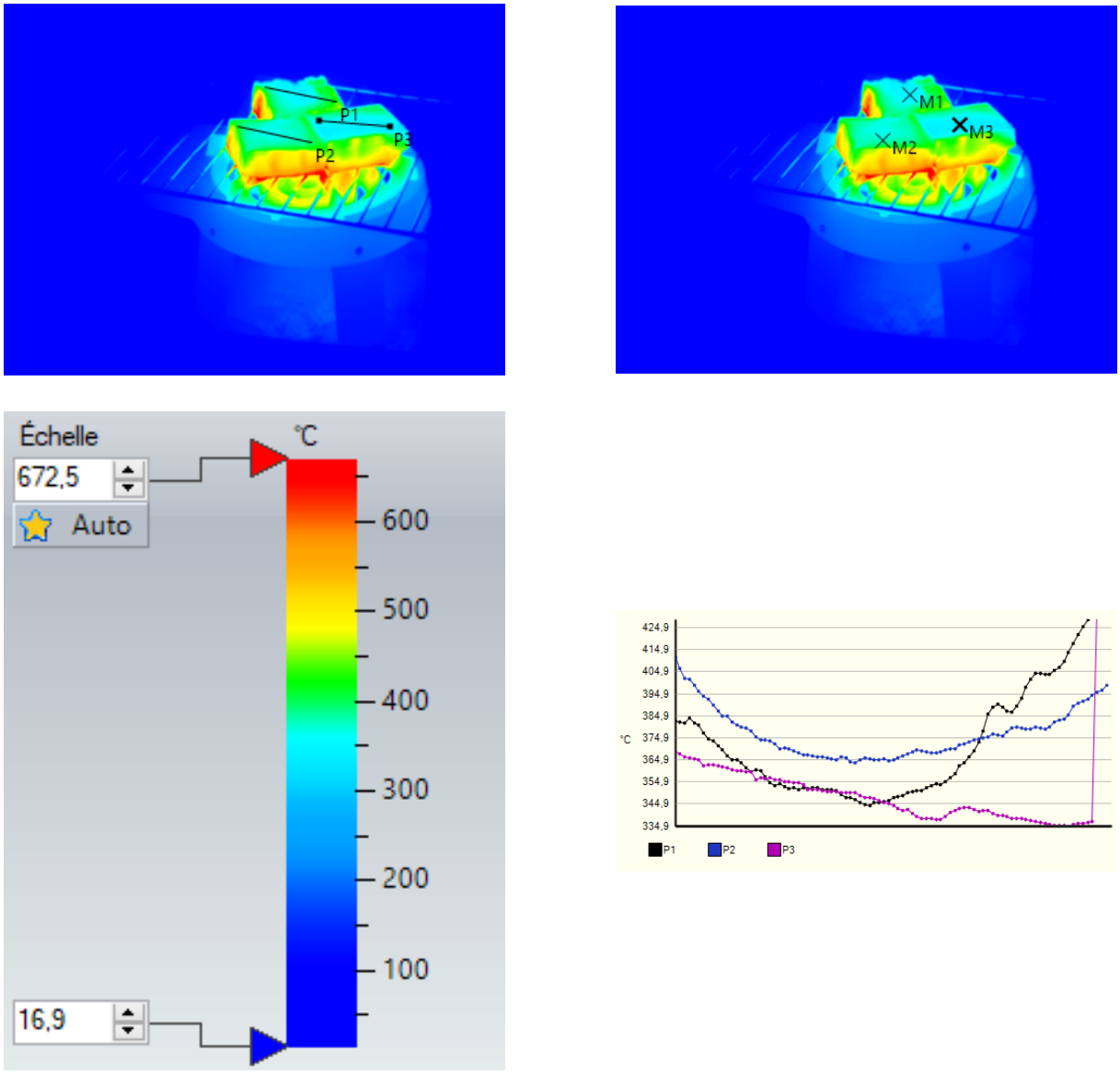


Fig. 4.30 – Cartographie thermique infrarouge à $t = 1{,}03$ h — fin de l'exposition au feu

Tab. 4.15 – Températures centrales à $t = 1{,}03$ h (fin d'exposition)

Éprouvette	Type de béton	Température [°C]
M1	Non vibré (NV)	347,2
M2	Table vibrante (TV)	375,0
M3	Vibration manuelle (VM)	345,4

Observation : Après environ une heure d'exposition continue à la flamme, le béton M2 (table vibrante) atteint la température centrale la plus élevée (375,0 °C), soit un écart d'environ 28 °C par rapport aux deux autres éprouvettes (347,2 °C et 345,4 °C). Ce résultat confirme l'inversion observée à l'instant 5 : le comportement initial d'inertie thermique supérieure du béton dense s'est transformé en une plus grande accumulation de chaleur sur le long terme, en raison de sa conductivité thermique plus élevée. À ces températures (supérieures à 300 °C), le béton subit des transformations microstructurales importantes : déshydratation des C-S-H, décomposition de la portlandite et début de décarbonatation des granulats calcaires, entraînant une dégradation significative des propriétés mécaniques.

4.11.5 Phase de refroidissement : immersion dans l'eau

Immédiatement après la fin de l'exposition au feu ($t = 1{,}03$ h), les éprouvettes ont été plongées dans un bain d'eau à température ambiante, simulant l'action des systèmes d'extinction d'incendie (jets d'eau des pompiers). Ce choc thermique brutal constitue une sollicitation supplémentaire sévère pour le béton, susceptible de provoquer un endommagement par fissurations internes liées aux gradients thermiques.

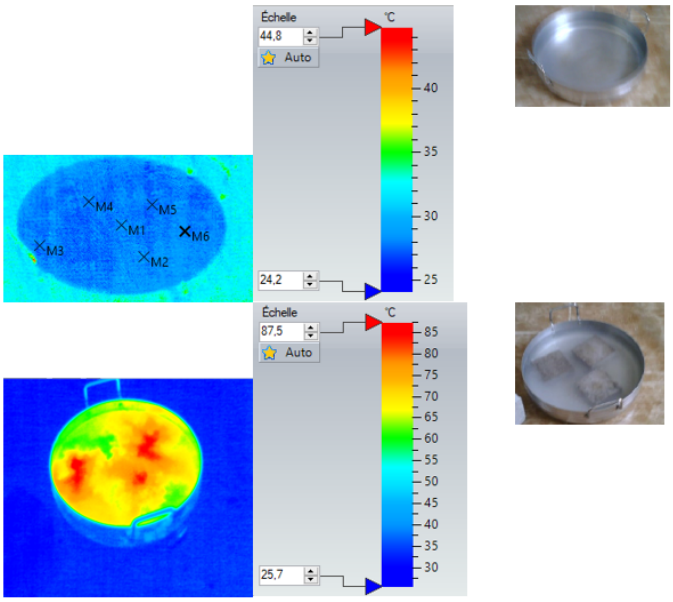


Fig. 4.31 – Immersion des éprouvettes dans le bain de refroidissement et mesure des températures de surface

Température du bain de refroidissement

La température du bain d'eau a été mesurée en plusieurs points afin de caractériser l'homogénéité du milieu de refroidissement.

Tab. 4.16 – Températures mesurées dans le bain de refroidissement

Point de mesure	Température [°C]
Point 1	28,1
Point 2	28,4
Point 3	28,0
Point 4	27,3
Point 5	27,4
Point 6	27,7
Moyenne	**27,8**

La température moyenne du bain est de **27,8 °C**, avec une très faible dispersion (< 1 °C), garantissant des conditions de refroidissement homogènes pour les trois éprouvettes.

Températures superficielles après immersion

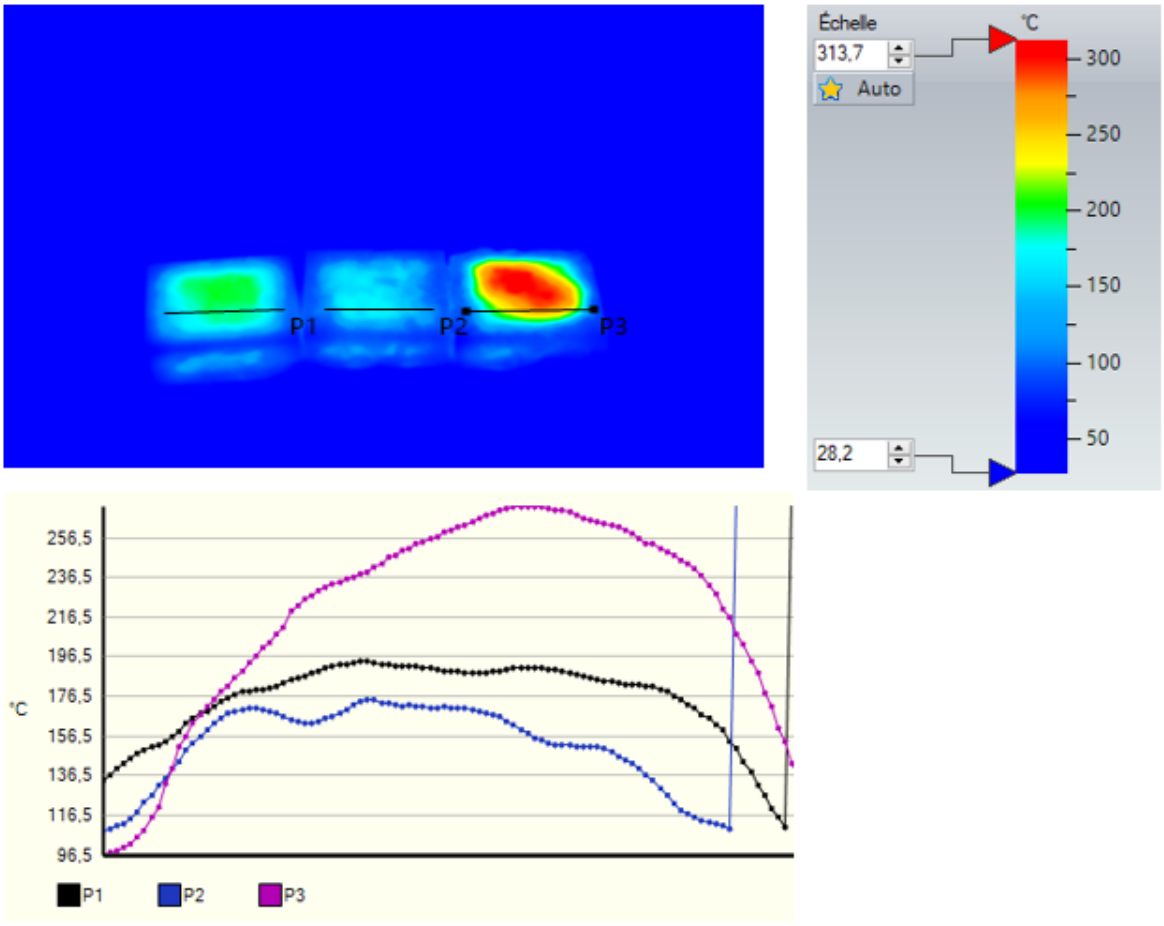


Fig. 4.32 – Cartographie thermique des températures superficielles après immersion dans le bain (points P1, P2, P3)

Tab. 4.17 – Statistiques des températures superficielles des éprouvettes après refroidissement

Point de mesure	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Moyenne [°C]
P1	110,4	194,1	174,8
P2	106,6	174,4	151,8
P3	96,5	272,6	213,0

Observation : La dispersion importante des températures de surface relevées après immersion (de 96,5 °C à 272,6 °C selon les points de mesure) met en évidence l'inhomogénéité du refroidissement : les zones directement en contact avec l'eau se refroidissent rapidement, tandis que le cœur des éprouvettes reste à haute température. Ces gradients thermiques sévères génèrent des contraintes internes élevées susceptibles d'induire ou d'aggraver la fissuration du béton. Ce phénomène est particulièrement critique pour les bétons denses (M2), qui stockent davantage de chaleur et présentent donc un différentiel thermique plus marqué lors du refroidissement brutal.

4.11.6 Synthèse et discussion

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors de cette campagne met en évidence les tendances suivantes :

- **En début d'exposition**, le béton compacté sur table vibrante (M2) présente la meilleure résistance à la pénétration thermique (température centrale la plus basse), grâce à sa compacité supérieure qui limite la diffusion de la chaleur vers le cœur.
- **Au-delà de 16 minutes d'exposition**, les trois bétons atteignent des températures centrales voisines, et le béton M2 commence à dépasser les autres, traduisant une inversion du comportement thermique.
- **En fin d'exposition (environ 1 heure)**, M2 accumule la chaleur la plus importante en profondeur (375,0 °C), conséquence de sa conductivité thermique plus élevée liée à sa faible porosité.
- **Lors du refroidissement par immersion**, les gradients thermiques sévères (jusqu'à 272 °C en surface) induisent des contraintes qui peuvent endommager la microstructure du béton, les fissures thermiques étant susceptibles de dégrader durablement les propriétés mécaniques résiduelles.

Ces résultats soulignent l'importance du mode de mise en œuvre sur le comportement thermique du béton en situation d'incendie, et rappellent que la compacité d'un béton — si elle est avantageuse mécaniquement — n'est pas nécessairement un facteur favorable en termes de résistance à long terme face au feu.

Chapitre 5

Conclusion générale

L'incendie constitue l'une des agressions les plus sévères que puissent subir les structures en béton armé. La montée rapide en température, les gradients thermiques élevés et la durée d'exposition peuvent entraîner une dégradation profonde et irréversible des propriétés mécaniques des matériaux, allant de la simple fissuration superficielle jusqu'à l'effondrement total de l'ouvrage. Face à ce constat, le présent mémoire s'est fixé pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension du comportement au feu des structures en béton, et de fournir des éléments méthodologiques et pratiques pour l'optimisation des solutions de protection incendie.

Sur le plan théorique et normatif, nous avons rappelé les bases physico-chimiques de l'incendie — triangle du feu, modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement), classes de feux selon la norme NF EN 2, et phases de développement d'un sinistre. L'analyse des actions thermiques, conduite à partir des Eurocodes 1 et 2, a permis de quantifier la dégradation des propriétés mécaniques du béton et de l'acier en fonction de la température. Les coefficients de réduction normalisés montrent que le béton perd 40 % de sa résistance à 500 °C et plus de 85 % à 800 °C, tandis que l'acier de précontrainte perd 70 % de sa limite d'élasticité dès 400 °C. La méthode simplifiée de l'isotherme 500 °C, largement utilisée dans la pratique courante, offre un outil robuste pour évaluer la section résiduelle efficace d'un élément exposé au feu. Par ailleurs, l'étude des moyens de protection incendie a souligné la complémentarité indispensable entre protection passive — enrobage des armatures, choix des granulats calcaires, incorporation de fibres de polypropylène contre le spalling, revêtements rapportés — et protection active — détection, alarme, sprinklers, désenfumage —, dans le cadre réglementaire des Eurocodes et des normes nationales.

Sur le plan expérimental, la campagne menée sur éprouvettes cubiques a apporté des résultats originaux concernant l'influence du mode de compactage sur le comportement thermique du béton. Trois bétons de formulation identique (350 kg/m³ de ciment, rapport E/C = 0,45) mais compactés différemment — sans vibration (NV), par vibration manuelle (VM), et sur table vibrante (TV) — ont été soumis à une flamme domestique simulée par brûleur à propane, avec suivi thermographique infrarouge. Les mesures ont mis en évidence plusieurs phénomènes remarquables. En début d'exposition (9 minutes), le béton compacté sur table vibrante présente la température centrale la plus basse (65,0 °C contre 86,2 °C pour le béton non vibré), traduisant

une meilleure inertie thermique initiale liée à sa compacité. Cependant, à partir de 20 minutes d'exposition, une inversion de comportement s'opère : le béton TV accumule davantage de chaleur en profondeur, atteignant 375,0 °C après une heure, soit près de 30 °C de plus que les deux autres bétons. Ce résultat, contre-intuitif en première analyse, s'explique par la conductivité thermique plus élevée des bétons denses, qui favorise à long terme la pénétration et le stockage de la chaleur vers le cœur de l'éprouvette. Enfin, la phase de refroidissement brutal par immersion a généré des gradients thermiques sévères (jusqu'à 272 °C en surface), susceptibles d'endommager la microstructure du béton par fissuration thermique.

Ces résultats expérimentaux confirment que la compacité d'un béton — si elle est favorable aux performances mécaniques à température ambiante — n'est pas nécessairement un atout en situation d'incendie prolongé. Ils soulignent également l'importance de considérer non seulement la résistance résiduelle après exposition, mais aussi la cinétique de pénétration de la chaleur et l'effet du refroidissement, souvent négligé dans les études classiques.

Sur le plan pratique, ce mémoire propose plusieurs recommandations pour les ingénieurs en génie civil. Pour les structures courantes (bâtiments d'habitation, bureaux, ERP), l'application des méthodes tabulaires de l'Eurocode 2 — avec un enrobage minimal adapté à la classe de résistance au feu requise (R30 à R120) — constitue une approche simple et fiable. Pour les ouvrages plus sensibles ou les bétons à haute résistance, il est impératif de prévoir des dispositions complémentaires : incorporation de fibres de polypropylène (1 à 2 kg/m³) pour limiter le risque de spalling, choix de granulats calcaires plutôt que siliceux, et vérification par la méthode de l'isotherme 500 °C. Lorsque la protection passive intrinsèque s'avère insuffisante (enrobage limité, géométrie contrainte), des protections rapportées — enduits vermiculite, plaques de plâtre, peintures intumescentes — peuvent être ajoutées. Enfin, la complémentarité avec les systèmes actifs (détection précoce, sprinklers) doit être systématiquement étudiée, car elle peut, dans certains cas, permettre de réduire les exigences de protection passive dans le cadre d'une approche performantielle (ingénierie du feu).

Ce travail présente néanmoins certaines limites qu'il convient de mentionner. Sur le plan expérimental, les essais ont été conduits sur des éprouvettes de petite taille (10 cm d'arête), ce qui ne restitue pas complètement les effets d'échelle présents dans les structures réelles (poutres, poteaux, dalles de grande dimension). De plus, la flamme domestique générée par brûleur à propane, bien que représentative d'un incendie naissant, ne reproduit pas la courbe de feu normalisée ISO 834 utilisée dans les calculs réglementaires. Enfin, l'étude n'a porté que sur un seul type de béton (rapport E/C = 0,45, granulats siliceux) ; les résultats pourraient différer avec des bétons de compositions différentes (granulats calcaires, ajouts minéraux, fibres).

Ces limites ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de recherche. Il serait intéressant d'étendre la campagne expérimentale à des éprouvettes de plus grandes dimensions (30 cm d'arête ou éléments linéaires), afin de valider les effets d'échelle. L'utilisation d'un four radiant programmable suivant la courbe ISO 834 permettrait de se rapprocher des conditions normatives et de faciliter la comparaison avec les prévisions des Eurocodes. Par ailleurs, l'étude de bétons formulés avec des granulats calcaires, des cendres volantes ou du laitier de haut fourneau pourrait mettre en évidence des comportements thermiques différenciés. Enfin, la mise en place

d'une modélisation numérique par éléments finis (couplage thermique-mécanique) permettrait de généraliser les résultats expérimentaux et de développer des abaques prédictifs pour les bureaux d'études.

En définitive, ce mémoire apporte une contribution à la fois théorique, normative et expérimentale à la problématique de la résistance au feu des structures en béton armé. Il montre que la sécurité incendie ne saurait se réduire à une simple application de règles préétablies, mais nécessite une approche intégrée, combinant une connaissance fine des matériaux, une validation expérimentale et une optimisation technico-économique des solutions de protection. C'est à cette condition que nous pourrons concevoir des ouvrages à la fois plus sûrs, plus durables et plus performants face au risque incendie.

Bibliographie

1. ISO 13943:2017, Sécurité au feu — Vocabulaire.
2. EN 1991-1-2, Eurocode 1 : Actions sur les structures — Partie 1-2 : Actions générales — Actions sur les structures exposées au feu.
3. EN 1992-1-2, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton — Partie 1-2 : Règles générales — Calcul du comportement au feu.
4. NF EN 1992-1-2/NA, Annexe nationale à l'Eurocode 2.
5. BAŽANT, Z. P. et KAPLAN, M. F., Concrete at High Temperatures : Material Properties and Mathematical Models. Harlow : Longman Group Limited, 1996.
6. NEVILLE, A. M., Properties of Concrete. 5th Edition. Harlow : Pearson Education Limited, 2011.
7. ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2016.
8. ISO 834-1:1999, Essais de résistance au feu — Éléments de construction — Partie 1 : Exigences générales.
9. KHOURY, G. A., Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2, No. 4, 2000, pp. 429–447.
10. FIB Bulletin 38, Fire Design of Concrete Structures – Structural Behaviour and Assessment. Lausanne : Fédération Internationale du Béton, 2007.
11. HERTZ, K. D., Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, No. 2, 2003, pp. 103–116.
12. KHOURY, G. A., Compressive Strength of Concrete at High Temperatures : A Reassessment. Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 161, 1992, pp. 291–309.
13. NF EN 1991-1-2, Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu, AFNOR, 2007.
14. NF EN 1992-1-2, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu, AFNOR, 2011.

15. U. Schneider, *Concrete at high temperatures*, RILEM, 1996.

16. J. Krour, *Comportement au feu des structures en béton armé*, Presses des Ponts, 2015.