

Analyse thermique au feu

Champ de température

Tutoriel SectionPro · Profils de température transitoires
dans une section soumise au feu, par éléments finis

BridgeKernel · 2026

Introduction

La vérification au feu d'une section en béton armé repose d'abord sur la connaissance de la température en chaque point de la section après une durée d'exposition donnée, par exemple 30, 60, 90 ou 120 minutes. Cette distribution spatiale, le champ thermique, gouverne la suite du calcul : la chute de résistance du béton et des aciers, puis la capacité portante résiduelle, en découlent directement. Elle constitue néanmoins une étape thermique autonome, que SectionPro résout et restitue indépendamment de la vérification mécanique.

Le présent article se limite à cette étape thermique. Il en rappelle les fondements, décrit le modèle retenu dans SectionPro, puis confronte les résultats aux profils de référence de l'Annexe A de l'EN 1992-1-2.

Le problème thermique

Le transfert de chaleur transitoire dans la section obéit à l'équation de la chaleur non linéaire :

$$\rho(\theta) \cdot c_p(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\theta) \nabla \theta)$$

Les propriétés thermiques du béton varient avec la température. La conductivité $\lambda(\theta)$ décroît de façon monotone, tandis que la chaleur massique $c_p(\theta)$ présente un pic marqué autour de 115 °C, associé à la vaporisation de l'eau libre et d'amplitude d'autant plus grande que la teneur en humidité est élevée. Ce pic absorbe une part importante du flux et retarde nettement la progression du front de chaleur vers le cœur de la section.

Sur les faces exposées, le flux net combine convection et rayonnement :

$$\dot{h}_{\text{net}} = \underbrace{\alpha_c (\theta_g - \theta_m)}_{\text{convection}} + \underbrace{\Phi \varepsilon_m \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]}_{\text{rayonnement}}$$

où θ_g est la température des gaz (courbe de feu), θ_m la température de surface, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $\varepsilon_m = 0.7$ (valeurs par défaut, ajustables). Les faces non exposées sont supposées adiabatiques ($\partial\theta/\partial n = 0$).

La courbe de feu normalisée ISO 834 donne la température des gaz :

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad [t \text{ en min}]$$

Ces équations font intervenir plusieurs paramètres : la courbe de feu, les lois $\lambda(\theta)$ et $c_p(\theta)$ du matériau, les coefficients d'échange en surface. Ils prennent par défaut les valeurs de l'EN 1992-1-2 et restent modifiables en entrée.

Le champ thermique dans SectionPro

SectionPro résout le champ thermique sur une section de forme arbitraire, qu'elle soit pleine, évidée ou composée de plusieurs matériaux, sans se restreindre aux géométries tabulées de la norme. Ses principales capacités :

- **Courbes de feu.** ISO 834 (feu normalisé), hydrocarbure, courbe extérieure, ou courbe définie par l'utilisateur sous forme de points temps-température.
- **Exposition par face.** Chaque face est exposée ou non de façon indépendante. Une poutre coulée dans une dalle compte trois faces au feu, la face supérieure restant adiabatique ; un poteau en compte quatre.
- **Protections.** Une couche de protection peut être définie face par face (épaisseur d_p , conductivité λ_p , masse volumique ρ_p , chaleur massique $c_{p,p}$) : plaques de plâtre, enduits projetés ou isolants. Sa résistance thermique entre dans la condition aux limites.
- **Matériaux et géométrie.** Béton siliceux ou calcaire, teneur en humidité, masse volumique et borne de conductivité sont réglables. La section peut comporter des trous et des cavités, des zones multi-matériaux et des aciers noyés.

On obtient, à chaque instant demandé, le champ de température complet : carte d'isothermes, températures aux armatures et grandeurs synthétiques (température maximale en peau, température moyenne, température au cœur). Ces données servent ensuite d'entrée au calcul de capacité résiduelle, qui fera l'objet de l'article suivant.

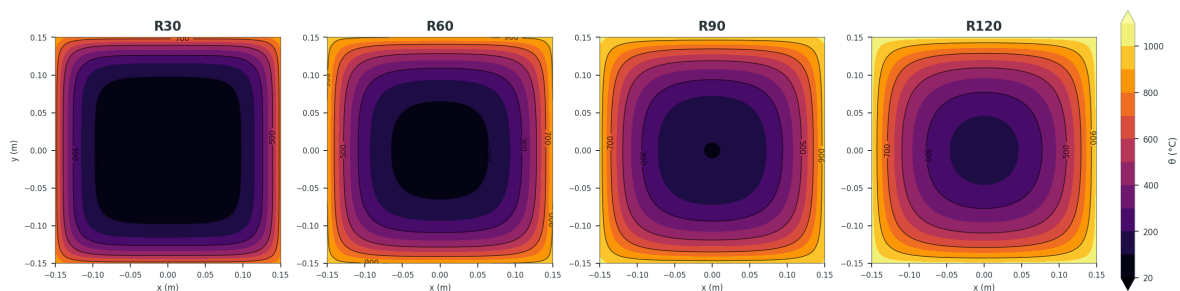


Fig. 1. – Exemple de champ calculé par SectionPro : poteau 300×300 exposé sur ses quatre faces, isothermes aux durées R30 / R60 / R90 / R120.

Validation selon l'Annexe A de l'EN 1992-1-2

L'Annexe A de l'EN 1992-1-2 fournit des profils de température de référence pour des sections courantes exposées au feu normalisé ISO 834 : une dalle (Fig A.2), des poutres (Fig A.3 à A.10) et des poteaux (Fig A.11 à A.20). Ces profils ont été établis pour une teneur en humidité de 1,5 %

et la borne inférieure de conductivité. Ce sont ces hypothèses que nous adoptons comme étalon de validation.

Deux géométries représentatives de la norme sont reproduites avec ces mêmes hypothèses : la dalle, cas unidimensionnel exposé sur une face, et le poteau exposé sur ses quatre faces, pour lequel la norme fournit directement la position de l'isotherme 500 °C qui délimite le béton considéré comme résistant. Sur chaque diagramme, les isothermes calculées par SectionPro, en rouge, sont superposées aux profils publiés dans l'Annexe A, en noir, tracés dans le même repère. La confrontation porte ainsi directement sur les mêmes courbes.

— EN 1992-1-2, Annexe A — SectionPro

Le transfert dans la dalle reste quasi unidimensionnel depuis la face exposée, tandis que le poteau développe un champ doublement symétrique dont le cœur froid se rétrécit à mesure que l'exposition se prolonge.

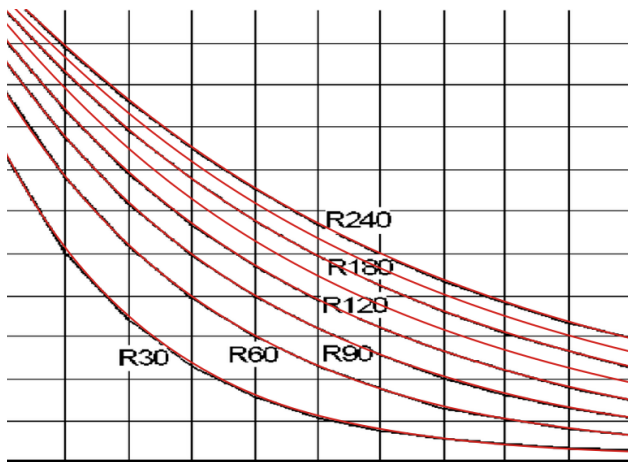


Fig. 2. – Dalle $h = 200$ mm exposée en sous-face, de R30 à R240 (profondeur 0 à 100 mm en abscisse, température en ordonnée).

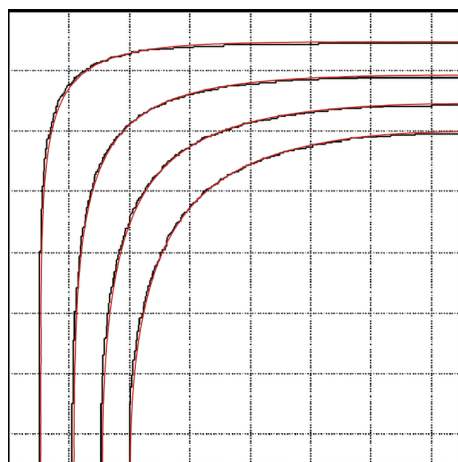


Fig. 3. – Poteau 300×300 , isotherme 500 °C à R30, R60, R90 et R120 (quart de section, 0 à 150 mm de côté).

Bilan de validation. Sur la dalle, cas unidimensionnel de référence, le profil calculé se superpose à celui de la Fig A.2 sur toute la plage d'enrobages utiles comme jusqu'au cœur. Sur le poteau exposé sur ses quatre faces, la position de l'isotherme 500 °C suit la norme à chaque durée. Le solveur thermique est ainsi validé sur ces deux configurations d'exposition.

Exemple d'application

Au-delà des formes tabulées par la norme, SectionPro traite une géométrie quelconque. Les deux exemples ci-dessous, une section hexagonale et une section circulaire, sont exposés sur tout leur pourtour.

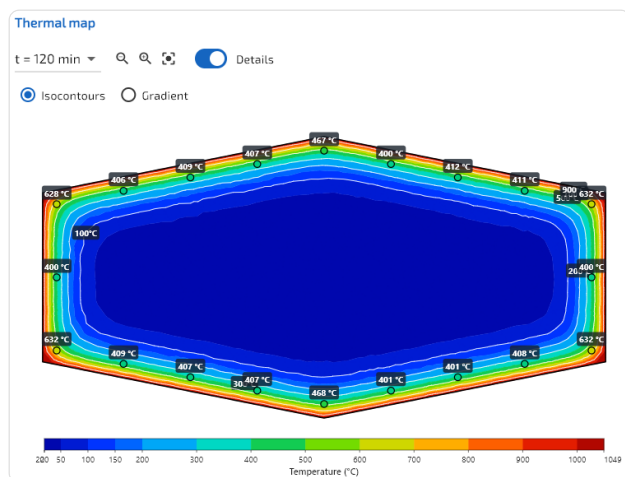


Fig. 4. – Section hexagonale, champ de température à $t = 120$ min. Le mode « Details » affiche les températures aux armatures (pastilles) : noyau central froid, angles chauds en peau.

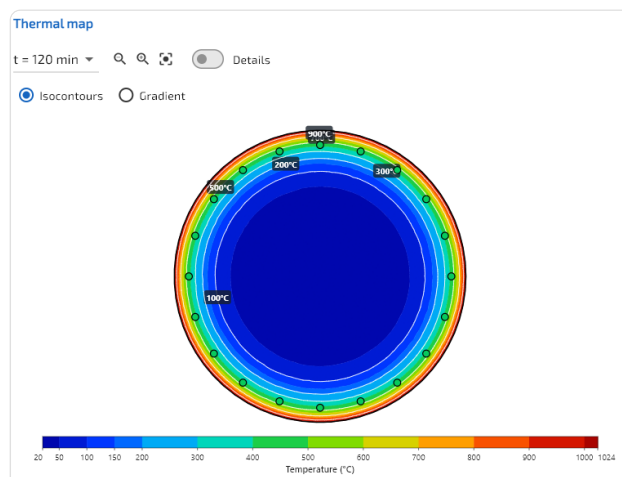


Fig. 5. – Section circulaire exposée sur tout son pourtour, isothermes à $t = 120$ min. Les contours repères (100, 200, 300, 500 et 900 °C) sont tracés en blanc.

Performance

Le calcul du champ thermique est quasi instantané : moins d'une seconde, y compris pour les durées de résistance les plus longues. Les temps mesurés sur les cas de validation sont reportés ci-dessous.

Section	Faces	Durée simulée	Temps de calcul
Poutre 300×160	3	R90 (3 instants)	0,12 s
Poteau 300×300	4	R120 (4 instants)	0,35 s
Poutre 600×300	3	R120 (4 instants)	0,52 s
Dalle 200	1	R240 (8 instants)	0,57 s

Export

Le champ thermique s'exporte sous forme d'image (carte d'isothermes, en thème clair ou sombre), au format CSV (coordonnées des nœuds, températures nodales à chaque instant, températures d'armatures) et dans la note de calcul PDF produite par SectionPro. Les instants de sortie sont libres, uniformes ou choisis un à un, ce qui permet de viser précisément les durées de résistance réglementaires R30, R60, R90 et R120.

Conclusion

Le champ thermique constitue le socle de toute vérification au feu. SectionPro le calcule par éléments finis transitoires, en résolvant l'équation de la chaleur non linéaire qui couple la conductivité dépendante de la température, la chaleur massique avec pic d'humidité et le rayonnement en θ^4 , pour une géométrie quelconque et une exposition définie face par face, protections comprises. Les lois matériaux et la courbe de feu y prennent par défaut les valeurs de l'EN 1992-1-2, modifiables en entrée.

La confrontation aux profils de l'Annexe A conforte cette démarche : le profil calculé se superpose à la référence sur le cas unidimensionnel de la dalle, et la position de l'isotherme 500 °C dans le poteau

exposé sur ses quatre faces suit la norme à chaque durée. Le champ ainsi obtenu fournit une base fiable pour le calcul de la capacité portante résiduelle en situation d'incendie.