

Analyse thermo-mécanique au feu

Capacité résiduelle de la section chauffée

Tutoriel SectionPro · Résistance résiduelle d'une section au feu,
par la méthode de l'isotherme 500 °C de l'EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Introduction

Le calcul au feu se déroule en deux étapes successives. La première étape est thermique, comme décrit dans l'article précédent : SectionPro résout le problème de transfert de chaleur sur la section réelle et restitue le champ de température dans le béton, les armatures et tout profilé métallique noyé, à chaque instant demandé.

La seconde étape est mécanique. Pour chaque durée de feu retenue, les modules mécaniques partent du champ de température correspondant et en déduisent la section résistante utilisée pour la vérification. La contribution du béton est réduite selon la zone chauffée de la section, tandis que les armatures et le profilé métallique noyé reçoivent des propriétés mécaniques dépendantes de la température. La section chauffée ainsi obtenue est ensuite analysée dans le même esprit qu'une section à température ambiante : vérification d'un cas de charge, courbes et surface d'interaction, distances, courbes de raideur et temps de ruine.

La méthode de l'isotherme 500 °C

Pour le béton, SectionPro applique la méthode de l'isotherme 500 °C de l'EN 1992-1-2. Le béton porté au-delà de 500 °C est écarté ; le béton resté sous 500 °C est conservé avec sa pleine résistance à température ambiante et sa loi parabole-rectangle habituelle ($\varepsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). La géométrie résistante se réduit donc à la zone délimitée par l'isotherme 500 °C, qui se contracte à mesure que l'exposition se prolonge.

Chaque armature est réduite à sa propre température : sa limite d'élasticité et son module deviennent $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ et $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, avec les facteurs de réduction de l'EN 1992-1-2 (tableaux 3.2a et 3.2b). Une barre située hors de l'isotherme 500 °C n'est pas retirée ; elle contribue encore avec sa résistance réduite.

Le même traitement s'applique à un profilé structural noyé lorsqu'il est maillé lors de l'étape thermique : chaque élément d'acier est lu à sa température, réduit par $k_y(\theta)$ et $k_E(\theta)$, et le béton qu'il occupe est retiré afin de ne pas être compté deux fois. Une fois la section chauffée construite, la vérification mécanique se déroule comme une analyse de section standard, le feu affectant la géométrie

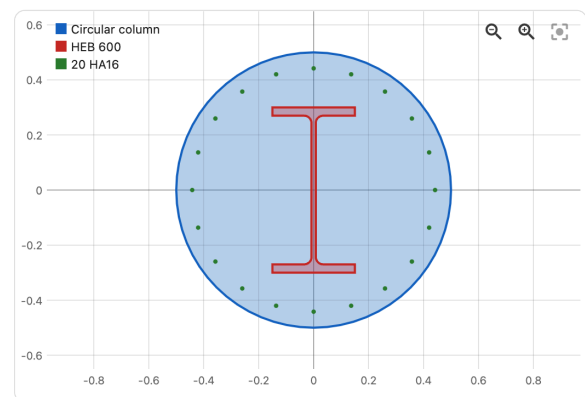
résistante et les lois de matériaux utilisées à l'instant retenu. Sur cette section réduite, SectionPro effectue :

- Vérification de section : l'équilibre d'un cas de charge, avec le champ complet de contraintes et de déformations à un instant donné.
- Courbe d'interaction : la frontière de résistance dans un plan d'efforts choisi, avec une composante figée.
- Surface d'interaction : le domaine de résistance 3D complet dans (N, M_z, M_y) .
- Distances : le taux d'utilisation de chaque charge par projection sur cette surface.
- Raideur : la relation moment-courbure et la raideur de flexion sécante et tangente.
- Temps de ruine : le temps d'exposition auquel la charge sort du domaine de résistance.

La section exemple

Les calculs sont illustrés sur le poteau mixte livré avec les exemples SectionPro :

- Section circulaire, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Profilé HEB 600 noyé en acier S235.
- 20 barres Ø16 B500B sur le pourtour.
- Exposition au feu normalisé ISO 834.



Vérification de section

Pour une charge (N, M_z, M_y) spécifiée pour la vérification, SectionPro détermine l'état de déformation $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, une déformation axiale et deux courbures, qui satisfait l'équilibre interne avec les efforts imposés. Il résout ce problème de façon itérative, en intégrant les contraintes sur la section chauffée à chaque étape : le béton conservé sur ses contours, les barres et le profilé maillé comme des fibres, chacun régi par sa loi réduite.

À partir de l'état de déformation convergé, SectionPro extrait les contraintes et déformations en chaque fibre, la position de l'axe neutre et un taux d'utilisation défini comme le rapport de la déformation de la fibre déterminante à la déformation ultime du matériau correspondant. Un taux d'utilisation inférieur à 1 signifie que la charge est reprise ; une valeur égale ou supérieure à 1 signifie que la section réduite ne peut plus l'équilibrer.

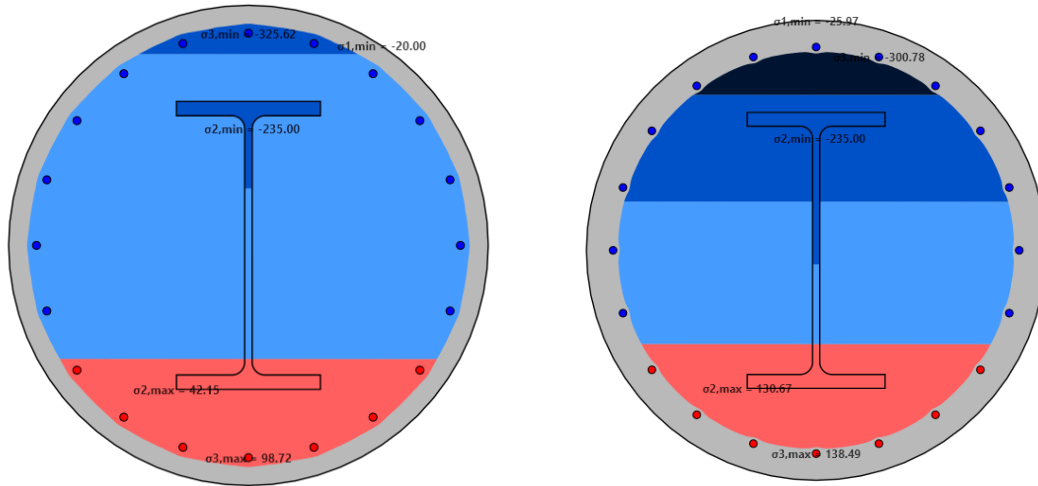


Fig. 1. – État convergé des contraintes et déformations à R120 et R240 sous la charge $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN et kN · m.

Dans l'exemple, la charge est $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN et kN · m. Les vues R120 et R240 placent la même charge sur une section dont l'aire résistante diminue avec l'exposition : le béton intérieur à l'isotherme 500 °C reprend la compression, tandis que les barres et le profilé noyé, encore froids, équilibrent la flexion. À R240, la section atteint la ruine par écrasement du béton conservé.

Courbe d'interaction N–Mz

La courbe d'interaction $N-M_z$ est la frontière de résistance de la section en flexion uniaxiale : l'ensemble des couples effort normal – moment fléchissant qu'elle peut reprendre autour de l'axe étudié. Recalculées pour chaque durée de feu sur la section réduite, les courbes superposées donnent une lecture directe de la capacité perdue par l'échauffement.

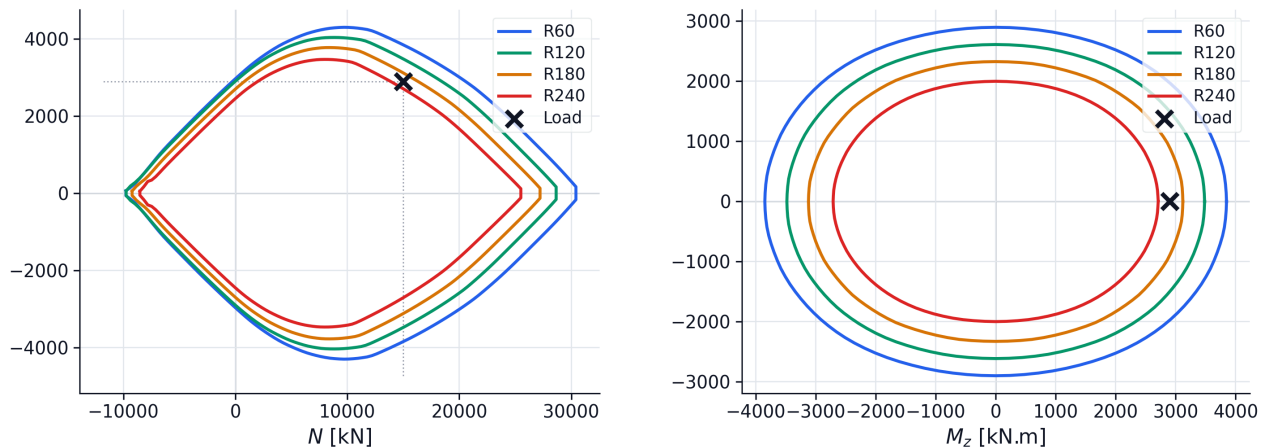


Fig. 2. – Courbes d'interaction au feu $N-M_z$ et M_y-M_z sous ISO 834.

Les figures montrent la perte de capacité à mesure que la température augmente : les domaines de résistance se contractent progressivement avec la durée de feu. Pour la charge retenue, la ruine survient entre R180 et R240.

Surface d'interaction 3D

Sous flexion déviée, la résistance ne peut plus être décrite par une seule courbe plane : elle devient une surface fermée dans l'espace (N, M_z, M_y) , le domaine de résistance de la section. SectionPro calcule

cette surface directement à partir des états de déformation ultimes de la section, pris dans toutes les directions de flexion. Construite sur la section chauffée, elle permet de vérifier directement une charge biaxiale quelconque, sans la ramener à un axe privilégié : une charge intérieure à la surface est reprise, une charge extérieure dépasse la capacité.

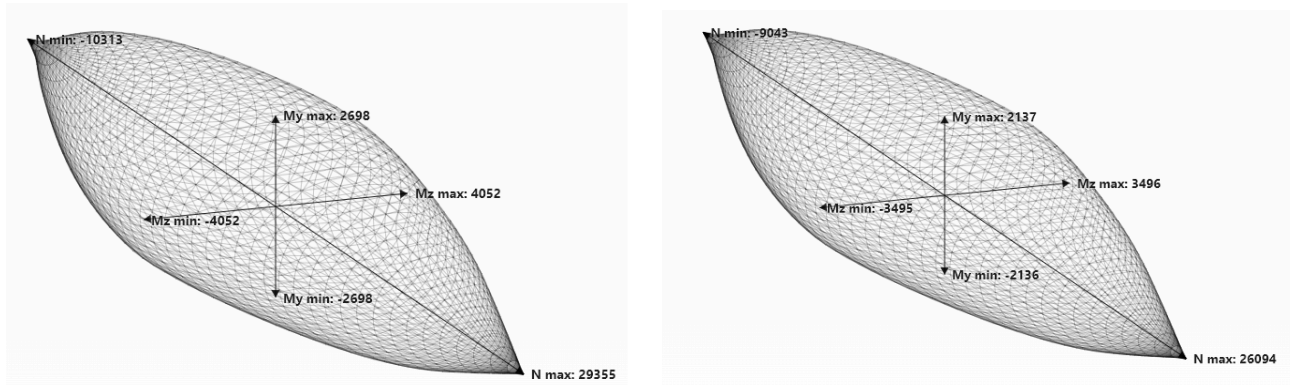


Fig. 3. – Surface d'interaction de résistance au feu (N - M_z - M_y) à R120 et R240.

Distances

Le module distances vérifie graphiquement plusieurs cas de charge en flexion déviée sur la même surface d'interaction. Chaque charge (N, M_z, M_y) est projetée sur la surface et restituée avec un taux d'utilisation η , de sorte que l'ingénieur lit d'un coup d'œil quelles charges restent à l'intérieur du domaine de résistance et lesquelles le dépassent.

- $\eta < 1$: la charge reste **interne** et la section conserve une réserve de capacité.
- $\eta = 1$: la charge se situe sur la frontière, à la limite exacte.
- $\eta > 1$: la charge devient **externe** et la capacité est dépassée.

Au feu, le domaine se contracte avec l'exposition, de sorte que le statut d'une même charge peut passer d'intérieur à extérieur à mesure que la durée augmente.

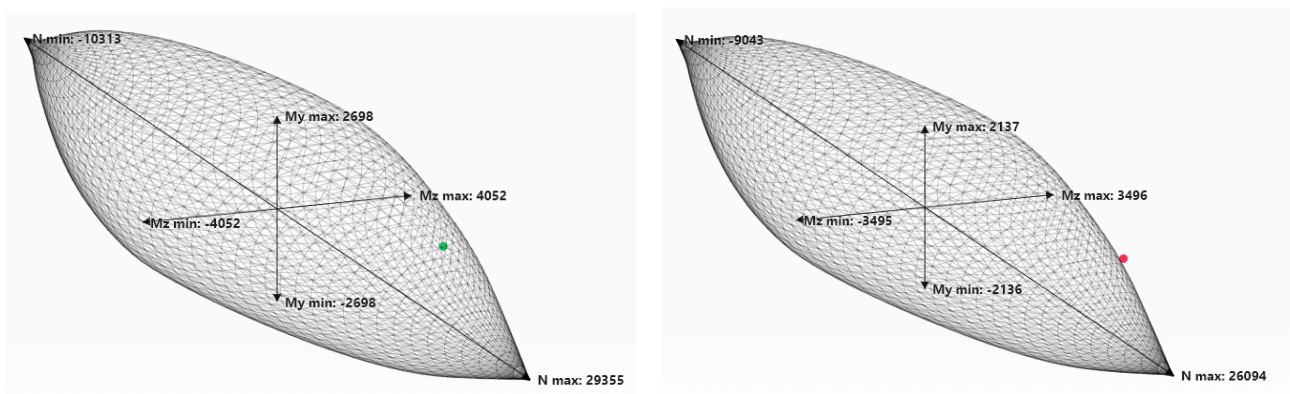


Fig. 4. – Vérification par distances d'une charge d'incendie sur le domaine de résistance 3D, à R120 (gauche) et R240 (droite). Le domaine se contracte avec l'exposition ; la distance normalisée η indique si la charge reste **interne** ($\eta \leq 1$) ou devient **externe** ($\eta > 1$).

Le point de charge passe de **interne** à R120 à **externe** à R240, ce qui est cohérent avec les résultats de la vérification de section et de la courbe d'interaction.

Raideur au feu

L'échauffement réduit aussi la raideur de flexion des poteaux. À mesure que la courbure augmente, cette perte de raideur peut amplifier les effets du second ordre avant même que la résistance ultime ne soit atteinte.

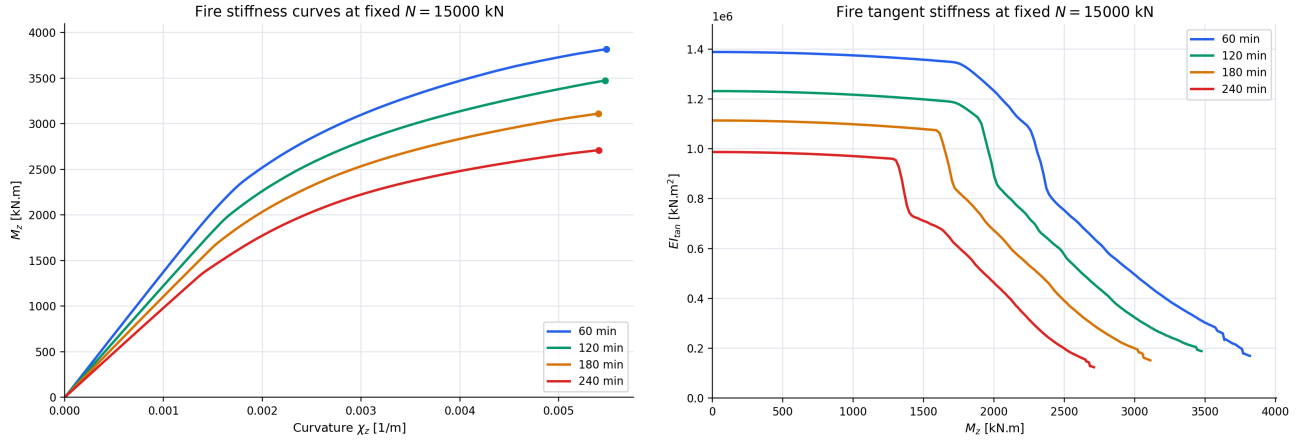


Fig. 5. – Raideur au feu à $N = 15000$ kN et $M_y = 0$. À gauche, la relation moment–courbure M_z – χ . À droite, la raideur tangente EI_{tan} en fonction de M_z .

Les courbes montrent une dégradation marquée de la raideur avec la durée de feu : la relation moment–courbure s’aplatit et la raideur tangente chute brutalement à mesure que la section chauffée approche de la ruine.

Temps de ruine

Le temps de ruine est le calcul le plus spécifique au feu. Pour une charge de service fixée, SectionPro reconstruit la section réduite à chaque instant de sortie thermique et y résout l’équilibre. La capacité diminue à mesure que l’isotherme 500°C se contracte et que les températures de l’acier augmentent ; le temps de ruine est l’instant auquel la charge sort du domaine de résistance, lorsque la section réduite ne peut plus l’équilibrer dans les limites de déformation des matériaux.

Un essai d’isolation est ensuite mené sur la même section pour vérifier si une protection passive résout ce problème particulier de résistance au feu. La même charge est évaluée d’abord sur la section nue, puis avec une couche isolante continue sur le pourtour du béton.

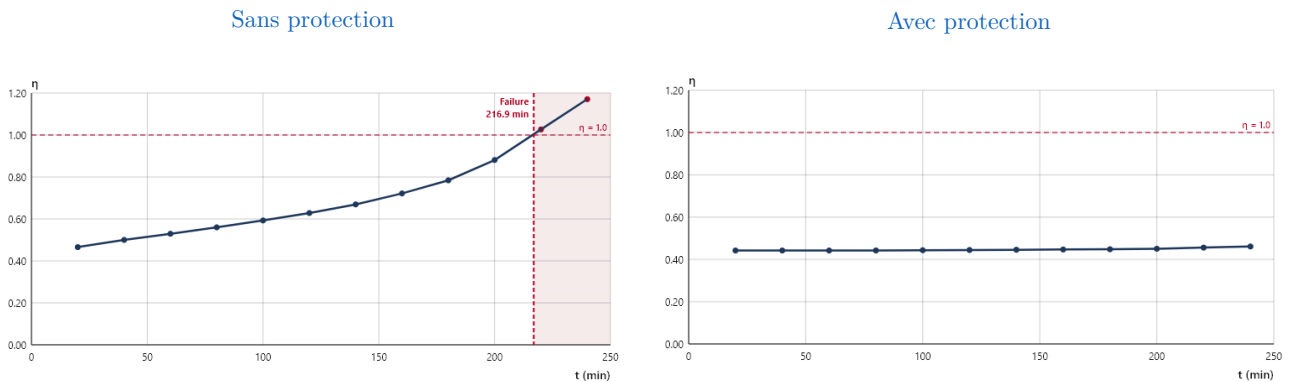


Fig. 6. – Temps de ruine sous la charge $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, en kN et kN · m. La protection passive repousse la sortie du domaine de résistance au-delà de R240 dans ce cas.

La protection est modélisée par une couche passive continue décrite par quatre paramètres thermiques. Pour cet essai d’isolation, les valeurs suivantes ont été utilisées :

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)

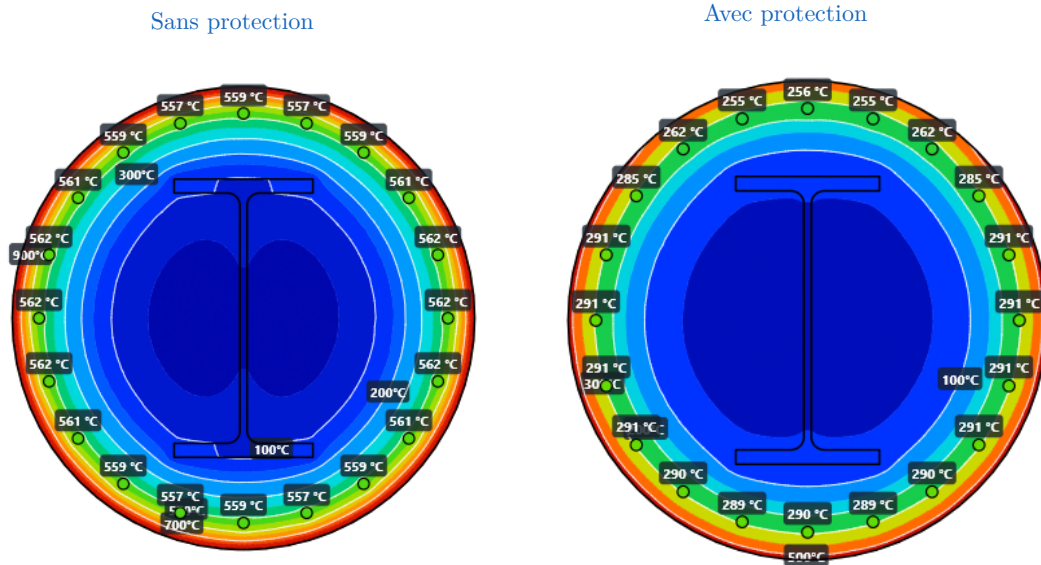


Fig. 7. – Champ de température à R240, section nue et protégée.

La protection est très efficace dans ce cas : sous protection passive, les armatures passent d'environ 560 °C à environ 300 °C, et le béton reste sous 500 °C même après 240 min, de sorte que toute la section de béton est conservée mécaniquement.

Performance du logiciel

La tâche principale est le calcul du champ thermique aux durées de feu demandées. Une fois ces champs de température disponibles, les vérifications mécaniques sont rapides et l'ensemble du calcul reste sous la seconde pour cet exemple.

Calcul	Temps
Champ thermique (2 instants, R120/R240)	0,20 s
Vérification de section (contraintes-déformations)	+ 4 ms
Courbe d'interaction N-Mz (160 points)	+ 31 ms
Domaine My-Mz à N fixé	+ 35 ms
Surface d'interaction 3D (50 × 50)	+ 134 ms
Courbe de raideur (moment-courbure)	+ 11 ms
Temps de ruine (balayage complet)	+ 52 ms

Poteau mixte de l'article, mesures sur poste de bureau. Les temps mécaniques sont donnés après la résolution du champ thermique.

Conclusion

La méthode de l'isotherme 500 °C transforme le champ thermique en une section résistante réduite : le béton conservé avec sa résistance à l'intérieur de l'isotherme, les barres et l'acier noyé affaiblis

par leur température locale. À partir de cet état chauffé, l'analyse donne la résistance de la charge imposée, les domaines d'interaction, les distances des charges, la perte de raideur et l'instant auquel la charge sort du domaine de résistance.

Sur le poteau mixte étudié, le profilé noyé reste protégé par le béton environnant et conserve une part importante de la capacité aux durées intermédiaires. La protection passive continue abaisse nettement les températures à R240 et repousse le temps de ruine de la charge étudiée.

Les différents calculs sont cohérents entre eux : ils pointent tous vers la même perte de capacité et la même plage de ruine. La vérification de section donne l'état détaillé des contraintes et des déformations pour une charge. La courbe d'interaction est la vue d'ingénierie privilégiée lorsqu'un domaine de résistance est requis dans un plan. La surface d'interaction donne le domaine biaxial global. La vérification par distances donne un statut OK/KO rapide pour plusieurs charges. Les courbes de raideur indiquent si la section est entrée dans un régime de forte dégradation de la raideur. L'analyse du temps de ruine donne enfin un temps d'exposition approximatif avant que la charge ne puisse plus être reprise. Chaque vue a sa propre force, et ensemble elles donnent une lecture cohérente du comportement au feu.