

# CIM'feu

V 06-2011

## EC2

Logiciel de vérification par calcul de la résistance au feu des structures en béton

Développé par le CSTB  
et produit par CIMbéton



**CSTB**  
*le futur en construction*

**CIM**béton  
CENTRE D'INFORMATION SUR  
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS





Logiciel de vérification par  
calcul de la résistance au feu  
des structures en béton

# SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
1.1 - Place de la résistance au feu des structures dans le domaine de la sécurité incendie	6
1.2 - Naissance et développement d'un incendie	7
1.3 - La charge calorifique	7
1.4 - Résistance au feu d'un élément de construction selon l'Eurocode	8
<b>CHAPITRE 2 - DÉFINITION DE L'ACTION DU FEU SUR LES ÉLÉMENTS EN BÉTON</b>	<b>9</b>
2.1 - Introduction	9
2.2 - Sections étudiées par CIM'Feu EC2	10
2.3 - Caractéristiques thermophysiques des bétons	12
2.4 - Les grandes lignes du modèle d'échange thermique	13
2.4.1 - Conditions initiales	14
2.4.2 - Conditions de frontières courantes	14
2.4.3 - Choix du pas de temps	17
2.4.4 - Contraintes dimensionnelles	17
2.4.5 - Calcul de la largeur de la table d'une poutre	19
<b>CHAPITRE 3 - PRINCIPES DE JUSTIFICATIONS PAR LE CALCUL</b>	<b>20</b>
3.1 - Combinaisons de calcul	20
3.2 - Éclatement	21
3.3 - Propriétés à chaud des matériaux béton et acier	23

<b>CHAPITRE 4 - UTILISATION DU LOGICIEL CIM'Feu EC2</b>	<b>31</b>
4.1 - Configuration du matériel	31
4.2 - Installation du logiciel	31
4.3 - Lancement du logiciel	33
4.4 - Menus texte	33
4.4.1 - Menu « Fichier »	33
4.4.2 - Menu « Calcul »	33
4.4.3 - Menu « Afficher »	33
4.4.4 - Menu « ? »	34
4.5 - Boutons de raccourcis	34
4.6 - Boutons de choix de l'élément	34
4.7 - Zone d'attribution d'un nom au calcul effectué	35
4.8 - Présentation des écrans de saisie de données des éléments	35
4.9 - Calcul des poutres (rectangulaires, en té et en I)	37
4.9.1 - Justifications vis-à-vis de la flexion	37
4.9.2 - Justifications vis-à-vis de l'effort tranchant	37
4.9.3 - Limites d'emploi du logiciel	
Simplifications admises - Astuces d'utilisation	39
4.9.4 - Exemple de calcul	39
4.10 - Calcul des dalles	47
4.10.1 - Méthode de justification dans le cas général	47
4.10.2 - Limites d'emploi du logiciel	
Simplifications admises - Astuces d'utilisation	48
4.10.3 - Exemple de calcul	50
4.11 - Calcul des poteaux circulaires et rectangulaires	
et des murs chauffés sur une ou deux faces	56
4.11.1 - Méthode de justification	56
4.11.2 - Limites d'emploi du logiciel	
Simplifications admises - Astuces d'utilisation	58
4.11.3 - Exemples de calcul	58
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>69</b>
Annexe 1 : Confrontation des résultats des calculs thermiques	
obtenus avec le logiciel CIM'feu EC2	69
Annexe 2 : Analyse relative à la prise en compte de propriétés	
thermiques particulières pour les bétons à haute résistance	77
Annexe 3 : Vérification au feu des dalles selon l'application nationale	
de l'Eurocode 2 partie 1-2	85

# AVANT-PROPOS

La prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton sera prochainement régie en France par le texte codificatif Eurocode 2, partie 1-2, muni de son annexe nationale (normes NF EN 1992-1-2 et NF EN 1992-1-2/NA) en remplacement de la norme DTU NF P 92-701 (DTU Feu-béton).

La norme NF EN 1992-1-2 propose trois méthodes de vérification :

1. l'analyse par éléments de structure ;
2. l'analyse par parties de structure ;
3. l'analyse globale de la structure.

Le logiciel CIM'Feu EC2 suit la première méthode de vérification consistant en une analyse par éléments de structure, réputée utilisable de manière équivalente aux deux autres, sur le plan de la sécurité structurale vis-à-vis de l'incendie, moyennant les hypothèses suivantes :

- les conditions d'appuis et les conditions aux limites des éléments, applicables à l'origine de l'incendie, sont supposées inchangées pendant toute la durée d'exposition au feu ;
- les effets des déformations thermiques dues aux gradients thermiques sur la section droite sont à prendre en compte. Les effets des dilatations thermiques axiales ou dans le plan peuvent être négligés.

Il est précisé que les valeurs tabulées et les méthodes de calcul simplifiées ou avancées conviennent pour vérifier les éléments dans des conditions d'incendie.

Le logiciel CIM'Feu EC2 repose sur des méthodes de calcul avancées dont les conditions d'emploi sont décrites au chapitre 4.3 de la norme NF EN 1992-1-2. Le traitement proposé met en œuvre :

- a) pour le calcul des températures, une démarche de calcul numérique fondée sur les principes et hypothèses connus de la théorie des transferts thermiques et considérant les actions pertinentes spécifiées dans la norme NF EN 1991-1-2 et les variations des propriétés thermiques des matériaux en fonction de la température ;
- b) pour le calcul mécanique, une démarche de calcul numérique fondée sur les principes et hypothèses connus de la théorie de la mécanique des structures et considérant les modifications des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température et les effets des déformations d'origine thermique.

Les structures considérées sont supposées avoir été préalablement dimensionnées et vérifiées à froid selon la norme NF EN 1992-1-1/NA.

CIM'Feu EC2 vise les éléments de structures suivants :

- les dalles appuyées sur deux ou quatre côtés, simples ou continues, chargées uniformément;
- les murs chauffés sur une ou deux faces;
- les poteaux de section circulaire;
- les poteaux de section rectangulaire;
- les poutres sur appuis simples et continus, de section rectangulaire ou en té, chargées uniformément;
- les poutres sur appuis simples et continus, de section en I, avec ou sans table, avec ou sans blochet, chargées uniformément.

CIM'Feu EC2 permet, au cours d'une séquence unique, de déterminer les champs de températures dans l'élément concerné, pour la durée de stabilité au feu spécifiée, puis d'enchaîner le calcul mécanique à chaud.

Le logiciel a été conçu pour un poste de type PC dont la configuration minimale requise pour un fonctionnement convenable est la suivante.

#### CONFIGURATION MINIMALE

Microprocesseur Intel® Pentium® 75

Affichage couleurs VGA 1 024 x 768 (16 bits)

512 Mo de RAM

Les données sont entrées sous environnement WINDOWS® (2000, XP, VISTA ou 7), permettant une saisie interactive et intuitive, avec aide contextuelle sur les cases de données. Certaines données sont discrétisées (ascenseur), afin d'aider l'utilisateur sur les limites de certaines variables. D'autres sont laissées libres, au cas où des valeurs spéciales, non-standard, sont envisagées, ou encore lorsque l'éventail de valeurs est trop large ou difficilement discrétisable.

## 1.1 - Place de la résistance au feu des structures dans le domaine de la sécurité incendie

---

La sécurité incendie est une discipline permettant de prendre en charge la sécurité des personnes vis-à-vis des conséquences induites par un incendie. Cette prise en charge de la sécurité passe par un certain nombre de mesures à adopter dans un ouvrage donné, liées à la configuration architecturale de l'ouvrage, son accessibilité par les services de secours, les matériaux dont il est constitué, l'organisation de ses issues d'évacuation, etc. Le nombre et la complexité des situations pouvant être rencontrées dans la pratique font que les règles de mise en sécurité sont diverses et on distingue à ce titre deux types de mesures, pour la mise en sécurité des bâtiments vis-à-vis de l'incendie.

a - **Sécurité active** : il s'agit de mesures adoptées, visant à mettre à disposition des moyens de lutte directe contre le feu et ses conséquences (extinction automatique, alarme, etc.).

b - **Sécurité passive** : il s'agit de moyens permettant, du fait de leur conception et de leur emplacement, une maîtrise des conséquences de l'incendie, permettant ainsi une réduction du risque (cloisons ou planchers coupe-feu, par exemple).

Parmi les moyens relevant du deuxième type, on trouve celui relatif à **la résistance au feu des structures**. Selon ce critère, on est conduit à qualifier les réponses des structures aux sollicitations appliquées, en tenant compte d'un certain nombre de paramètres, dont le plus important est celui de la chute de résistance des éléments de structure compte tenu de l'échauffement auquel ils sont soumis au cours de l'incendie.

Les justifications à entreprendre pour quantifier la résistance au feu des structures sont basées sur des concepts généraux de mécanique des structures et se conduisent selon des critères codifiés. En ce qui concerne les éléments en béton, il est prévu que le code à utiliser en France dans un proche avenir soit la norme NF EN 1992-1-2, muni de son annexe nationale en remplacement de la norme DTU NF P 92-701 (DTU Feu-béton).

## 1.2 - Naissance et développement d'un incendie

---

Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour qu'un incendie puisse apparaître et se développer :

- une source de chaleur ;
- du matériau combustible ;
- de l'oxygène.

Des observations effectuées lors d'incendies réels, il ressort que le développement d'un feu présente une phase critique, qui correspond à celle qui survient lorsque l'apport d'oxygène devient suffisamment important (après le bris des vitres, par exemple) pour entraîner la combustion rapide des matériaux combustibles. C'est en effet durant cette phase que la température augmente et que la sollicitation thermique sur les éléments structuraux devient importante. On a constaté notamment que, avant cette phase, la sollicitation restait modérée car l'on était en phase de développement de l'incendie, et qu'après cette phase, la sollicitation diminuait par manque de combustible.

Toutes ces considérations sont actuellement ignorées lorsque l'on utilise les deux codes précités pour les calculs de résistance au feu car, comme il sera vu plus loin, ces codes utilisent des courbes conventionnelles de montée en température, valables dans tous les cas, et qui ne tiennent pas compte, en particulier, de la masse combustible disponible, en supposant que celle-ci n'est pas bornée. Notons simplement que ces courbes sont celles utilisées par les laboratoires d'essais, dans les fours destinés aux essais de résistance au feu des éléments de construction.

## 1.3 - La charge calorifique

---

La charge calorifique représente l'énergie libérée par la combustion complète de tout ce qui est susceptible de brûler dans un local donné. Ceci a conduit à imposer des isolements, par rapport à ces locaux, tenant compte de ce paramètre important. À l'heure actuelle, la réglementation impose des durées d'isolement entre locaux en fonction de la destination et de l'emplacement de ces derniers. En définitive, les exigences réglementaires sont formulées de manière à ce que la charge calorifique n'intervienne pas dans les calculs de résistance au feu, seules les durées de résistance au feu, qui en constituent une conséquence directe, sont considérées.

## 1.4 - Résistance au feu d'un élément de construction selon l'Eurocode

---

La norme NF EN 1363-1, relative aux essais de résistance au feu des éléments de structure, retient trois critères de classement. La définition qui en est donnée dans la norme NF EN 1992-1-2 est la suivante.

1. La fonction porteuse (**R**) : il s'agit de l'aptitude d'une structure ou d'un élément à résister aux actions spécifiées pendant l'exposition au feu donné, selon des critères définis. C'est un critère de résistance mécanique.

2. L'étanchéité (**E**) : il s'agit de l'aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment, en cas d'exposition au feu d'un côté, à empêcher le passage des flammes et des gaz chauds et à éviter l'apparition des flammes du côté non exposé.

3. L'isolation (**I**) : il s'agit de l'aptitude d'un élément séparatif d'un bâtiment, en cas d'exposition au feu d'un côté, à limiter la montée en température de la face non exposée au-dessous des niveaux spécifiés (en pratique, deux niveaux sont retenus : l'échauffement moyen de la face non exposée ne doit pas excéder 140 °C, l'échauffement ne doit excéder 180 °C en aucun point de cette face).

Il apparaît clairement que le critère 2 ne peut être respecté que si le critère 1 l'est et que le critère 3 impose le respect des deux premiers. En conséquence, les exigences de résistance au feu, aux temps requis exprimés systématiquement en minutes, sont de la forme :

- R 120  $\Leftrightarrow$  respect du critère 1 pendant 2 heures
- RE 90  $\Leftrightarrow$  respect des critères 1 et 2 pendant 1 heure et demie
- REI 60  $\Leftrightarrow$  respect des critères 1, 2 et 3 pendant 1 heure

Il est bien entendu que les deux derniers critères sont applicables pour les éléments de structure pouvant former écran, c'est-à-dire faisant partie du compartimentage (planchers et murs), la justification des éléments unidimensionnels (poutres, poteaux, etc.) n'étant conduite que vis-à-vis de la fonction porteuse.

On précise que ces critères sont en correspondance directe avec les critères de classement utilisés auparavant, à savoir : le critère de Stabilité au Feu (**SF**), le critère Pare Flammes (**PF**) et le critère Coupe-Feu (**CF**).

On a ainsi la correspondance :

- R  $\Leftrightarrow$  SF
- RE  $\Leftrightarrow$  PF
- REI  $\Leftrightarrow$  CF

# Chapitre 2 Définition de l'action du feu sur les éléments en béton

## 2.1 - Introduction

Le modèle développé dans le cadre de ce travail, sous le nom de BISOT, et qui constitue le noyau de calcul des températures intégré au logiciel général CIM'Feu EC2 admet, conformément aux prescriptions de la norme NF EN 1992-1-2, l'intégrité du béton et prend forfaitairement en compte l'intervention de l'eau par une dépendance de la chaleur spécifique à la fraction massique de l'eau dans le béton. Cette dernière hypothèse est conservatrice, en raison du fait que la présence d'eau contribue à retarder l'échauffement du béton.

Le travail réalisé est suscité par le souci de fournir aux concepteurs d'ouvrages en béton un logiciel convivial et rapide.

Concernant le volet thermique il s'agit de calculer le plus rapidement possible – quelques secondes sur un micro-ordinateur récent – le champ de température dans une section de béton à un instant donné (instant de classement).

La sollicitation thermique sur la section est définie dans le document « NF EN 1991-1-2 (juillet 2003) – P 06-1 12-1 ». Il s'agit d'une expression de la température des gaz en contact de la section. Les actions retenues sont celles du chapitre 3.2 intitulé « Courbes nominales température/temps ». Trois courbes sont proposées.

Les expressions de la température sont les suivantes :

*(Remarque : pour chaque expression, la température est exprimée en °C et le temps en minutes).*

Courbe température/temps normalisée :  $\Theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t+1)$

Courbe de feu extérieur :  $\Theta_g = 20 + 660 \times (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t})$

Courbe hydrocarbure :  $\Theta_g = 20 + 1080 \times (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$

Les données sur le béton et sur l'acier, nécessaires au calcul, sont fournies par la norme NF EN 1992-1-2.

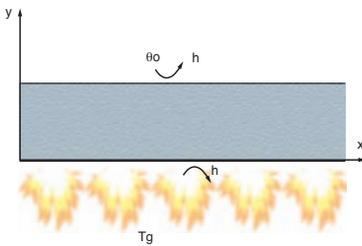
Le programme fournit la température à tous les nœuds d'un maillage aux sept instants suivants : 30 minutes, 1 heure, 1 heure 30 minutes, 2 heures, 2 heures 30 minutes, 3 heures et 4 heures. Ces temps sont exprimés en minutes dans le logiciel, conformément à la présentation actuelle des exigences requises en matière de résistance au feu.

Dans ce qui suit sont développés les points essentiels qui ont guidé l'élaboration du volet thermique du logiciel. Les configurations étudiées sont présentées et les valeurs des caractéristiques thermophysiques des bétons utilisées par le programme sont données. Les grandes lignes du modèle sont ensuite tracées et la démarche qui a conduit au choix des pas de temps d'une part, et au choix de la longueur de l'aile de la poutre d'autre part, est évoquée.

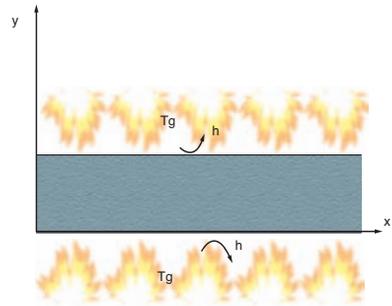
## 2.2 - Sections étudiées par CIM'feu EC2

Le programme BISOT, intégré à CIM'Feu EC2, calcule le champ de température dans les sept configurations suivantes.

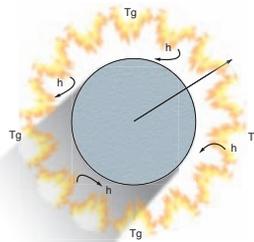
- Une **dalle** chauffée sur une seule de ses faces.
- Un **mur** chauffé sur une seule de ses faces.



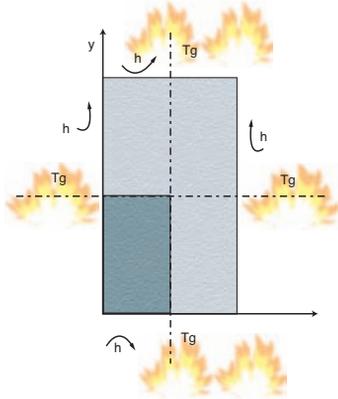
- Un **mur** chauffé sur ses deux faces.



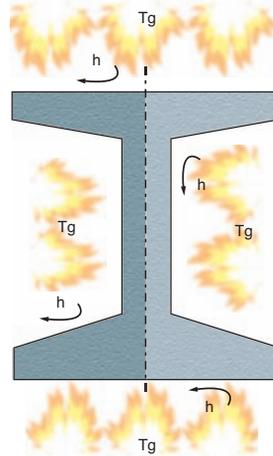
- Un **poteau circulaire** chauffé sur sa périphérie.



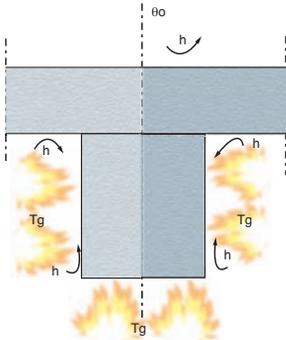
- Un **poteau rectangulaire** chauffé sur les quatre faces.
- Une **poutre rectangulaire** chauffée sur les quatre faces.



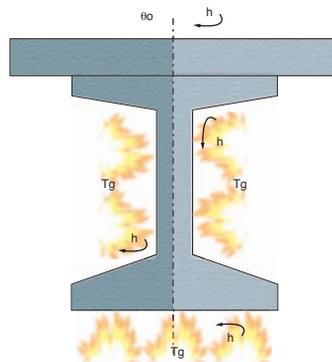
- Une **poutre en I** chauffée sur les « 4 faces ».



- Une **poutre en té** chauffée sur « 3 faces ».



- Une **poutre en I** chauffée sur « 3 faces », avec table de compression.



Les dimensions minimales et maximales des sections sont les suivantes :

- mur, dalle ou table de compression : épaisseur comprise entre  $e_{\min} = 8$  cm et  $e_{\max} = 40$  cm
- poutre ou poteau rectangulaire : dimension d'un côté comprise entre  $a_{\min} = 8$  cm et  $a_{\max} = 120$  cm
- poteau circulaire : diamètre compris entre  $d_{\min} = 8$  cm et  $d_{\max} = 120$  cm
- poutre R :
  - hauteur totale maximale = 120 cm
  - largeur maximale = 90 cm

- poutre I:
  - hauteur totale maximale = 160 cm pour une poutre sans table et 200 cm pour une poutre avec table
  - hauteur totale minimale = 35 cm (5 + 1 + 23 + 1 + 5)
  - épaisseur minimale de l'âme = 5 cm
  - largeur minimale de la semelle = 15 cm
  - largeur maximale de la semelle = 90 cm
  - hauteur minimale du talon (hors chanfrein) = 5 cm
  - hauteur minimale du chanfrein = 1 cm
  - hauteur minimale de l'âme = 23 cm

## 2.3 - Caractéristiques thermophysiques des bétons

### Conductivité thermique

Elle varie avec la température. Elle suit l'évolution fournie dans le document Pr NF EN 1992-1-2/NA (avant projet soumis à enquête jusqu'au 5 novembre 2006). Elle est exprimée en W/m/K.

$$\text{- Pour } T \leq 140 \text{ }^{\circ}\text{C: } \lambda = 2 - 0,2451 \times \frac{T}{100} + 0,0107 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$$

$$\text{- Pour } T > 140 \text{ }^{\circ}\text{C et } T \leq 160 \text{ }^{\circ}\text{C: } \lambda = 5,324 - 0,02604 \times T$$

$$\text{- Pour } T > 160 \text{ }^{\circ}\text{C: } \lambda = 1,36 - 0,136 \times \frac{T}{100} + 0,0057 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$$

### Masse volumique

Elle varie avec la température. Elle suit l'évolution fournie dans le document: NF EN 1992-1-2 d'octobre 2005 - § 3.3.2. Elle est exprimée en kg/m<sup>3</sup>.

$$\text{- Pour } T \leq 115 \text{ }^{\circ}\text{C: } \rho = 2\,300$$

$$\text{- Pour } T > 115 \text{ }^{\circ}\text{C et } T \leq 200 \text{ }^{\circ}\text{C: } \rho = 2\,300 \times \left[ 1 - 0,02 \times \left(\frac{T - 115}{85}\right) \right]$$

$$\text{- Pour } T > 200 \text{ }^{\circ}\text{C et } T \leq 400 \text{ }^{\circ}\text{C: } \rho = 2\,300 \times \left[ 0,98 - 0,03 \times \left(\frac{T - 200}{200}\right) \right]$$

$$\text{- Pour } T > 400 \text{ }^{\circ}\text{C et } T \leq 1\,200 \text{ }^{\circ}\text{C: } \rho = 2\,300 \times \left[ 0,95 - 0,07 \times \left(\frac{T - 400}{800}\right) \right]$$

## Chaleur massique

Elle varie avec la température et la fraction massique d'eau. Elle suit l'évolution fournie dans le document: NF EN 1992-1-2 d'octobre 2005 - § 3.3.2. Elle est exprimée en J/kg/K. Pour la teneur en eau  $\tau$ , le logiciel propose par défaut les valeurs 0,5 % et 1,5 % correspondant respectivement à des situations courantes d'ambiances intérieures et extérieures. Le logiciel propose également une saisie libre pour des valeurs comprises entre 0 et 3 %.

– Pour  $T \leq 100$  °C:  $C = 900$

– Pour  $T > 100$  °C et  $T \leq 115$  °C:  $C = C_{peak}$  avec

$$C_{peak} = 1\,470 \text{ pour } \tau = 1,5 \% \text{ et } C_{peak} = 2\,020 \text{ pour } \tau = 3 \%$$

– Pour  $T > 115$  °C et  $T \leq 200$  °C:  $C = C_{peak} + \frac{1\,000 - C_{peak}}{85} \times (T - 115)$

– Pour  $T > 200$  °C et  $T \leq 400$  °C:  $C = 1\,000 + \frac{(T - 200)}{2}$

– Pour  $T > 400$  °C et  $T \leq 1\,200$  °C:  $C = 1\,100$

Les bétons à haute résistance, traités par le logiciel CIM'Feu EC2, admettent en principe des caractéristiques thermophysiques différentes. Prendre en compte cette différence dans le logiciel CIM'Feu EC2 aurait nécessité de développer des éléments spéciaux d'interface pour les cas où un élément aurait été constitué de deux bétons différents dont un seulement à haute résistance (dalle avec prédalle, poutre avec table). Ce développement aurait eu pour conséquence d'augmenter sensiblement les temps de calcul et nous avons jugé utile de regarder d'abord la sensibilité des résultats à la prise en compte de cette différence avant de réaliser le développement. L'étude de sensibilité est présentée en annexe 2 de ce document. Elle montre que la prise en compte de caractéristiques thermophysiques différentes pour les bétons à haute résistance à une influence négligeable sur le résultat. En conséquence de quoi, le comité de pilotage du logiciel CIM'Feu EC2 a décidé de privilégier le temps de calcul en conservant pour les bétons à haute résistance les caractéristiques thermophysiques des bétons standards.

## 2.4 - Les grandes lignes du modèle d'échange thermique

---

La théorie de base repose sur l'écriture de bilans de chaleur dans chaque tranche de solide selon le principe suivant.

Variation de la quantité de chaleur contenue dans la tranche	=	Somme nette des flux conduits ( <i>exprimés selon la loi de Fourier</i> )
	+	termes de source éventuels ( <i>réaction exothermique, ou condensation</i> )
	-	termes de puits éventuels ( <i>réaction endothermique, ou vaporisation</i> )

Les équations théoriques sont aux dérivées partielles. Pour les résoudre, on opère une discrétisation sur l'espace et sur le temps qui les transforme en équations différentielles ordinaires. La résolution de ces équations repose ici sur un schéma semi-implicite aux différences finies qui conduit à réaliser à chaque pas de temps des inversions de matrice.

Dans le cas d'un transfert de chaleur monodimensionnel, pour connaître le champ de température, il faut résoudre un système linéaire en température (matrices tridiagonales), dont le traitement numérique est rapide.

Dans le cas d'un problème bidimensionnel, pour conserver un système où les matrices restent tridiagonales, un algorithme de résolution dit aux directions alternées a été retenu.

Selon cette méthode, la température solution à l'instant courant dépend de la température à l'instant courant dans la direction Oy, et de la température à l'instant précédent dans l'autre direction Ox.

À l'instant courant suivant, la température solution dépend de la température à l'instant courant dans la direction Ox, et de la température à l'instant précédent dans la direction Oy. On procède ainsi à chaque pas de temps par alternance de la direction Ox et de la direction Oy.

### 2.4.1 - Conditions initiales

Le régime est vu comme stationnaire jusqu'à l'instant, noté  $t = 0$ , de début de l'apport de chaleur considéré. Pendant cette période stationnaire, on fixe la température des solides et de l'air à la même valeur. Une valeur initiale de 20 °C est retenue par défaut.

### 2.4.2 - Conditions de frontières courantes

Le flux de chaleur sollicitant les surfaces exposées dépasse la valeur initiale à partir de l'instant zéro. Ce flux doit être donné. Il est exprimé à partir de la valeur de la température des gaz chauds  $T_g$  donnée au § 2.1.

**Face exposée :** le flux de chaleur entrant par une face exposée est la somme d'une composante convective et d'une composante radiative. À chaque instant :

– densité de flux entrant par convection :  $q_{conv} = h (T_g - T_s)$  ;

– densité de flux entrant par rayonnement :  $q_{rad} = \epsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4)$  où  $\epsilon$  est un coefficient d'échange radiatif homogène à une émissivité, qui reçoit une valeur fonction de l'émissivité de la paroi.

**$h = 25 \text{ W/m}^2/\text{K}$  pour la loi ISO et la loi de feu extérieur et  $h = 50 \text{ W/m}^2/\text{K}$  pour la loi hydrocarbure.  $\epsilon = 0,7$  quelle que soit l'action thermique.**

**Face non-exposée :** les mêmes relations que pour la face exposée sont utilisées. Le flux de chaleur entrant par une face non exposée est la somme d'une composante convective et d'une composante radiative.

À chaque instant :

– densité de flux entrant par convection :  $q_{conv} = h (T_{air} - T_s)$  ;

– densité de flux entrant par rayonnement :  $q_{rad} = \epsilon \sigma (T_{air}^4 - T_s^4)$ .

**$h = 4 \text{ W/m}^2/\text{K}$  et  $\epsilon = 0,7$  quelle que soit l'action thermique.**

## Équations du modèle

Les figures ci-dessous représentent de façon schématique les équations discrétisées de diffusion thermique dans le cas d'une diffusion unidirectionnelle (dalle, mur). Pour un problème bidimensionnel (poteau ou poutre), le principe reste le même. Cependant le nombre d'équations de conditions aux limites dépasse 2 : pour le poteau on en compte 8 et 15 pour la poutre rectangulaire chauffée trois faces.

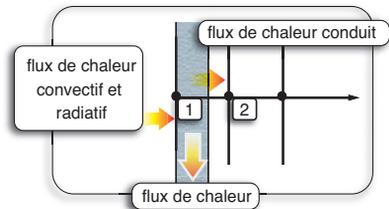
L'épaisseur d'une tranche est  $\Delta x$ .

Bilan thermique sur la demi-tranche exposée :

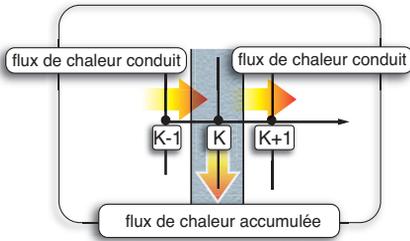
$$\rho C_s \frac{\Delta x_1}{2} \frac{\partial T_1}{\partial t} = q_{conv} + q_{rad} - \lambda_{3/2} \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1}$$

accumulation de chaleur dans la demi-tranche	flux de chaleur entrant convectif et radiatif	flux de chaleur conduit
---	--	-------------------------

avec :  $\lambda_{3/2} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$  3/2 correspond au bord de la demi-tranche



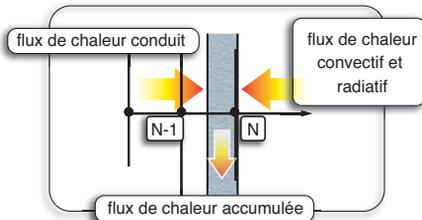
Bilan thermique sur une tranche courante (nœud n°k):



$$\rho C_s \Delta x \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_{k-1/2} \frac{T_{k-1} - T_k}{\Delta x} - \lambda_{k+1/2} \frac{T_k - T_{k+1}}{\Delta x}$$

$$\lambda_{k \pm 1/2} = \frac{\lambda_k + \lambda_{k \pm 1}}{2}$$

Bilan thermique sur la demi-tranche non-exposée (nœud n°N):



$$\rho C_s \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T_N}{\partial t} = \lambda_{N-1/2} \frac{T_{N-1} - T_N}{\Delta x} - (q_{conv} + q_{rad})$$

Pour alléger l'écriture des équations précédentes, nous ne présentons pas la discrétisation temporelle des équations discrétisées précédentes. Cette opération introduit un paramètre,  $\theta$ , dont la valeur est comprise entre 0 et 1, et qui permet au champ de température solution à l'instant précédent d'influencer le champ de température solution de l'instant courant.

Ainsi,  $\theta = 0$  signifie que le champ de température solution à l'instant courant ne dépend que du champ de température à l'instant précédent. Un tel schéma de résolution est dit explicite. Il permet un calcul rapide de la température quand les conditions de stabilité numérique sont satisfaites.

$\theta = 1/2$  signifie que la température solution à l'instant courant dépend pour partie de la température à l'instant précédent et pour partie de la température à l'instant courant. Ce type de schéma (de Cranck-Nicholson) est dit semi-implicite.

**$\theta = 1$  signifie que la température solution à l'instant courant dépend seulement de la température à l'instant courant. Ce type de schéma est dit implicite. C'est ce dernier schéma que nous avons retenu.**

Dans le cas d'un transfert de chaleur monodimensionnel, pour connaître le champ de température, il faut résoudre un système linéaire (matrices tridiagonales) en température. L'algorithme de résolution d'un tel système est très simple et rapide.

Dans le cas d'un problème bidimensionnel, pour conserver un système où les matrices sont tridiagonales, un algorithme de résolution dit aux directions alternée a été retenu.

Selon cette méthode, la température solution à l'instant courant dépend de la température à l'instant courant dans la direction Oy, par exemple, et de la température à l'instant précédent dans l'autre direction Ox.

À l'instant courant suivant, la température solution dépend de la température à l'instant courant dans la direction Ox, et de la température à l'instant précédent dans l'autre direction Oy.

On procède ainsi à chaque pas de temps par alternance de la direction Ox et de la direction Oy.

### 2.4.3 - Choix du pas de temps

Un temps de calcul court est l'objectif visé. Ce dernier, sur un PC doté d'un processeur à 1 GHz et 512 Mo de Ram, doit pouvoir être inférieur **à la minute** pour un calcul portant sur la section de plus grandes dimensions et pour la durée de simulation la plus longue.

On cherchera à limiter l'écart de température dans la section entre CIM'Feu EC2 et un logiciel de référence à une valeur inférieure à 10 °C. Ce critère de précision sera privilégié à celui du temps de calcul.

Ainsi pour chaque section le pas de temps sera choisi de façon à satisfaire ce double objectif.

### 2.4.4 - Contraintes dimensionnelles

Compte tenu de la méthode utilisée pour la résolution numérique (différences finies), la saisie des dimensions doit respecter un certain nombre de contraintes pour le bon déroulement du calcul. D'une manière générale, toutes les dimensions doivent être des multiples de 5 mm. On détaille pour chaque section les conditions.

### **Poutre rectangulaire**

La hauteur totale doit être inférieure ou égale à 120 cm.

La largeur de la nervure doit être inférieure à 90 cm.

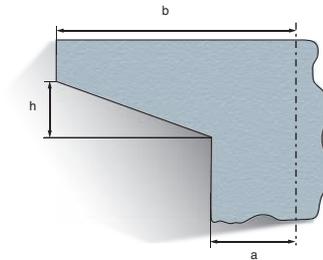
Par ailleurs, la hauteur de la table de compression ne peut être inférieure à 8 cm.

### **Poutre en I**

La hauteur totale doit être inférieure ou égale à 160 cm pour une poutre sans table et à 200 cm pour une poutre avec table.

La largeur de la nervure doit être inférieure à 90 cm.

Par ailleurs, la hauteur de la table de compression ne peut être inférieure à 8 cm.



D'autre part, le ratio  $h / (b-a)$  doit être supérieur à 0,15.

### **Dalle**

L'épaisseur de la dalle peut varier entre 8 et 40 cm par pas de 1 cm.

### **Mur**

L'épaisseur du mur peut varier entre 8 et 40 cm par pas de 1 cm.

### **Poteau rectangulaire**

La dimension d'un côté doit être comprise entre 8 et 120 cm.

### **Poteau circulaire**

Le diamètre du poteau doit être compris entre 8 et 120 cm.

## 2.4.5 - Calcul de la largeur de la table d'une poutre

La poutre rectangulaire et la poutre en I supportent une dalle de plancher. On a supposé d'une part un contact parfait entre la dalle et la poutre et d'autre part que la dalle et la poutre étaient constituées du même béton (pour l'aspect thermique uniquement).

Pour calculer la température dans la section de la poutre et dans l'épaisseur de la dalle en contact de la poutre, il est nécessaire de prendre en compte une partie de la dalle dans le calcul d'échauffement. On pourrait retenir la demi-longueur séparant deux poutres. Ce choix simple, qui respecte la symétrie de la configuration réelle, conduit à augmenter considérablement le nombre de mailles et par conséquent le temps de calcul sans pour cela augmenter visiblement la précision du résultat.

Selon le modèle BISOT, la longueur de la dalle (aile) varie selon la nature du béton et l'instant au bout duquel on désire connaître la température. La valeur de la longueur de l'aile est calculée de façon qu'un accroissement de cette dernière ne modifie que très peu le champ de température dans la section de la poutre.

L'approximation du milieu semi-infini, appliquée à une paroi simple soumise sur l'une de ses faces à une température imposée, permet d'approcher la valeur optimale de cette longueur. Le tableau suivant donne les valeurs utilisées dans le programme.

Instant	$t \leq 1$ heure	$t \leq 3$ heures	$t \leq 4$ heures
Longueur	15 cm	25 cm	30 cm

Une confrontation des résultats des calculs thermiques obtenus avec le logiciel CIM'Feu EC2 est proposée en annexe I. Elle valide les développements réalisés.

On précise que la largeur de la table dans le fichier de sortie « \*.feu » des températures, ou sur l'écran présentant le champ de température dans la section d'une poutre avec table, correspond à la largeur retenue pour les calculs thermiques (voir le tableau ci-dessus). La largeur efficace de la table  $b_{\text{eff}}$  rentrée par l'utilisateur, *a priori* différente, est celle effectivement retenue pour les calculs mécaniques (voir § 4.9).

## Chapitre 3 PRINCIPES DE JUSTIFICATIONS PAR LE CALCUL

Les principes de justifications utilisés par CIM'Feu EC2 sont issus des préconisations de l'Eurocode.

### 3.1 – Combinaisons de calcul

Selon l'article 6.4.3.3 de la norme NF EN 1990 et la clause 4.3.1 (2) de la norme NF EN 1991-1-2 assortie du choix pour la France donné dans la norme NF EN 1991-1-2/NA, la sollicitation totale à considérer dans le cas général pour la justification en situation d'incendie est définie par la relation du type E.L.U. accidentel suivante :

$$(G) + (P) + (A_d) + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

où :

- (G) représente l'ensemble des actions permanentes (poids propre de l'élément compris) ;
- (P) représente la valeur représentative d'une action de précontrainte ;
- (A<sub>d</sub>) représente la valeur de calcul de l'action accidentelle ;
- Q<sub>k,1</sub> représente la valeur caractéristique de l'action variable dominante ;
- Q<sub>k,i</sub> représente la valeur caractéristique de l'action variable d'accompagnement numéro i ;
- $\psi_1$  est le coefficient définissant la valeur fréquente d'une action variable (dépend du type de local auquel appartient l'élément structural visé) ;
- $\psi_2$  est le coefficient définissant la valeur quasi-permanente d'une action variable.

L'écriture adoptée pour la loi de comportement du béton et de l'acier fait que l'action de précontrainte (P) est automatiquement prise en compte, elle n'est donc pas à renseigner dans CIM'Feu EC2. De même, la prise en compte explicite de la dilatation thermique dans les lois de comportement fait que l'action accidentelle (A<sub>d</sub>), dont les effets sont ici les gradients de déformations thermiques dus à ceux de température, ne nécessite pas de renseignement particulier.

Pour ne pas alourdir l'interface, CIM'Feu EC2 ne prend en compte qu'une action variable (information suffisante dans bien des cas). Les seules actions à renseigner sont donc les actions permanentes (G), désignées dans CIM'Feu EC2 comme « Charges permanentes totales » et un type d'action variable ( $Q_{k,1}$ ), désigné dans CIM'Feu EC2 comme « Charges d'exploitation ». Le coefficient  $\psi_1$  définissant la valeur fréquente à adopter pour l'action variable dominante lorsque celle-ci est une charge d'exploitation est automatiquement proposé par le logiciel en fonction du type de local, à renseigner par l'utilisateur.

Rien n'interdit toutefois au projeteur de considérer une combinaison d'actions variables. Il lui appartiendra dans ce cas de définir un chargement équivalent permettant d'obtenir le niveau de sollicitation souhaité. Ainsi par exemple, si en plus des charges d'exploitation, le projet requiert de considérer l'action variable (Sn) de la neige (projet sur un site dont l'altitude est supérieure à 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer – voir NF EN 1991-1-3/NA), on ajoutera aux actions permanentes la valeur  $\psi_2(Sn)$  avec  $\psi_2 = 0,2$ .

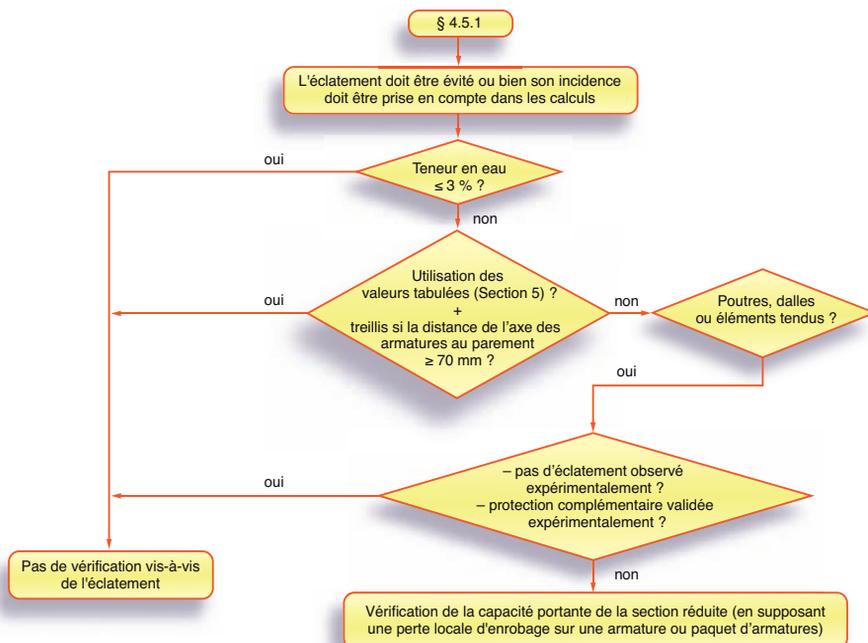
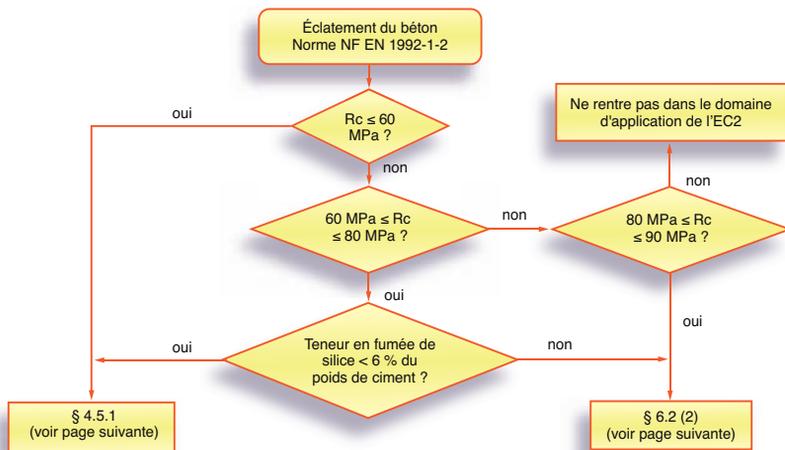
## 3.2 – Éclatement

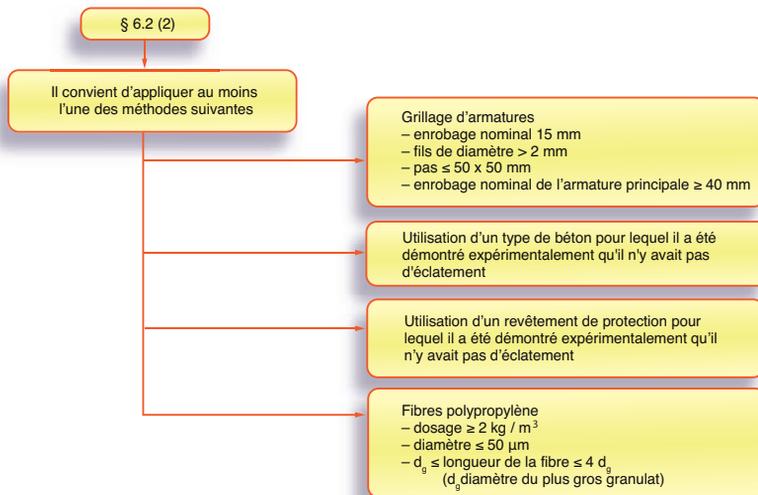
---

Les schémas ci-après résument l'ensemble des prescriptions données dans la norme NF EN 1992-1-2 pour la prise en compte du phénomène d'éclatement.

Ils définissent les situations pour lesquelles des vérifications ou des dispositions complémentaires sont nécessaires. Ainsi, le concepteur devra selon les cas, vérifier par calcul la capacité portante d'une section réduite (en considérant une perte locale d'enrobage sur une armature ou un paquet d'armatures situé à proximité du parement), ou vérifier expérimentalement que le béton utilisé n'est pas sujet à éclatement, ou encore, par exemple, ajouter des fibres de polypropylène à la composition du béton.

On observe sur les schémas ci-après que la vérification par calcul de la capacité portante d'une section réduite n'est demandée que pour les bétons dont la teneur en eau est supérieure à 3 %. Or, dans le même temps, la norme NF EN 1992-1-2 précise que les caractéristiques thermiques et mécaniques qu'elle prescrit, seules admises dans CIM'Feu EC2, ne s'appliquent qu'aux bétons dont la teneur en eau est inférieure à 3 %. En conséquence, CIM'Feu EC2 ne propose aucune procédure particulière pour une vérification complémentaire par calcul dédiée à la prise en compte du phénomène d'éclatement.





### 3.3 - Propriétés à chaud des matériaux béton et acier

Les propriétés à chaud des matériaux sont données dans la section 3 de la norme NF EN 1992-1-2 et à la clause 6.1 (5) de la norme NF EN 1992-1-2 /NA pour ce qui concerne la réduction de résistance aux températures élevées des bétons de résistances caractéristiques comprises entre 60 et 80 MPa.

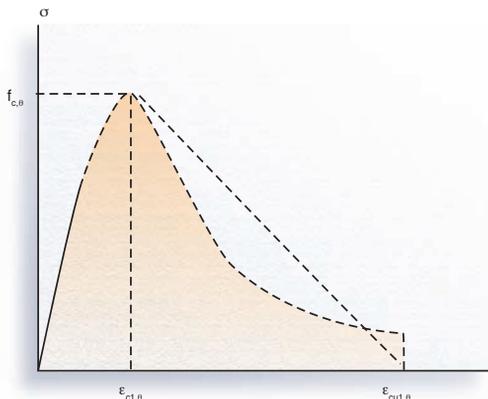
Dans les calculs relatifs aux justifications, des coefficients de sécurité partiels sont affectés aux matériaux béton et acier. En situation d'incendie, ces coefficients prennent les valeurs suivantes :

Béton:  $\gamma_M = 1,0$

Acier:  $\gamma_M = 1,0$

#### Béton en compression

Les propriétés de résistance et de déformation du béton sous contrainte uniaxiale à températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation, illustrée à la figure ci-contre.



Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3 \varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	Pour des questions d'ordre numérique, il convient d'adopter une partie descendante. Les modèles linéaires ou non linéaires sont admis.

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres : la résistance à la compression  $f_{c,\theta}$  et la déformation  $\varepsilon_{c1,\theta}$  correspondant à  $f_{c,\theta}$ .

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont données dans le tableau ci-après en fonction des températures du béton. Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Les paramètres spécifiés dans le tableau peuvent être utilisés pour du béton de densité normale réalisé avec des granulats siliceux ou des granulats calcaires (sont considérés comme granulats calcaires ceux contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires).

Température du béton $\theta$	Granulats siliceux			Granulats calcaires		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	-	-	0,00	-	-

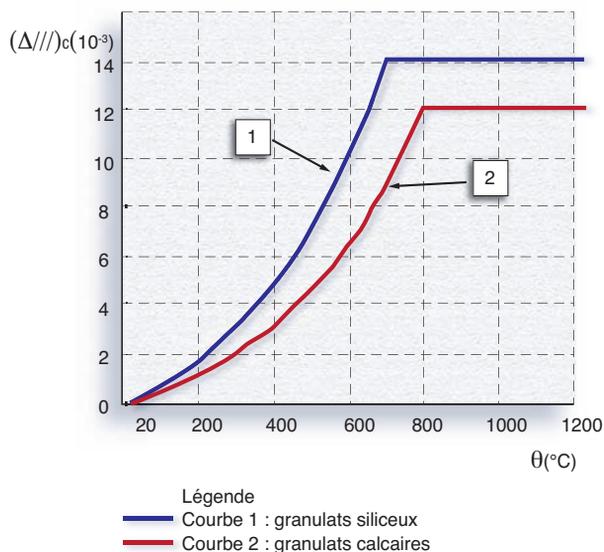
Le logiciel CIM'Feu EC2 permet la vérification d'éléments en béton à haute résistance dont la résistance caractéristique ne dépasse pas 80 MPa.

Pour des bétons de résistances caractéristiques comprises entre 60 et 80 MPa, la réduction de résistance à chaud donnée dans le tableau précédent n'est plus applicable. Il convient de lui substituer la loi de réduction prescrite dans la norme NF EN 1992-1-2/NA.

Température du béton $\theta$ (°C)	0	50	100	314	600	1000
$f_{c,\theta}/f_{ck}$	1	1	0,9	0,9	0,45	0

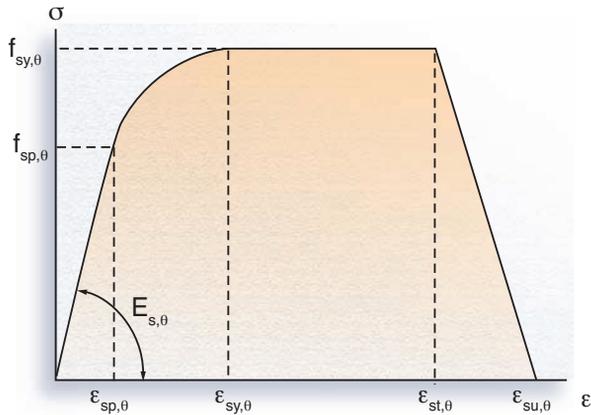
## Dilatation thermique du béton

La variation de la dilatation thermique des bétons à granulats calcaire et siliceux en fonction de la température est illustrée dans la figure ci-dessous.



## Acier de béton armé

Les propriétés de résistance et de déformation de l'acier de béton armé aux températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation, illustrée à la figure ci-après.



Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$	Module tangent
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	—
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	—
Paramètre*	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Armature de classe A : $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Fonctions	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	
* Les valeurs des paramètres $\varepsilon_{pt,\theta}$ et $\varepsilon_{pu,\theta}$ pour l'acier de précontrainte peuvent être obtenues dans le tableau 3.3. Les armatures de Classe A sont définies dans l'Annexe C de l'EN 1992-1-1.		

Écrite pour le comportement en traction de l'acier, la relation contrainte-déformation est également applicable pour le comportement en compression.

La relation contrainte-déformation est définie par trois paramètres :

- la pente de la zone élastique linéaire  $E_{s,\theta}$
- la limite de proportionnalité  $f_{sp,\theta}$
- la contrainte maximale  $f_{sy,\theta}$

Les valeurs de chacun de ces paramètres sont données dans le tableau ci-après en fonction des températures pour des aciers de la classe N, seule classe autorisée par l'Annexe Nationale. Pour les valeurs de température intermédiaires, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Température de l'acier $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	laminé à chaud	formé à froid	laminé à chaud	formé à froid	laminé à chaud	formé à froid
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

## Acier de précontrainte

L'allongement des aciers de précontrainte est calculé dans le logiciel CIM'Feu EC2 en considérant un allongement initial résultant des deux hypothèses: la tension d'origine est considérée égale à 80 % de la résistance caractéristique en traction  $f_{pk}$  de l'acier de précontrainte et la perte de précontrainte par relaxation est considérée égale à 20 % de la tension d'origine.

Les propriétés de résistance et de déformation de l'acier de précontrainte à températures élevées peuvent être obtenues par le même modèle mathématique que celui présenté pour l'acier de béton armé.

Les valeurs des paramètres pour les aciers de précontrainte formés à froid (torons et fils) et trempés et revenus (barres) à températures élevées sont données par:  $f_{py,\theta}/(\beta f_{pk})$ ,  $f_{pp,\theta}/(\beta f_{pk})$ ,  $E_{p,\theta}/E_p$ ,  $\epsilon_{pt,\theta}$ ,  $\epsilon_{pu,\theta}$ . Ces paramètres sont identiques à ceux présentés précédemment pour les aciers de béton armé. Seul l'indice s devient p pour précontrainte.

La valeur de  $\beta$  est liée au choix de la Classe A ou de la Classe B. Pour la Classe A, seule autorisée par l'Annexe Nationale,  $\beta$  est donné par l'expression :

$$\beta = \left[ \left( \frac{\varepsilon_{ud} - f_{p0,1k}/E_p}{\varepsilon_{uk} - f_{p0,1k}/E_p} \right) \times \left( \frac{f_{pk} - f_{p0,1k}}{f_{pk}} \right) + \frac{f_{p0,1k}}{f_{pk}} \right]$$

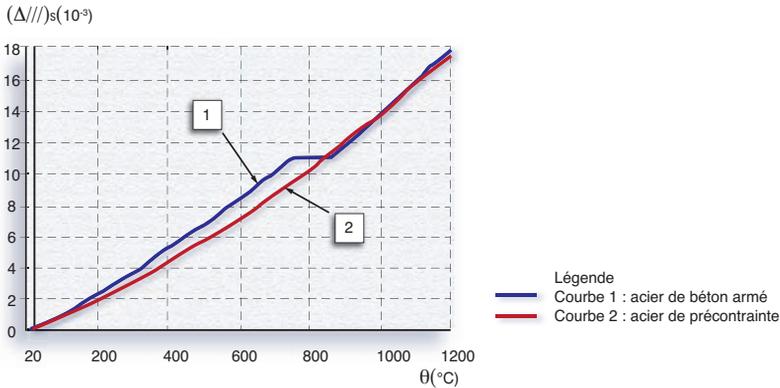
où les définitions et valeurs de  $\varepsilon_{ud}$ ,  $\varepsilon_{uk}$ ,  $f_{p0,1k}$ ,  $f_{pk}$  et  $E_p$  à température normale sont données dans la clause 3.3 de l'EN 1992-1-1.

Température de l'acier $\theta [^{\circ}\text{C}]$	$f_{py,0} / (\beta f_{pk})$			$f_{pp,0} / (\beta f_{pk})$		$E_{p,0} / E_p$		$\varepsilon_{pt,0} [-]$	$\varepsilon_{pu,0} [-]$
	ff		t & r	ff	t & r	ff	t & r	ff, t & r	ff, t & r
	Classe A	Classe B							
1	2a	2b	3	4	5	6	7	8	9
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,050	0,100
100	1,00	0,99	0,98	0,68	0,77	0,98	0,76	0,050	0,100
200	0,87	0,87	0,92	0,51	0,62	0,95	0,61	0,050	0,100
300	0,70	0,72	0,86	0,32	0,58	0,88	0,52	0,055	0,105
400	0,50	0,46	0,69	0,13	0,52	0,81	0,41	0,060	0,110
500	0,30	0,22	0,26	0,07	0,14	0,54	0,20	0,065	0,115
600	0,14	0,10	0,21	0,05	0,11	0,41	0,15	0,070	0,120
700	0,06	0,08	0,15	0,03	0,09	0,10	0,10	0,075	0,125
800	0,04	0,05	0,09	0,02	0,06	0,07	0,06	0,080	0,130
900	0,02	0,03	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03	0,085	0,135
1 000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,090	0,140
1 100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,095	0,145
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,100	0,150

Note : pour des valeurs intermédiaire de température, une interpolation linéaire peut être utilisée

## Dilatation thermique des aciers de béton armé et de précontrainte

La variation de la dilatation thermique des aciers de béton armé et de précontrainte en fonction de la température est illustrée à la figure suivante.



## Liste des types d'acier pris en compte dans CIM'Feu EC2

1. acier de béton armé laminé classe B ou C
2. acier de béton armé laminé classe A
3. acier de béton armé formé classe B ou C
4. acier de béton armé formé classe A
5. acier de précontrainte passif trempé et revenu classe A – barre
6. acier de précontrainte passif formé classe A – fil
7. acier de précontrainte passif formé classe A – toron
8. acier de précontrainte actif trempé et revenu classe A – barre
9. acier de précontrainte actif formé classe A – fil
10. acier de précontrainte actif formé classe A – toron
11. acier de béton armé laminé classe B ou C – TS ou barres soudées en X
12. acier de béton armé laminé classe A – TS ou barres soudées en X
13. acier de béton armé formé classe B ou C – TS ou barres soudées en X
14. acier de béton armé formé classe A – TS ou barres soudées en X
15. acier de béton armé laminé classe B ou C – barres
16. acier de béton armé laminé classe A – barres
17. acier de béton armé formé classe B ou C – barres
18. acier de béton armé formé classe A – barres

Attributs par défaut:

N° type acier	Fyk ou fpk (MPa)	Es ou Ep (GPa)
1 à 4, 11 à 18	500	200
5, 6, 8, 9	1 860	205
7, 10	1 860	195

### **Listes ordonnées des types d'aciers proposés dans les menus poutres**

En travée: valeur par défaut = 1

Liste ordonnée: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Sur appuis: valeur par défaut = 1

Liste ordonnée: 1, 2, 3, 4

Armatures transversales: valeur par défaut = 1

Liste ordonnée: 1, 2

### **Listes ordonnées des types d'aciers proposés dans le menu dalle**

En travée: valeur par défaut = 1

Liste ordonnée: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Sur appuis: valeur par défaut = 11

Liste ordonnée: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18

### **Liste ordonnée des types d'aciers proposés dans les menus poteaux et murs**

Valeur par défaut = 1

Liste ordonnée: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

# Chapitre 4 Utilisation du logiciel CIM'Feu EC2

## 4.1 - Configuration du matériel

---

Le logiciel a été conçu pour un poste de type PC, sous environnement WINDOWS® (2000, XP, VISTA ou 7). La configuration minimale requise pour un fonctionnement convenable est la suivante :

CONFIGURATION MINIMALE  
Microprocesseur Intel® Pentium® 75  
Affichage couleurs VGA 1 024 x 768 (16 bits)  
512 Mo de RAM

## 4.2 - Installation du logiciel

---

Le logiciel CIM'Feu EC2 est livré sur CD-ROM. La séquence d'installation est la suivante :

1. Introduire le CD-ROM dans le lecteur ;
2. Lancer, sous **WINDOWS-Explorer** ou sous le menu « **démarrer** », l'exécution du fichier « **Setup.msi** » contenu dans le CD-ROM ;
3. Se laisser guider par les menus successifs.

Il est recommandé de garder le répertoire d'installation proposé par défaut par le programme d'installation (**C:\Program Files\CSTB\CimfeuEC2**).

En fin d'installation, le répertoire choisi pour l'application contient plusieurs fichiers dont un fichier exécutable « **CimfeuEC2.exe** » ainsi que des exemples d'application ayant des extensions « **.dat** ». En même temps, une icône de raccourci est créée dans la barre « **programmes** » du menu « **démarrer** ». Le CD-ROM peut alors être ôté du lecteur et rangé : sa présence n'est en effet pas nécessaire à l'exécution du logiciel CIM'Feu EC2.

Dans le cas où une **réinstallation** est entreprise par la suite (écrasement accidentel de fichiers ou autres...), il est nécessaire d'opérer au préalable une procédure de **désinstallation** à l'aide de la fonction « **ajout/suppression de programmes** » contenue dans le menu « **panneau de configuration** » de Windows.

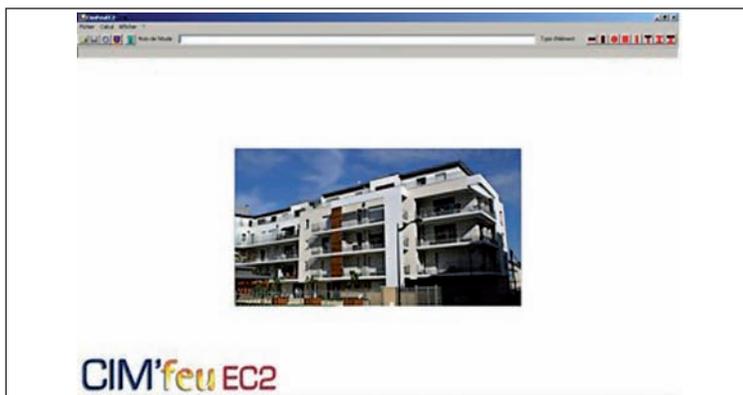
## 4.3 - Lancement du logiciel

Le lancement du logiciel est effectué en double-cliquant sur l'icône CimfeuEC2 de la barre « programmes » du menu « démarrer ». On obtient alors l'écran suivant.



Cet écran constitue L'ÉCRAN D'ENTRÉE de l'application. Il rappelle un avertissement important concernant l'interprétation des résultats fournis en regard du problème traité.

La suite du traitement s'opère en **cliquant une fois sur le bouton « OK »**. On obtient alors L'ÉCRAN D'ACCUEIL du logiciel.



C'est à partir de cet écran que tous les écrans de saisie des données pour les différents types d'éléments sont appelés. Sa conception est conforme au standard WINDOWS: toutes les fonctions peuvent être utilisées à partir des menus texte, mais également à partir des boutons de raccourcis disposés immédiatement en dessous.

## 4.4 - Menus texte

---

### 4.4.1 - Menu « Fichier »

Ce menu comporte les fonctions suivantes:

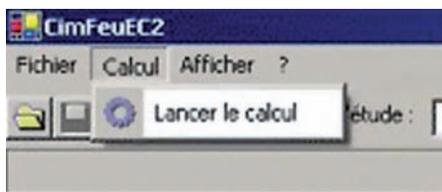
- **Ouvrir**: ouvre un projet existant.
- **Enregistrer**: enregistre un projet sur disque déjà doté d'un nom.
- **Enregistrer sous**: enregistre un projet sur disque non encore doté d'un nom.
- **Quitter**: quitte l'application CIM'Feu EC2.



Dans le cas où un projet en cours est abandonné sans avoir été enregistré, il est demandé à l'utilisateur s'il souhaite ou non l'enregistrer.

### 4.4.2 - Menu « Calcul »

Ce menu présente une seule fonction et permet de lancer le traitement une fois que le fichier de données est constitué. Le calcul thermique correspondant au calcul du champ de température dans la section étudiée au bout du temps spécifié par l'utilisateur est effectué, suivi immédiatement du calcul mécanique qui procède au calcul des sollicitations résistantes.



### 4.4.3 - Menu « Afficher »

Ce menu propose une seule fonction: celle de visualiser à l'écran le champ de température dans la section considérée sous forme de courbes isovaleurs en couleurs différenciées.





#### 4.4.4 - Menu « ? »

Ce menu propose un certain nombre d'informations utiles, dont notamment les adresses des sites Internet de CIM-béton et du CSTB, ainsi que le présent fichier explicatif sur l'utilisation du logiciel que l'on atteint en cliquant sur « Sommaire ».

## 4.5 - Boutons de raccourcis

---

Les boutons disposés en dessous de la ligne des menus texte correspondent à des raccourcis des principales fonctions décrites ci-dessus.



Ouvre un fichier de données existant



Enregistre le fichier de données du projet en cours



Lance le calcul (thermique et mécanique)



Permet de visualiser à l'écran les zones d'isovaleurs de températures

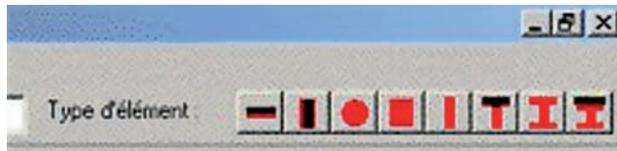


Appelle la calculatrice scientifique WINDOWS

## 4.6 - Boutons de choix de l'élément

---

Les boutons disposés en haut à droite de l'écran permettent d'accéder aux écrans de saisie des données dédiés à chaque élément. Une aide contextuelle précise le type d'élément correspondant aux symboles adoptés sur les boutons.



Si l'utilisateur décide de changer d'élément sans avoir sauvegardé les modifications effectuées sur le fichier précédent, une boîte de dialogue l'invitera à sauvegarder ou non le fichier courant.

## 4.7 - Zone d'attribution d'un nom au calcul effectué

Une zone d'attribution d'un nom à l'étude en cours est proposée afin de permettre une meilleure traçabilité des calculs. Cette zone est située en haut de l'écran entre les deux zones de boutons précédemment décrites. Le nom de l'étude ne peut être attribué qu'une fois le type d'élément choisi.



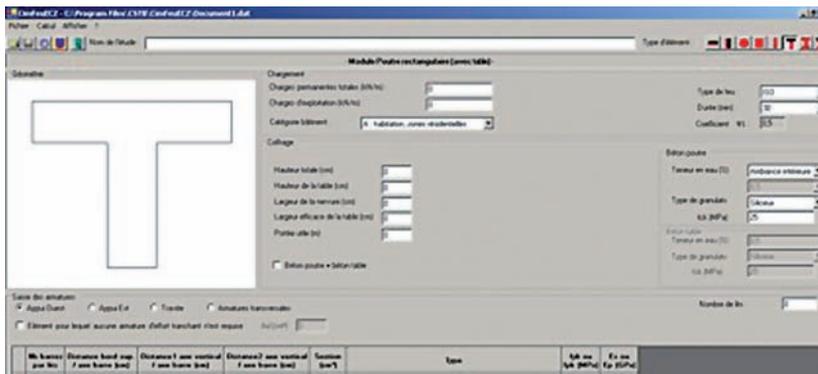
## 4.8 - Présentation des écrans de saisie de données des éléments

Une fois choisi un type d'élément en cliquant sur le bouton correspondant, on accède à l'un des écrans de saisie proposés.

Afin que l'interface graphique soit conviviale et efficace, le périmètre visuel de l'application est circonscrit à une seule fenêtre. Ce périmètre clairement établi diminue les manipulations de gestion de fenêtres en permettant à l'utilisateur de manipuler l'application en bloc (icônisation, fermeture, passage en avant-plan). L'ensemble des fonctionnalités est donc disponible à partir de cette fenêtre unique dans laquelle on trouve, outre les fonctionnalités déjà décrites, 4 zones communes à chacun des éléments :

- géométrie ;
- chargement ;
- coffrage ;
- armatures.

L'image ci-dessous illustre ces différentes zones dans le cas de la poutre avec table.



### **La zone « Géométrie » (ou vue)**

La zone graphique (ou vue) correspond à la représentation de l'élément en cours de traitement. Une mise à l'échelle est effectuée automatiquement une fois toutes les informations nécessaires renseignées.

### **La Zone « Chargement »**

La zone chargement contient tous les champs de saisie correspondants aux actions mécaniques (forces et moments le cas échéant) ainsi qu'au type et à la durée de la sollicitation thermique.

### **La Zone « Coffrage »**

La zone coffrage contient tous les champs de saisie correspondants aux dimensions de l'élément ainsi qu'à la nature du ou des bétons utilisés.

### **La Zone « Saisie des armatures »**

La zone de saisie des armatures permet de définir aux différents lieux nécessaires sur l'élément traité le nombre de barres et, pour chacune d'elles, son type, sa section ou son diamètre, ses propriétés et sa position.

La définition d'un « lit » d'armature est particulière dans CIM'Feu EC2. Un « lit » définit un groupe d'armatures dont tous les qualificatifs donnés ci-dessus sont identiques (même type, même section, même enrobage...). Cette définition permet de définir les armatures par paquets plutôt qu'une à une, accélérant ainsi sensiblement la mise en données.

### **Particularités**

La fenêtre est redimensionnable afin de s'adapter aux paramètres utilisateur (définition de la taille de l'écran et taille des polices).

Le fonctionnement du logiciel est indépendant du choix du séparateur des décimaux qui aura été choisi par l'utilisateur.

## 4.9 - Calcul des poutres (rectangulaires, en té et en I, avec ou sans table)

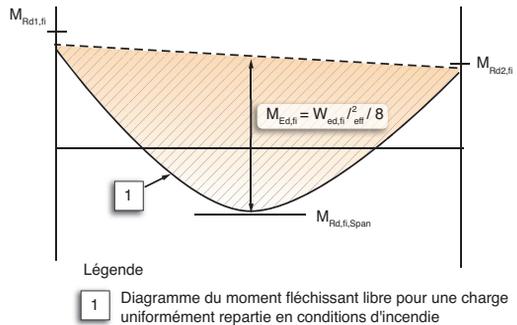
### 4.9.1 - Justifications vis-à-vis de la flexion

Vis-à-vis du moment fléchissant, le calcul des poutres est effectué de la manière suivante.

1. Calcul du champ de température dans la section au temps demandé.
2. Calcul du moment résistant de la section en travée, compte tenu de l'évolution des propriétés du béton et des armatures, due à l'échauffement ;
3. Calcul des moments résistants sur les appuis, compte tenu de l'évolution des propriétés du béton et des armatures, due à l'échauffement ;
4. Calcul du moment résistant final de la poutre (demi-somme des moments résistants sur appuis à laquelle s'ajoute le moment résistant en travée) ;

Une fois la valeur du moment résistant final obtenue, l'utilisateur doit la comparer à celle du moment développé, sous la combinaison de calcul (voir 3.1), dans la travée isostatique de référence de la poutre considérée.

La figure ci-contre, tirée de l'Annexe E de la norme NF EN 1992-1-2, illustre le principe de vérification.



### 4.9.2 - Justifications vis-à-vis de l'effort tranchant

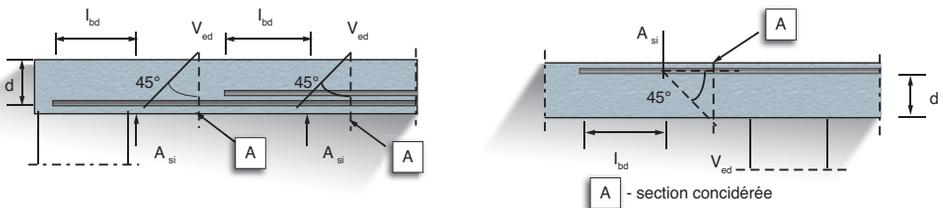
Vis-à-vis de l'effort tranchant, le champ de température étant déjà connu, la justification des poutres consiste à calculer d'abord l'effort tranchant résistant, compte tenu de l'évolution des propriétés du béton et des armatures. Cet effort se présente sous différentes formes selon que l'élément étudié nécessite ou non des armatures d'effort tranchant.

- Dans le cas des éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise, l'effort tranchant résistant est l'effort tranchant résistant de calcul  $V_{Rd,c}$  défini à l'aide de l'expression (6.2a) de l'article 6.2.2 de la norme NF EN 1992-1-1. La résistance à l'effort tranchant repose dans ce cas sur la résistance du béton en cisaillement.

- Dans le cas des éléments pour lesquels des armatures d'effort tranchant sont requises, la résistance à l'effort tranchant repose alors sur le modèle bielle-tirant et l'effort tranchant résistant a deux composantes : la résistance à l'effort tranchant  $V_{Rd,s}$  assurée par les armatures et la résistance à l'effort tranchant  $V_{Rd,max}$  assurée par les bielles de béton. Ces résistances sont définies à l'aide des expressions (6.8) et (6.9) respectivement de l'article 6.2.3 de la norme NF EN 1992-1-1.

Dépendant du contexte, le fait qu'un élément de poutre nécessite ou non des armatures d'effort tranchant est bien évidemment de la responsabilité de l'utilisateur.

Les éléments de type poutre pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise sont les éléments secondaires (linteaux de portée inférieure à 2 mètres par exemple) qui ne contribuent pas de manière significative à la résistance et à la stabilité d'ensemble de la structure. Lorsque l'utilisateur choisit de déclarer que l'élément ne nécessite pas d'armature d'effort tranchant, il doit cocher la case correspondant à cette option. Ce faisant, il active la case «  $A_{si}$  (cm<sup>2</sup>) » qui est l'aire de la section des armatures tendues, prolongées au-delà de la section considérée sur une longueur supérieure ou égale à «  $l_{bd} + d$  » correspondant à la longueur d'ancrage de référence plus la hauteur utile (voir figure ci-dessous tirée de la norme NF EN 1992-1-1). Il est nécessaire de renseigner cette case car les armatures longitudinales déclarées sur appui par ailleurs ne sont pas nécessairement toutes prolongées sur une telle longueur.



L'effort tranchant sollicitant  $V_{ed}$ , à comparer par l'utilisateur aux différentes formes de l'effort tranchant résistant, est également calculé automatiquement en tenant compte d'une répartition uniforme des charges et des continuités éventuelles.

La justification vis-à-vis de l'effort tranchant est effectuée de manière générale à l'appui. Elle est complétée pour les poutres en I, avec ou sans table, équipées d'un blochet d'une justification en extrémité de blochet. L'effort tranchant résistant est alors calculé à la section après biseau alors que l'effort tranchant sollicitant est calculé à la section avant biseau. Cette façon de procéder permet une vérification unique et sécuritaire pour la zone de blochet.

### 4.9.3 - Limites d'emploi du logiciel – Simplifications admises – Astuces d'utilisation

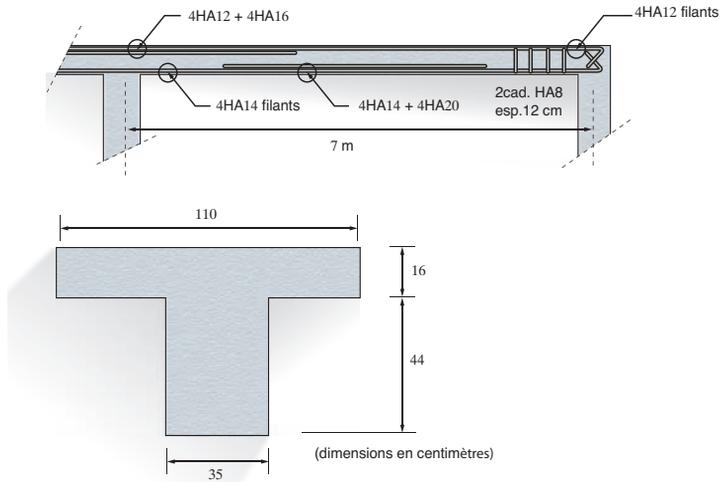
1. CIM'feu EC2 peut calculer des poutres ayant au plus 90 cm de largeur et 120 cm de hauteur. L'épaisseur minimale de la table de compression est de 8 cm. L'attention est attirée sur le fait que cette dernière valeur ne doit pas être nulle, le calcul des températures étant affecté par ce paramètre.
2. CIM'feu EC2 permet pour les éléments de poutre avec table de compression de déclarer un béton dans la table différent de celui de la poutre. Le module pour les poutres rectangulaires ou en I (sans table de compression, ce qui pourrait être le cas de certaines pannes ou poutres de bâtiments industriels, sans plancher) considère que les poutres sont chauffées sur toute la périphérie de leur section. Cependant, dans le cas où un plancher est présent mais que l'utilisateur ne souhaite pas prendre en compte sa contribution à la stabilité de l'élément, il est loisible dans les modules « poutre rectangulaire avec table » ou « poutre en I avec table » de déclarer une résistance caractéristique  $f_{ck}$  nulle dans la table. Dans ce cas, la table ne sera prise en compte que dans la phase de calcul thermique.
3. Le logiciel n'accepte en introduction de données que les charges uniformément réparties. Ces charges sont utilisées pour déterminer les moments isostatiques à chaud de la travée de référence ainsi que les efforts tranchants appliqués à chaud au niveau des appuis, à l'état limite ultime. **Les valeurs de ces charges n'ont aucune incidence sur le calcul des sollicitations résistantes.** Il est donc loisible à l'utilisateur de calculer avec CIM'Feu EC2 des poutres supportant des charges quelconques, mais dans ce cas, les sollicitations **appliquées** à chaud devront être déterminées par un autre moyen.

### 4.9.4 - Exemple de calcul

Cet exemple a pour objectif de présenter la manière de calculer les poutres, mais compte tenu de l'homogénéité de traitement qui a été adoptée pour la gestion des interfaces lors du codage, il sera traité de manière **détaillée** de façon à montrer comment un **problème quelconque** (poutre, poteau, dalle) peut être mené avec CIM'Feu EC2. Tous les appels d'écrans, les sauvegardes de données et les récupérations de résultats se font de la même manière dans CIM'Feu EC2. Les autres exemples de calculs seront traités avec un niveau de détails moins riche, afin d'éviter des redondances inutiles, risquant d'alourdir les explications.

Il est donc recommandé à l'utilisateur de lire attentivement les explications qui suivent, concernant le calcul d'une poutre selon la norme NF EN 1992-1-2, en actionnant, au fur et à mesure de l'avancement des explications, les commandes sur son ordinateur.

Soit la poutre de plancher définie par les schémas suivants.

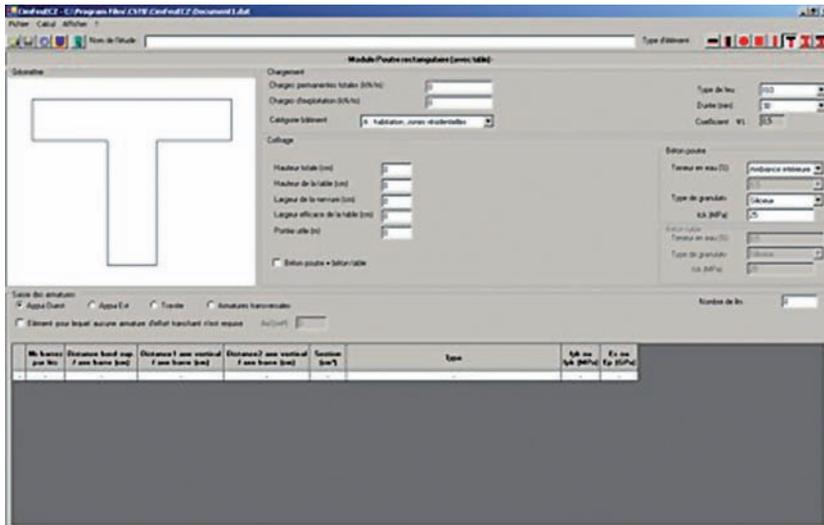


## Hypothèses

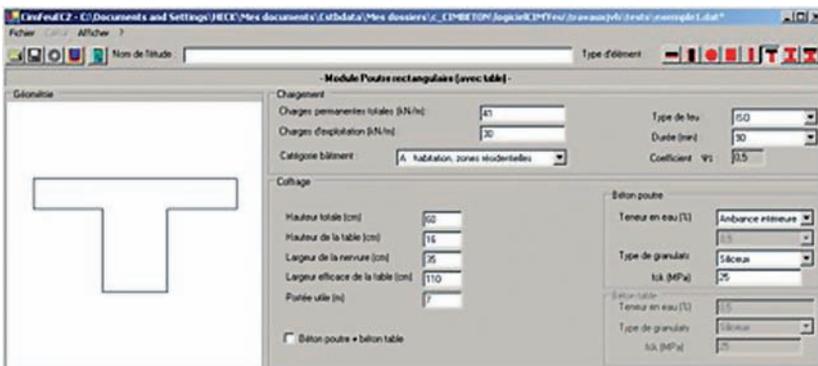
- La poutre est au RDC haut d'une résidence d'habitation. Elle est en ambiance intérieure.
- Béton C25/30 à granulats siliceux.
- Armatures en acier de béton armé HA laminé de classe B.
- Charge permanente totale: 41 kN/ml.
- Charge d'exploitation: 30 kN/ml
- Enrobage 1<sup>ère</sup> nappe (travée et appuis): 3 cm.
- Enrobage 2<sup>e</sup> nappe (travée et appuis): 5,5 cm.
- Stabilité au feu demandée: 1 h 30 min sous feu normalisé ISO R 834.

## Introduction des données

1. Lancer "**CimfeuEC2.exe**".
2. Cliquer sur le bouton "**OK**" de l'écran d'entrée.
3. Sur l'écran d'accueil, cliquer sur l'icône "**Poutre rectangulaire (avec table de compression)**" de la barre d'éléments pour arriver sur l'écran de saisie du module correspondant.



Le paramétrage du problème défini ci-dessus conduit à remplir les zones de chargement et de coffrage de la manière suivante.



La saisie des données se poursuit en cliquant dans la zone de saisie des armatures sur les boutons de chaque zone et pour chacune d'elles à renseigner d'abord le nombre de lits pour les armatures longitudinales (respectivement le nombre de brins pour les armatures d'effort tranchant) puis, pour chaque lit (respectivement chaque brin ou paire de brin), les attributs des armatures correspondantes en termes de section (respectivement diamètre) et propriétés.

Le paramétrage du problème défini ci-dessus donne pour l'appui Ouest.

**Module Poutre rectangulaire (avec table)**

Chargement

Charges permanentes totales (kN/m) : 41  
 Charges d'exploitation (kN/m) : 30  
 Type de feu : F50  
 Durée (min) : 30  
 Catégorie bâtiment : A - habitation, zones résidentielles  
 Coefficient  $\eta_1$  : 0,5

Collage

Hauteur totale (cm) : 60  
 Hauteur de la table (cm) : 16  
 Largeur de la nervure (cm) : 25  
 Largeur efficace de la table (cm) : 110  
 Pointe utile (m) : 7  
 Béton poutre + béton table

Béton poutre

Teneur en eau (%) : Ancreance intérieure  
 Type de granulats : Sableux  
 $f_{tk}$  (MPa) : 25  
 Béton table  
 Teneur en eau (%) : 0,5  
 Type de granulats : Sableux  
 $f_{tk}$  (MPa) : 25

Saisie des armatures

Appui Ouest  Appui Est  Travée  Armatures transversales  
 Élément pour lequel aucune armature d'État limitant n'est requise  $A_{st}$  (cm<sup>2</sup>) : [ ]

N° barres par file	Distance bord sup / axe barre (cm)	Distance1 axe vertical / axe barre (cm)	Distance2 axe vertical / axe barre (cm)	Section (cm <sup>2</sup> )	Type	$f_{yk}$ ou $f_{yk}$ (MPa)	$E_s$ ou $E_p$ (GPa)
1	4	3,6	4,05	9,7	1,13	Acier de béton armé laminé classe B ou C	500 / 200
2	4	6,3	4,05	9,7	2,01	Acier de béton armé laminé classe B ou C	500 / 200

Le paramétrage du problème défini ci-dessus donne pour l'appui Est.

**Module Poutre rectangulaire (avec table)**

Chargement

Charges permanentes totales (kN/m) : 41  
 Charges d'exploitation (kN/m) : 30  
 Type de feu : F50  
 Durée (min) : 30  
 Catégorie bâtiment : A - habitation, zones résidentielles  
 Coefficient  $\eta_1$  : 0,5

Collage

Hauteur totale (cm) : 60  
 Hauteur de la table (cm) : 16  
 Largeur de la nervure (cm) : 25  
 Largeur efficace de la table (cm) : 110  
 Pointe utile (m) : 7  
 Béton poutre + béton table

Béton poutre

Teneur en eau (%) : Ancreance intérieure  
 Type de granulats : Sableux  
 $f_{tk}$  (MPa) : 25  
 Béton table  
 Teneur en eau (%) : 0,5  
 Type de granulats : Sableux  
 $f_{tk}$  (MPa) : 25

Saisie des armatures

Appui Ouest  Appui Est  Travée  Armatures transversales  
 Élément pour lequel aucune armature d'État limitant n'est requise  $A_{st}$  (cm<sup>2</sup>) : [ ]

N° barres par file	Distance bord sup / axe barre (cm)	Distance1 axe vertical / axe barre (cm)	Distance2 axe vertical / axe barre (cm)	Section (cm <sup>2</sup> )	Type	$f_{yk}$ ou $f_{yk}$ (MPa)	$E_s$ ou $E_p$ (GPa)
1	4	3,6	4,05	9,7	1,13	Acier de béton armé laminé classe B ou C	500 / 200

Le paramétrage du problème défini ci-dessus donne pour la Travée.

Nb barres par file	Distance bord inf / axe barre (mm)	Distance1 axe vertical / axe barre (mm)	Distance2 axe vertical / axe barre (mm)	Section (cm <sup>2</sup> )	Type	fyk ou tyk (MPa)	Ex ou Ep (GPa)
1	4	3,7	4,85	9,7	Axe de béton armé fermé classe B ou C	500	200
2	4	6,5	4,85	9,7	Axe de béton armé fermé classe B ou C	500	200

Le paramétrage du problème défini ci-dessus donne pour les armatures d'effort tranchant.

Nb barres	Distance axe vertical / axe barre (mm)	Distance (mm)	Type	fyk ou tyk (MPa)	Ex ou Ep (GPa)
1	2	4,85	B	500	200
2	2	9,7	B	500	200

Les cases sont dotées d'une aide contextuelle: il suffit de pointer (sans cliquer) le curseur de la souris sur la zone à remplir ou à choisir et un court texte explicatif apparaît sur l'écran. Les libellés des cases sont aussi explicites que le permet l'ergonomie de l'écran. Seules quelques abréviations sont utilisées.

## Remarques

1. CIM'Feu EC2 accepte indifféremment le point ou la virgule pour séparateur décimal. Quel que soit le séparateur de l'utilisateur ("paramètres régionaux" de WINDOWS), CIM'Feu EC2 affichera une virgule, séparateur adopté en France.
2. On peut passer d'une case à l'autre, soit en pointant la souris sur la case voulue et en cliquant, soit en utilisant la touche TAB.
3. Les armatures sont définies par la position de leur axe longitudinal, les distances aux parois demandées sont donc différentes de l'enrobage, distance du parement de béton à la génératrice **extérieure** de l'armature.

Une fois la feuille de saisie remplie correctement, il ne reste qu'à enregistrer les données par le menu fichier « enregistrer-sous » s'il s'agit d'un problème original ou « enregistrer » s'il s'agit d'une correction d'un fichier déjà existant (dans ce dernier cas, l'enregistrement peut être également fait directement par le bouton de raccourci ad hoc. S'il s'agit d'un « enregistrement sous », il est proposé le répertoire de travail pour le stockage du fichier. Si on veut garder ce répertoire, il n'y a plus qu'à donner un quelconque nom de fichier (nous appellerons ce fichier "**ex I\_poutreT**", par exemple) et de cliquer sur "**Enregistrer**". À noter que le nom de fichier est automatiquement muni par le logiciel d'une extension "**.dat**" (**ex I\_poutreT.dat** pour notre fichier exemple) lors de son enregistrement. Il est donc inutile d'affecter l'extension aux noms de fichiers de données.

Une fois le fichier de données enregistré, le bouton de raccourci pour le lancement d'un calcul complet (dessin d'un engrenage) est dégrisé, il est alors actif.

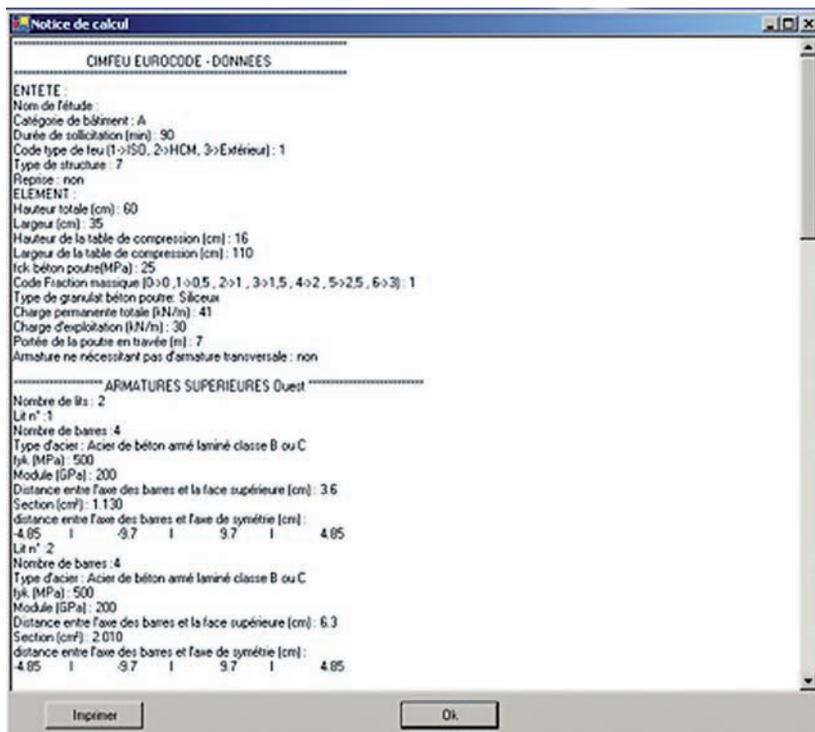
Le calcul peut alors être effectué :

- soit en cliquant sur "**lancer**", puis sur "**Lancer le calcul**";
- soit en cliquant sur le bouton représentant un engrenage.

Ces deux modes de lancement sont tout à fait identiques.

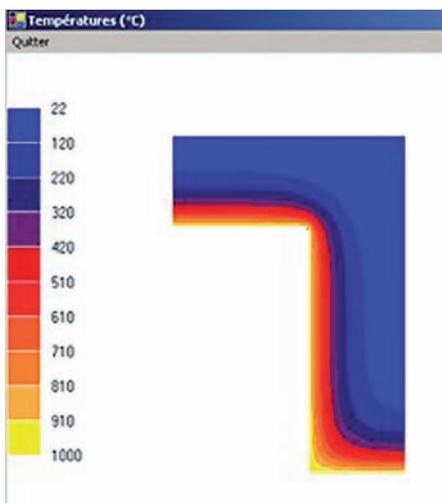
À la fin du calcul (après une minute environ), l'écran ci-contre apparaît automatiquement.

Cet écran est la transcription d'un fichier texte qui a été écrit et, donc, sauvegardé sur le répertoire de travail du disque à la fin du traitement. Il contient toutes les informations relatives au calcul effectué, l'ensemble des données suivi des résultats. Il porte l'extension "**.out**" (il s'agit dans notre cas du fichier "**ex I\_poutreT.out**"). Le défilement à l'écran de tous les résultats peut être effectué à l'aide de l'ascenseur situé à droite de l'écran. Ce fichier peut être imprimé (attention à la configuration précise des pilotes de l'imprimante).



On peut visualiser maintenant les courbes isovaleurs de températures. Pour cela, on sort du fichier résultats précédent en cliquant sur “**OK**”. On est alors ramené à l’écran de traitement de l’élément sur lequel on était précédemment. En cliquant alors sur “**Afficher**”, puis sur “**Isovaleurs**”, ou plus simplement en cliquant sur l’icône représentant un rectangle à dégradé de couleurs, on obtient au bout de quelques secondes l’écran suivant.

Cet écran présente le champ de température dans la demi-section de la poutre (symétrie verticale) au temps de stabilité demandé. L’échelle figurant à gauche est exprimée en degrés Celsius.



Il faut signaler que cet écran a récupéré les données du fichier "**exl\_poutreT.feu**" que CIM'Feu EC2 a écrit sur le disque à la fin du traitement, et qu'il est possible à l'utilisateur d'éditer ce fichier à l'aide d'un éditeur texte WINDOWS quelconque (Notepad de préférence). Ce fichier donne la valeur des températures à chaque nœud d'un maillage de la section à 5 mm x 5 mm (les températures de contours correspondent aux températures atteintes dans le four ISO au bout du temps requis). Ce fichier se trouve sur le répertoire de travail, dans lequel a été stocké le fichier de données.

En cliquant sur "**quitter**", on revient à l'écran de saisie de l'élément sur lequel on était précédemment et CIM'Feu EC2 est prêt à entreprendre un nouveau calcul. À ce stade, la situation est la suivante.

- Sur le disque dur se trouvent écrits les trois fichiers texte "**exl\_poutreT.dat**" (données), "**exl\_poutreT.feu**" (températures), et "**exl\_poutreT.out**" (résultats). Il y a également un fichier "**.txt**" et un fichier "**.sor**" sans intérêt pour l'utilisateur.
- En mémoire vive du logiciel se trouve chargé le problème que l'on vient de traiter, c'est-à-dire que si l'on veut relancer le calcul pour la **poutre précédente avec les mêmes données**, il suffira de cliquer sur le bouton raccourci représentant un engrenage. Si l'on veut relancer le calcul pour la **poutre précédente avec des données différentes**, il suffira de modifier directement sur l'écran de saisie les données concernées puis d'enregistrer pour pouvoir lancer un nouveau calcul. S'agissant d'un autre problème, il y a lieu de sauvegarder le fichier sous un autre nom (ou d'écraser le précédent si on déclare le même nom). Notons que le défaut d'enregistrement du fichier empêche le lancement du calcul par mesure de précaution.

### En résumé, il faut retenir que :

1. CIM'Feu EC2 ne garde en mémoire qu'un problème à la fois.
2. Si une modification a lieu dans un fichier de données existant, il est toujours demandé d'enregistrer avant de pouvoir relancer un calcul.
3. Tous les résultats sont stockés automatiquement sur le disque, dans un répertoire choisi par l'utilisateur (qui est, par défaut, le répertoire c:\Program Files\CSTB\Cimfeu).
4. On peut opérer des modifications dans un fichier de données, les données non modifiées sont inchangées.
5. L'apparition des écrans successifs se fait selon la technologie WINDOWS: le passage de l'un à l'autre des modules « élément » peut se faire à tout moment.

## Format des résultats

CIM'Feu EC2 fournit, au temps de stabilité demandé :

- les moments résistants en travée ;
- les moments résistants aux appuis ;
- les moments résistants finaux obtenus en rajoutant au moment résistant en travée la demi-somme des moments résistants sur appuis ;
- les moments appliqués sur la travée isostatique de référence de la poutre étudiée ;
- l'effort tranchant résistant sous ses différentes formes adaptées à l'élément traité ;
- l'effort tranchant agissant calculé en tenant compte d'une répartition uniforme des charges et des continuités éventuelles.

Les données introduites sont rappelées dans le fichier de résultats et un message relatif au mode de vérification à effectuer par l'utilisateur est affiché (il s'agit des comparaisons entre les valeurs des capacités résistantes et des sollicitations agissantes).

## 4.10 - Calcul des dalles

---

### 4.10.1 - Méthode de justification dans le cas général

L'application nationale de l'annexe E de la norme NF EN 1992-1-2 maintient la méthode anciennement préconisée par le DTU. Elle est basée sur le principe suivant.

**Le moment résistant à chaud d'une dalle hyperstatique, dans une direction donnée, est fonction du moment résistant en travée et des moments résistants sur les appuis, ces derniers prenant en compte le risque de striction des aciers sur les appuis.**

Le risque de striction des aciers dépend de la nature de ces aciers ainsi que de la rotation de la section sur appuis. Selon la norme NF EN 1992-1-2/NA, les rotations limites hors striction des aciers sont fixées comme suit :

- 0,25 pour des aciers HA de classe B et C ;
- 0,10 pour des aciers HA de classe A ;
- 0,08 pour des aciers TS ou des aciers HA soudés en X.

De plus, il est tenu compte, dans les calculs, des phénomènes de gradient thermique résultant de la distribution des températures dans l'épaisseur de la dalle. Évidemment, lorsqu'une ligne d'appui de dalle correspond à un appui simple, le moment résistant correspondant à cette ligne est nul.

### **L'enchaînement des calculs dans le cas général est le suivant :**

1. Calcul du moment résistant de la section en travée, compte tenu de l'évolution des propriétés du béton et de l'acier due à l'échauffement ;
2. Calcul des moments résistants sur les appuis, hors striction des aciers ;
3. Calcul du moment dû au gradient de température entre la face exposée et la face froide ;
4. Calcul du moment dû aux charges appliquées ;
5. Calcul des rotations des sections d'appuis ;
6. Comparaison des valeurs calculées des rotations sur appuis aux valeurs limites fournies par l'Eurocode, ces comparaisons permettant à CIM'Feu EC2 de décider s'il est légitime ou non de mobiliser dans le calcul du moment résistant final les moments résistants sur appuis ;
7. Calcul du moment résistant final (dans une ou deux directions) ;
8. Calcul du moment isostatique appliqué (dans une ou deux directions).

*Le détail de la démarche est proposé en annexe 3.*

### **4.10.2 - Limites d'emploi du logiciel – Simplifications admises – Astuces d'utilisation**

1. CIM'feu EC2 traite des épaisseurs de dalles variant entre 8 et 40 cm.
2. Le logiciel traite le cas des travées de dalles prolongées par une console. Dans ce cas, il est demandé à l'utilisateur de fournir le moment de console sollicitant l'appui considéré, et une vérification du moment résistant de la section d'appui par rapport au moment de console est effectuée par CIM'Feu EC2. Dans le cas où la condition n'est pas respectée (c'est-à-dire lorsque le moment appliqué sur la section d'appui de la console est supérieur au moment résistant à chaud de cette section, compte tenu de la section de béton et des armatures qui s'y trouvent), le traitement de la travée continue en considérant un moment résistant nul sur la ligne d'appui mais l'utilisateur doit prendre en compte le fait qu'il y a ruine de la console.
3. Il est possible de calculer les dalles portant dans une seule direction ou les dalles portant dans les deux directions. L'option est à choisir par l'utilisateur lors de l'introduction des données dans l'écran de saisie dalle (voir plus loin).

Dans le cas particulier d'un panneau de dalle posé sur trois appuis, le calcul par CIM'Feu EC2 se fait en retenant un panneau portant dans une direction (la direction perpendiculaire aux deux appuis parallèles).

4. **Pour le cas des dalles portant dans une direction**, la démarche nécessite le calcul de portées fictives prenant des valeurs différentes selon que la travée est simplement posée sur l'autre rive ou continue au-delà de l'autre rive (voir explications en annexe 3). Pour ce faire, il est demandé à l'utilisateur de préciser si les travées au-delà des lignes d'appui A et B sont des travées intermédiaires ou des travées de rive. Ce renseignement est donné par l'utilisateur en cochant la case « Rive A », respectivement « Rive B », si la travée au-delà de la ligne d'appui A, respectivement B, est une travée de rive. Les cases existent également pour les appuis C et D mais sont inutilisées car le calcul des portées fictives ne suit pas la même démarche dans le cas des dalles portant dans deux directions.
5. CIM'Feu EC2 ne traite que le cas des travées d'égale épaisseur. Cela explique qu'une seule valeur soit à fournir à CIM'Feu EC2 par l'utilisateur.
6. Dans le cas d'un appui de rive, le logiciel considère par défaut un appui simple. Si l'on souhaite prendre en compte les armatures disposées sur cet appui de rive (armatures généralement calculées à froid pour 15 % du moment isostatique en travée) dans l'évaluation des moments résistants, il faut déclarer une longueur de travée fictive dépassant l'appui de rive. Cette longueur doit être faible (2 ou 3 centimètres) et **ne doit pas être déclarée en console**. Cette manière de faire est également indiquée lorsque l'appui de rive est un encastrement: la travée fictive rajoutée permet d'introduire les armatures d'appui et d'évaluer le moment résistant correspondant à cet appui.
7. Seules les charges uniformément réparties constantes sur toutes les travées, peuvent être introduites dans l'écran de saisie. Contrairement au cas des poutres, les valeurs de ces charges ont une influence sur le calcul des capacités résistantes. En effet, le moment appliqué à l'appui est comptabilisé pour le calcul de la rotation plastique de cet appui et, donc, contribue au choix de la prise en compte, ou non, du moment résistant sur cet appui dans le calcul du moment résistant final. L'utilisateur doit donc, en cas de chargement quelconque, rechercher la charge uniformément répartie équivalente à introduire en donnée, l'équivalence étant considérée vis-à-vis de la rotation de la section d'appui. Pour ce faire, on évalue les rotations aux appuis du panneau de dalle considéré simplement appuyé sur son pourtour, et soumis au chargement réel. On écrit ensuite que, pour chacun des quatre appuis du panneau, la charge uniformément répartie équivalente sur le panneau est celle qui produit la même rotation que le chargement réel. Il faut donc définir, dans le cas d'une dalle portant dans les deux directions, quatre charges équivalentes.

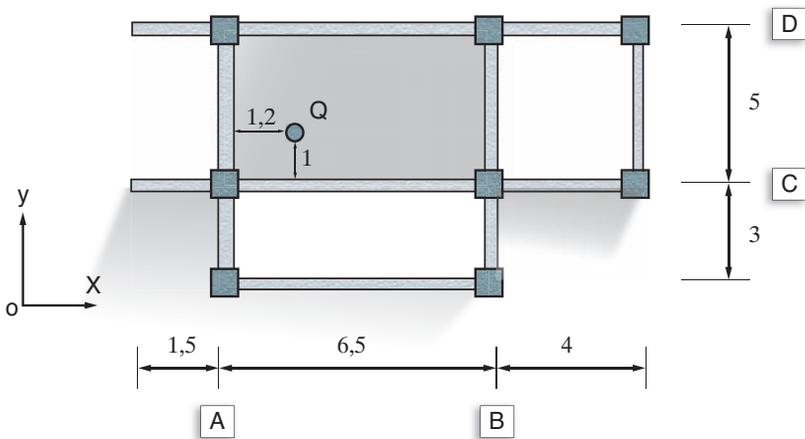
valentes, et dans le cas d'une dalle portant dans une seule direction, deux charges équivalentes (toujours une charge répartie équivalente par appui). Il est évident que, dans le cas d'un chargement symétrique dans une direction, les charges réparties équivalentes auront la même valeur pour les deux appuis situés dans cette direction. Le calcul est donc dans le cas général à effectuer autant de fois qu'il y a de charges réparties équivalentes, les résultats à retenir pour chaque calcul étant ceux relatifs à l'appui considéré. Toutefois, il faut signaler le fait que, dans le cas général, les rotations sur les appuis sont peu sensibles aux valeurs des moments appliqués, ceux-ci étant généralement faibles devant les moments dus au gradient thermique. Par voie de conséquence, on notera une faible variabilité des résultats en faisant varier les charges uniformément réparties équivalentes. Un exemple de ce traitement est fourni au paragraphe 4.7.3 ci-après et montre que, pour quatre valeurs différentes des charges permanentes réparties, les rotations sur les appuis varient très peu et les moments résistants finaux sont en définitive les mêmes.

### 4.10.3 - Exemple de calcul

L'exemple de calcul qui suit a été choisi de manière à montrer les diverses possibilités du logiciel. Il comporte :

- une charge ponctuelle ;
- une console ;
- un appui de rive.

Soit à examiner la tenue au feu du panneau grisé de plancher figuré ci-dessous.



## Hypothèses

- Le panneau est au RDC haut d'une résidence d'habitation. Il est en ambiance intérieure.
- Béton C25/30 à granulats siliceux.
- Armatures en TS d'acier de béton armé laminé de classe A (le fait qu'il s'agisse de treillis soudés n'a d'influence que sur appuis).
- Épaisseur de la dalle : 20 cm.
- Distance de l'axe des armatures au parement le plus proche :
  - travée : 2,8 cm parallèlement à  $O_x$  et 3,3 cm parallèlement à  $O_y$ .
  - appuis : 2,3 cm.
- Armatures en travée du panneau :
  - 5,65  $\text{cm}^2/\text{ml}$  dans la direction  $O_x$  (parallèle au grand côté) ;
  - 12,32  $\text{cm}^2/\text{ml}$  dans la direction  $O_y$  (parallèle au petit côté).
- Armatures sur appuis :
  - 2,51  $\text{cm}^2/\text{ml}$  le long de l'appui file A ;
  - 4,71  $\text{cm}^2/\text{ml}$  le long de l'appui file B ;
  - 7,92  $\text{cm}^2/\text{ml}$  le long de l'appui file C ;
  - 2,01  $\text{cm}^2/\text{ml}$  le long de l'appui file D ;
- Charges appliquées :
  - charge permanente répartie (poids propre de la dalle compris) : 6,2  $\text{kN}/\text{m}^2$  ;
  - charge d'exploitation répartie : 2,5  $\text{kN}/\text{m}^2$  ;
  - charge permanente ponctuelle (Q) : 80 kN ;
  - moment de console sur l'appui A : 9,8  $\text{kNm}/\text{m}$ .
- Durée de stabilité au feu exigée : 1 h 30 min.

Avant de lancer les calculs par CIM'Feu EC2, il faut d'abord déterminer les charges réparties équivalentes à la charge ponctuelle Q. Ces charges équivalentes sont obtenues en calculant (avec un logiciel de calcul aux éléments finis par exemple), sous l'effet de la charge ponctuelle permanente Q, les rotations maximales sur les quatre appuis du panneau, supposé simplement appuyé sur son pourtour.

Le calcul de ces rotations donne :

- Appui A :  $6,4 \cdot 10^{-4}$  rd
- Appui B :  $2,4 \cdot 10^{-4}$  rd
- Appui C :  $7,3 \cdot 10^{-4}$  rd
- Appui D :  $4,2 \cdot 10^{-4}$  rd

Les charges réparties équivalentes sont obtenues en égalisant, appui après appui, les rotations. Pour l'appui C, par exemple, la charge équivalente  $q_{Ce}$  est celle qui produirait sur l'appui C une rotation de  $7,3 \cdot 10^{-4}$  rd. Le calcul pour les quatre appuis donne :

- Appui A :  $q_{Ae} = 6,31 \text{ kN}/\text{m}^2$
- Appui B :  $q_{Be} = 2,47 \text{ kN}/\text{m}^2$
- Appui C :  $q_{Ce} = 5,97 \text{ kN}/\text{m}^2$
- Appui D :  $q_{De} = 3,48 \text{ kN}/\text{m}^2$



valeur à celle du moment résistant obtenu sur l'appui correspondant. De plus, on notera la portée de la travée fictive déclarée à 2 cm, afin de tenir compte de la présence des armatures sur l'appui de rive (dans le cas où la portée est introduite nulle, il n'est pas possible de déclarer des armatures sur l'appui, que CIM'Feu EC2 considère alors comme un appui simple, n'équilibrant aucun moment).

Le calcul sera effectué quatre fois, la charge permanente prenant successivement, après la valeur ci-dessus, les valeurs 8,67 kN/m<sup>2</sup>, 12,17 kN/m<sup>2</sup>, et 9,68 kN/m<sup>2</sup>. Nous ne revenons pas sur la manière de sauvegarder le fichier de données, de lancer les calculs, et sur tous les fichiers qu'écrit CIM'Feu EC2: ceci a été vu en détail au paragraphe 4.6, lors du calcul des poutres.

Une fois les quatre calculs effectués, on remarquera, à l'examen des quatre fichiers **“.out”**, que les résultats sont identiques pour les quatre valeurs de charge permanente.

Le fichier résultat **“.out”**, relatif aux données figurant sur l'écran précédent, est le suivant.

```
*****
                                CIM'Feu EC2 - DONNEES
*****
ENTETE :
Nom de l'étude :
Catégorie de bâtiment : A
Durée de sollicitation (min) : 90
Code type de feu (1- > ISO, 2- > HCM, 3- > Extérieur) : 1
Type de structure : 1
Reprise : non
ELEMENT :
Dimensions selon x (m) : 1.5,6.5,4
Dimensions selon y (m) : 3,5,0.02
Épaisseur (cm) : 20
fck béton (MPa) : 25
Code Fraction massive (0- > 0 ,1- > 0,5 , 2- > 1 , 3- > 1,5 , 4- > 2 , 5-
> 2,5 , 6- > 3) : 1
Type de granulat béton : Siliceux
Dalle portant dans une direction : non
Dalle console selon x appui A : oui
Dalle console selon x appui B : non
Dalle console selon y appui C : non
Dalle console selon y appui D : non
Rive selon x appui A : non
Rive selon x appui B : non
Rive selon y appui C : non
Rive selon y appui D : non
Moment console x en A : 9.8
Moment console x en B : 0
Moment console y en C : 0
Moment console y en D : 0
Charge permanente totale (kN/m) : 12.51
Charge d'exploitation (kN/m) : 2.5
```

```

***** ARMATURES SUR APPUI OUEST SELON X *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 12: Acier de béton armé laminé classe A - TS ou barres sou-
dées en X
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face supérieure (cm): 2.3
Section (cm²/m): 2.510

***** ARMATURES SUR APPUI EST SELON X *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 12: Acier de béton armé laminé classe A - TS ou barres sou-
dées en X
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face supérieure (cm): 2.3
Section (cm²/m): 4.710

***** ARMATURES EN TRAVEE SELON X *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 2: Acier de béton armé laminé classe A
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face inférieure (cm): 2.8
Section (cm²/m): 5.650

***** ARMATURES SUR APPUI OUEST SELON Y *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 12: Acier de béton armé laminé classe A - TS ou barres sou-
dées en X
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face supérieure (cm): 2.3
Section (cm²/m): 7.920

***** ARMATURES SUR APPUI EST SELON Y *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 12: Acier de béton armé laminé classe A - TS ou barres sou-
dées en X
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face supérieure (cm): 2.3
Section (cm²/m): 2.010

***** ARMATURES EN TRAVEE SELON Y *****
Nombre de lits: 1
Lit n°:1
Type d'acier - 2: Acier de béton armé laminé classe A
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance entre l'axe des barres et la face inférieure (cm): 3.3
Section (cm²/m): 12.320
*****
FIN DES DONNEES
*****

```

```

*****
                        CIM'Feu EC2 - RESULTATS
*****
Résultats selon la norme NF EN 1992-1-2, au temps d'échauffement requis

DALLE PORTANT DANS DEUX DIRECTIONS :
-----
Résultats dans la direction X:
Moment résistant en travée (kNm/m) : 33.82
Rotation sur l'appui A :
Moment résistant sur l'appui A (kNm/m) : 9.80
Rotation sur l'appui B : 0.063
Moment résistant sur l'appui B (kNm/m) : 36.23
Moment résistant final (kNm/m) : 56.84
Moment isostatique appliqué (kNm/m) : 11.13

*****
                        Le moment résistant final ne doit pas être inférieur
                        au moment isostatique appliqué en travée au panneau calculé
*****

Résultats dans la direction Y:
-----
Moment résistant en travée (kNm/m) : 81.74
Rotation sur l'appui C : 0.034
Moment résistant sur l'appui C (kNm/m) : 58.91
Rotation sur l'appui D : 0.057
Moment résistant sur l'appui D (kNm/m) : 16.11
Moment résistant final (kNm/m) : 119.25
Moment isostatique appliqué (kNm/m) : 20.53

*****
Le moment résistant final ne doit pas être inférieur au moment isostatique
appliqué en travée au panneau calculé dans la direction considérée
*****

*****
                        FIN DES RESULTATS
*****

```

## Format des résultats

Ce fichier résultats fournit, au temps de stabilité demandé, successivement dans chacune des deux directions Ox et Oy, et après une reprise des données introduites par l'utilisateur :

- le moment résistant en travée ;
- le cas échéant, la rotation plastique sur le premier appui ;
- le moment résistant sur ce premier appui (ce moment est donné nul si la rotation dépasse la rotation limite relative à l'acier utilisé sur l'appui) ;
- le cas échéant, la rotation plastique sur le deuxième appui ;
- le moment résistant sur ce deuxième appui (ce moment est donné nul si la rotation dépasse la rotation limite relative à l'acier utilisé sur l'appui) ;
- le moment résistant final (obtenu en rajoutant au moment résistant en travée, la demi-somme des deux moments résistants sur appuis) ;
- le moment isostatique appliqué en travée du panneau calculé correspondant à la charge uniformément répartie définie par l'utilisateur.

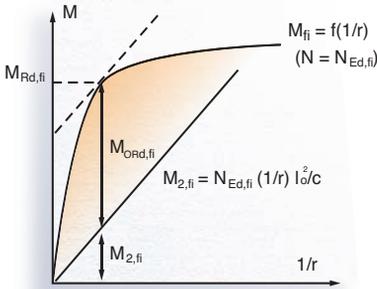
# 4.11 - Calcul des poteaux circulaires et rectangulaires et des murs chauffés sur une ou deux faces

## 4.11.1 - Méthode de justification

Les méthodes simplifiées qui existaient dans les règlements de calcul français et qui distinguaient le cas d'une flexion composée avec compression de celui d'une compression « centrée » ont disparu de l'Eurocode 2. À la place, l'annexe

B.3 de la norme NF EN 1992-1-2 propose d'évaluer le risque de flambement des poteaux (des murs) en conditions d'incendie par la méthode fondée sur l'estimation de la courbure. En France cette annexe prend un statut normatif (clause NA.3).

La figure ci-contre extraite de la norme NF EN 1992-1-2 illustre la méthode.



Où  $c$  est un facteur ( $\approx 10$ ) fonctions de la distribution de courbure (voir l'EN 1992-1-1 Clause 5.8)

$$M_{0Rd,fi} \geq M_{0Ed,fi}$$

Cette méthode, valable uniquement pour l'évaluation de la résistance de poteaux dans des structures contreventées, consiste à :

1. calculer le champ de température dans la section au temps demandé ;
2. déterminer le diagramme de moment-courbure pour l'effort normal agissant en situation d'incendie  $N_{Ed,fi}$  en utilisant, pour les armatures et le béton, le diagramme contrainte-déformation pertinent de la section 3 de la norme NF EN 1992-1-2 (voir chapitre 3 du présent fascicule) ;
3. utiliser des méthodes de calcul conventionnelles pour déterminer le moment résistant ultime,  $M_{Rd,fi}$ , avec l'effort normal concomitant  $N_{Ed,fi}$  et le moment nominal du second ordre,  $M_{2,fi}$ , pour la courbure correspondant au moment résistant ultime ;
4. déterminer le moment résistant ultime du premier ordre,  $M_{0Rd,fi}$ , pour l'exposition au feu spécifiée et  $N_{Ed,fi}$ , comme la différence entre le moment résistant ultime,  $M_{Rd,fi}$ , et le moment nominal du second ordre,  $M_{2,fi}$ , ainsi calculé ;
5. comparer le moment résistant ultime du premier ordre,  $M_{0Rd,fi}$ , avec le moment fléchissant du premier ordre de calcul en conditions d'incendie,  $M_{0Ed,fi}$  (excentricité additionnelle due aux imperfections géométriques comprises).

Le calcul de l'effet des imperfections géométriques est réalisé conformément à la norme NF EN 1992-1-1.

Les imperfections sont représentées par une inclinaison  $\theta_i = \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$

$$\text{où } \theta_0 = \frac{1}{200} \quad \alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}}$$

( $l$  représente la longueur totale de l'élément en mètres) avec  $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$

et  $\alpha_m = 1$  dans le cas d'éléments isolés. De là, l'effet des imperfections peut être pris en compte de deux manières : considérer une excentricité

additionnelle  $e_i = \theta_i \cdot \frac{l_{o,fi}}{2}$  ( $l_{o,fi}$  est la longueur efficace de l'élément) ou bien

introduire une force latérale  $H_i$  dans la position qui donne le moment fléchissant le plus défavorable. Cette dernière solution a été retenue dans le logiciel CIM'Feu EC2. La démarche valant pour des éléments contreventés, la force latérale est appliquée à mi-hauteur de l'élément et vaut  $H_i = 2 \cdot \theta_i \cdot N_{Ed,fi}$ .

On précise encore que la norme NF EN 1992-1-1/NA imposant  $e_i \geq 2 \text{ cm}$ , le

logiciel CIM'Feu EC2 impose  $\theta_i \geq \frac{0,04}{l_{o,fi}}$  (avec  $l_{o,fi}$  en mètres) pour assurer

la cohérence avec celle-ci.

L'expression du moment nominal du second ordre,  $M_{2,fi}$ , sur la figure précédente fait apparaître le facteur  $c$ , fonction de la distribution de courbure :

- $c = 8$  si le moment total est environ constant ;
- $c = \pi^2 (\approx 10)$  si le moment total est sinusoïdal (ou parabolique), on adopte en général cette valeur dans le cas d'une section constante.

Cette dernière valeur a été retenue dans CIM'Feu EC2. Toutefois, l'utilisateur doit conserver à l'esprit qu'il peut être amené à revoir la valeur du moment nominal du second ordre à la hausse en cas de distribution inhabituelle de la courbure.

On précise enfin que la longueur efficace en conditions d'incendie,  $l_{o,fi}$ , peut être supposée égale à  $l_0$  à température normale à titre de simplification conservative. On rappelle que pour un poteau (un mur) contreventé :  $0,5 l \leq l_0 \leq l$  avec  $l$ , la hauteur libre de l'élément comprimé entre liaisons d'extrémité (dénommée « longueur totale » dans les modules poteaux et « hauteur » dans le module mur de CIM'Feu EC2).

### 4.11.2 - Limites d'emploi du logiciel – Simplifications admises – Astuces d'utilisation

- Cim'Feu EC2 traite les poteaux dont les côtés ou le rayon, selon que le poteau est rectangulaire ou circulaire, varient entre 8 et 120 cm, par pas de 1 cm.
- L'épaisseur des murs peut varier entre 8 et 40 cm par pas de 1 cm.
- Deux modes de saisie des armatures sont proposés pour les poteaux rectangulaires. Dans les deux cas, la section est doublement symétrique.
- Dans le cas des poteaux rectangulaires, le moment fléchissant est considéré autour de l'axe X. L'utilisateur devra veiller à ce que la géométrie de la section qu'il aura déclarée soit cohérente avec cela.

### 4.11.3 - Exemples de calcul

#### 4.11.3.1 - Cas d'un poteau circulaire

#### Hypothèses

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure.
- Béton C25/30 à granulats calcaire.
- Rayon: 30 cm.
- Longueur totale: 7 m.
- Longueur efficace: 4,9 m.
- 9 armatures HA32 en acier de béton armé laminé de classe B.
- Enrobage 4 cm.
- Charge permanente totale: 600 kN.
- Charge d'exploitation: 750 kN.
- Moment permanent total: 40 kN.m
- Durée de stabilité au feu exigée: 2 h sous feu ISO R 834.

#### Introduction des données

La résolution de ce problème conduit à remplir l'écran de saisie « poteau circulaire » de la manière suivante.



La manipulation générale des fichiers (lancement du calcul, stockage des données, copies et modifications, édition et impression du fichier résultats, etc.) se fait de la même manière que dans le cas des poutres ou des dalles.

À la fin des calculs, le fichier résultats “.out” se présente de la manière suivante.

```
*****
                          CIM'Feu EC2 - DONNEES
*****
ENTETE :
Nom de l'étude :
Catégorie de bâtiment : E
Durée de sollicitation (min) : 120
Type de feu : 1
Type de structure : 4
ELEMENT :
Rayon du poteau (cm) : 30
Portée du poteau (m) : 7
Longueur de flambement (m) : 4.9
fck (MPa) : 25
Fraction massique (%) : 1
Type de granulats béton du poteau : Calcaire
Charge permanente totale (kN) : 600
Charge d'exploitation (kN) : 750
Moment permanent total (kNm) : 40
Moment d'exploitation (kNm) : 0
Flexion composée : oui

***** BARRES *****
Nombre de barres : 9
Type d'acier : Acier de béton armé laminé classe B ou C
fyk (MPa) : 500
Module (GPa) : 200
Distance entre l'axe des barres et les bords verticaux (cm) : 5.6
Diamètre (mm) : 32
*****
                          FIN DES DONNEES
*****

*****
                          CIM'Feu EC2 - RESULTATS
*****
Résultats selon la norme NF EN 1992-1-2, au temps d'échauffement requis
FLAMBEMENT DU POTEAU EN CONDITIONS D'INCENDIE :
Moment résistant ultime MRd,fi (kNm) : 226.17
Moment nominal du 2nd ordre M2,fi (kNm) : 136.44
Moment résistant ultime du 1er ordre M0Rd,fi (kNm) : 89.73
Moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions
d'incendie, comprenant les effets additionnels dus aux
imperfections géométriques M0Ed,fi (kNm) : 76.43

*****
                          Le moment résistant ultime du 1er ordre
                          ne doit pas être inférieur
                          au moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions d'incendie
*****

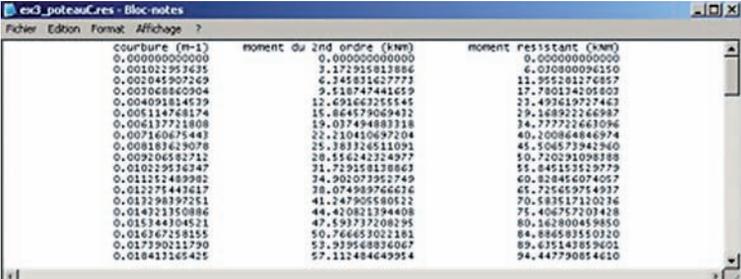
*****
                          FIN DES RESULTATS
*****
```

## Format des résultats

Ce fichier résultats fournit, au temps de stabilité demandé trois types de résultats selon le comportement du poteau (du mur).

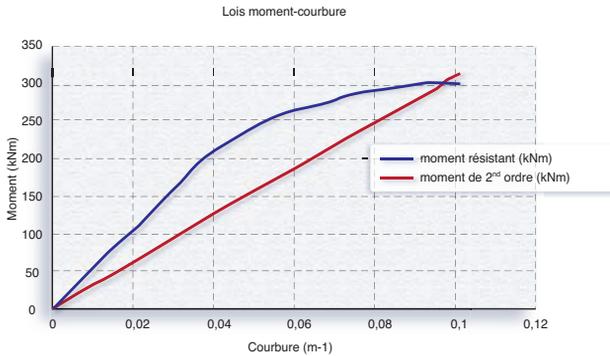
1. Le poteau n'est pas capable de supporter le chargement appliqué. La combinaison des charges permanentes totales et des charges d'exploitation dépasse la capacité de résistance en compression du poteau au temps d'échauffement requis.
2. Le poteau n'est pas capable de supporter le chargement appliqué. La combinaison des charges permanentes totales et des charges d'exploitation dépasse la charge critique de calcul du poteau au temps d'échauffement requis. Le poteau flambe par divergence d'équilibre.
3. Le poteau est capable de supporter le chargement appliqué (mais pas nécessairement le moment). Les résultats fournis sont alors :
  - le moment résistant ultime ;
  - le moment nominal du 2<sup>nd</sup> ordre ;
  - le moment résistant ultime du 1<sup>er</sup> ordre ;
  - le moment fléchissant du 1<sup>er</sup> ordre de calcul en conditions d'incendie, comprenant les effets additionnels dus aux imperfections géométriques. Celui-ci ne doit pas être supérieur au moment résistant ultime du 1<sup>er</sup> ordre.

Les modules « poteau » et « mur » créent un fichier supplémentaire aux modules poutres et dalle. Ce fichier a l'extension **“.res”** et contient, dans un format lisible par un éditeur de texte ou par un tableur, les lois moment nominal du 2<sup>nd</sup> ordre – courbure et moment résistant – courbure pour l'effort normal (le chargement) agissant.



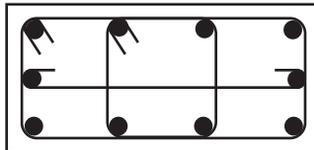
courbure (m-1)	moment du 2nd ordre (kNm)	moment résistant (kNm)
0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000
0.001022953635	3.172951813886	6.070800096150
0.002045907269	6.345814277779	11.955281176857
0.003068860904	9.518747441659	17.780124205503
0.004091814539	12.691663255545	23.4931619727463
0.005114768174	15.864579069432	29.168922669987
0.006137721808	19.037494883318	34.77722663096
0.007160675443	22.210410497204	40.200864846974
0.008183623078	25.383324511091	45.504573942960
0.009206582712	28.556242324977	50.720291098388
0.010229536347	31.729158138863	55.845153529779
0.011252489982	34.902073952749	60.824856074057
0.012275443617	38.074989746636	65.725459754937
0.013298397251	41.247905580522	70.5383517320236
0.014321350886	44.420821394408	75.406757203428
0.015344304521	47.59373208295	80.262800459850
0.016367258155	50.766653022181	84.886593550320
0.017390211790	53.939568936067	89.635143859601
0.018413165425	57.112484449954	94.4477908544610

Ce tableau mis en forme graphiquement donne la figure suivante qui permet d'apprécier l'importance des effets du second ordre dans le cas traité.



#### 4.11.3.2 - Cas d'un poteau rectangulaire

Soit à examiner la tenue au feu du poteau suivant:

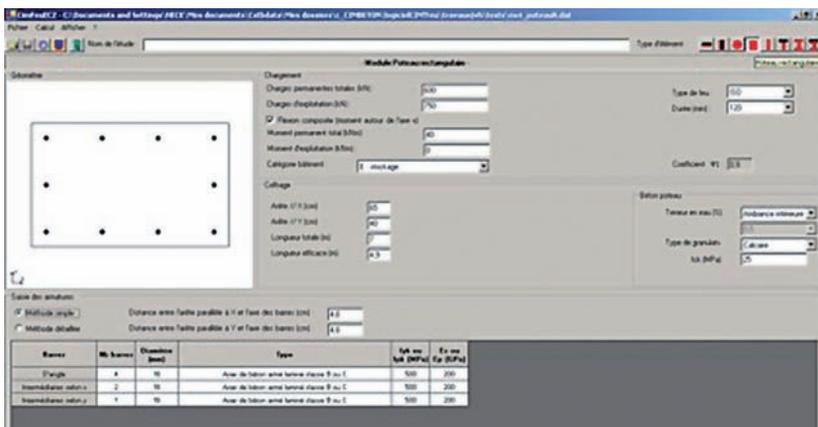


#### Hypothèses

- Le poteau est au RDC d'un bâtiment de plusieurs étages servant au stockage d'archives. Il est en ambiance intérieure.
- Béton C25/30 à granulats calcaire.
- Section: 40 x 65 cm<sup>2</sup>.
- Longueur totale: 7 m.
- Longueur efficace: 4,9 m.
- Acier HA16 laminé de classe B. 3 armatures sur la petite face, 4 sur la grande face.
- Enrobage 4 cm.
- Charge permanente totale: 600 kN.
- Charge d'exploitation: 750 kN.
- Moment permanent total: 40 kNm autour de la petite inertie.
- Durée de stabilité au feu exigée: 2 h sous feu ISO R 834.

## Introduction des données

La résolution de ce problème conduit à remplir l'écran de saisie « poteau rectangulaire » de la manière suivante.



À la fin des calculs, le fichier résultats “.out” se présente de la manière suivante:

```

*****
                        CIM'Feu EC2 - DONNEES
*****
ENTETE :
Nom de l'étude :
Catégorie de bâtiment : E
Durée de sollicitation (min) : 120
Type de feu : 1
Type de structure : 5
ELEMENT :
Longueur selon X (cm) : 65
Longueur selon Y (cm) : 40
Portée du poteau (m) : 7
Longueur de flambement (m) : 4.9
fck (MPa) : 25
Fraction massique (%) : 1
Type de granulat béton du poteau : Calcaire
Charge permanente totale (kN) : 600
Charge d'exploitation (kN) : 750
Moment permanent total (kNm) : 40
Moment d'exploitation (kNm) : 0
Flexion composée : x
Description des armatures : simple

***** BARRES intermédiaires selon *****
Distance entre l'axe des barres selon x et les bords horizontaux (cm) : 4.8
Nombre de barres : 2
Type d'acier : Acier de béton armé laminé classe B ou C
fyk (MPa) : 500
Module (GPa) : 200
Diamètre (mm) : 16
    
```

```

***** BARRES intermédiaires selon Y *****
Distance entre l'axe des barres selon y et les bords verticaux (cm) : 4.8
Nombre de barres : 1
Type d'acier : Acier de béton armé laminé classe B ou C
fyk (MPa) : 500
Module (GPa) : 200
Diamètre (mm) : 16

***** BARRES sur les angles *****
Nombre de barres : 4
Type d'acier : Acier de béton armé laminé classe B ou C
fyk (MPa) : 500
Module (GPa) : 200
Diamètre (mm) : 16
*****
                          FIN DES DONNEES
*****
                          CIM'Feu EC2 - RESULTATS
*****
Résultats selon la norme NF EN 1992-1-2, au temps d'échauffement requis
FLAMBEMENT DU POTEAU EN CONDITIONS D'INCENDIE :
Moment résistant ultime MRd,fi (kNm) : 157.50
Moment nominal du 2nd ordre M2,fi (kNm) : 99.52
Moment résistant ultime du 1er ordre M0Rd,fi (kNm) : 57.98
Moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions d'incendie, compre-
nant les effets additionnels dus aux imperfections géométriques MOEd,fi
(kNm) : 76.43
*****
                Le moment résistant ultime du 1er ordre
                ne doit pas être inférieur
                au moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions d'incendie
*****
*****
                          FIN DES RESULTATS
*****

```

Ce fichier résultats présente une forme analogue à ce qui a déjà été vu plus haut.

#### 4.11.3.3 - Cas d'un mur chauffé une face

Le cas d'un mur chauffé deux faces ne mérite pas que l'on s'y attarde car il est en tout point conforme à ce qui vient d'être présenté pour les poteaux. En revanche, les murs chauffés une face nécessite un traitement un peu particulier du fait de la perte de symétrie du problème. Ainsi, les résultats seront présentés successivement pour une courbure dont l'extrados sera du côté du feu et pour une courbure dont l'intrados sera du côté du feu. Par convention, une courbure positive a son extrados du côté du feu dans CIM'Feu EC2. De même, un moment est positif s'il engendre une courbure de même sens que la courbure thermique (positive également puisque d'extrados nécessairement du côté du feu). Ainsi, l'utilisateur doit, en cas de mur chauffé une face, avoir en



À la fin des calculs, le fichier résultats “.out” se présente de la manière suivante.

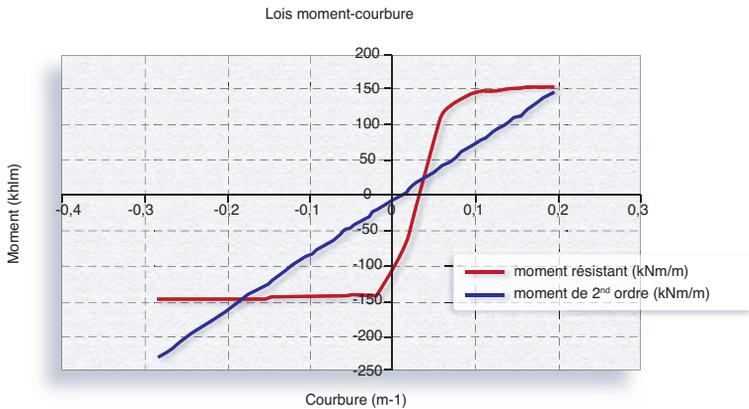
```
*****
                          CIM'Feu EC2 - DONNEES
*****
ENTETE :
Nom de l'étude :
Catégorie de bâtiment: B
Durée de sollicitation (min) : 60
Type de feu: 1
Type de structure: 2
ELEMENT :
Épaisseur (cm): 20
Hauteur du mur (m) : 4
Hauteur de flambement (m): 4
fck (MPa): 25
Fraction massique (%) : 1
Type de granulats béton mur: Siliceux
Charge permanente totale (kN): 300
Charge d'exploitation (kN): 350
Moment permanent total (kNm): 40
Moment d'exploitation (kNm): 50
Flexion composée: oui
Mur chauffé 2 faces: non

***** BARRES *****
Section en cm²/m: 19.04
Type d'acier: Acier de béton armé laminé classe B ou C
fyk (MPa): 500
Module (GPa): 200
Distance (cm): 4.3
*****
                          FIN DES DONNEES
*****

*****
                          CIM'Feu EC2 - RESULTATS
*****
Résultats selon la norme NF EN 1992-1-2, au temps d'échauffement requis
FLAMBEMENT DU MUR EN CONDITIONS D'INCENDIE:
Extrados de la courbure du côté du feu :
Moment résistant ultime MRd,fi (kNm/m): 126.98
Moment nominal du 2nd ordre M2,fi (kNm/m): 47.78
Moment résistant ultime du 1er ordre M0Rd,fi (kNm/m): 79.20
Moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions
d'incendie, comprenant les effets additionnels dus aux
imperfections géométriques M0Ed,fi (kNm/m): 74.50
Intrados de la courbure du côté du feu :
Moment résistant ultime MRd,fi (kNm/m): 139.19
Moment nominal du 2nd ordre M2,fi (kNm/m): 19.94
Moment résistant ultime du 1er ordre M0Rd,fi (kNm/m): 119.24
Moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions
d'incendie, comprenant les effets additionnels dus aux
imperfections géométriques M0Ed,fi (kNm/m): 9.50
*****
Que la courbure ait son extrados ou son intrados
du côté du feu,
le moment résistant ultime du 1er ordre
ne doit pas être inférieur
au moment fléchissant du 1er ordre de calcul en conditions d'incendie
*****
*****
                          FIN DES RESULTATS
*****
```

Ce fichier résultats présente une forme analogue à ce qui a déjà été vu plus haut à ceci près que deux vérifications sont menées, une pour chaque sens de la courbure. Le moment fléchissant du 1er ordre de calcul est ici différent selon le sens de la courbure. Pour l'extrados de la courbure du côté du feu, il est la combinaison des moments renseignés par l'utilisateur (car ceux-ci étaient positifs) plus les effets additionnels dus aux imperfections géométriques. Pour l'intrados de la courbure du côté du feu, il n'est cette fois dû qu'aux imperfections géométriques. Cette deuxième vérification est effectuée pour s'assurer que la disparition fortuite du moment imposé ne risque pas de provoquer une ruine.

La loi moment-courbure, construite à partir du fichier **“.res”**, montre clairement la dissymétrie du comportement liée à celle de l'action thermique sur le mur.



## BIBLIOGRAPHIE

1. NF EN 1991-1-2; juillet 2003; Eurocode 1 partie 1-2, Actions sur les structures exposées au feu.
2. NF P 18-711-1/NA; février 2007; Annexe Nationale à l'Eurocode 1 partie 1-2.
3. NF EN 1992-1-1; octobre 2005; Eurocode 2 partie 1-1, Calcul des structures en béton – Règles générales et règles pour les bâtiments.
4. NF P 18-711-1/NA; mars 2007; Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1.
5. NF EN 1992-1-2; octobre 2005; Eurocode 2 partie 1-2, Calcul des structures en béton – Règles générales – Calcul du comportement au feu.
6. NF P 18-711-1/NA; octobre 2007; Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1.
7. « Règlement de sécurité contre l'incendie relatif aux établissements recevant du public ». Ministère de l'Intérieur.
8. « Résistance au feu des structures ». Commission Nationale belge de recherche incendie. Publications de l'Université de Liège, 1983.
9. *Rotules plastiques soumises au feu*, A.Coin, Annales de l'I.T.B.T.P, 1978.
10. *Tables pour le calcul des dalles et des parois*, R. Bares, Ed. Dunod, 1969.
11. DTU Feu béton (référence AFNOR DTU P 92-701): « Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton ». Octobre 1987.
12. Fascicule n° 62, titre 1<sup>er</sup>, section I du CCTG (Règles BAEL91).
13. Fascicule n° 62, titre 1<sup>er</sup>, section II du CCTG (Règles BPEL91).
14. Les Dossiers de la Construction, *Pratique du calcul de la résistance au feu des structures en béton*, J.P. Boutin, Ed. Eyrolles, 1983.
15. Logiciel d'éléments finis MARC. Documentation utilisateur. Volume D « User Subroutines. Spécial Routines ».



# **ANNEXES**

## **ANNEXE 1 : CONFRONTATION DES RÉSULTATS DES CALCULS THERMIQUES OBTENUS AVEC LE LOGICIEL CIM'Feu EC2**

---

## Confrontation à des résultats du document « NF EN 1992-1-2/NA »

Dans ce chapitre, les sections définies au chapitre intitulé « Guide -distributions de température – en remplacement de l'annexe A de l'Eurocode 2 partie 1-2 » du document « NF EN 1992-1-2/NA » sont retenues. Ces sections sont les suivantes :

- dalle d'épaisseur 20 cm ;
- poutre rectangulaire (800 cm x 500 cm). Il s'agit de la section de plus grandes dimensions ;
- poteau circulaire (D =300 cm).

Les résultats fournis dans de document ont été obtenus pour une fraction massique d'eau de 1,5 %, une émissivité de 0,7, une valeur du coefficient d'échange convectif à la surface exposée de 25 W/m<sup>2</sup>/K et de 4 W/m<sup>2</sup>/K à la surface non exposée. L'action thermique est la courbe température/temps normalisée.

### Poutre rectangulaire (80 x 50) cm<sup>2</sup> chauffée 4 faces

Les résultats du programme BISOT ont été confrontés aux résultats des programmes TASEF [4]

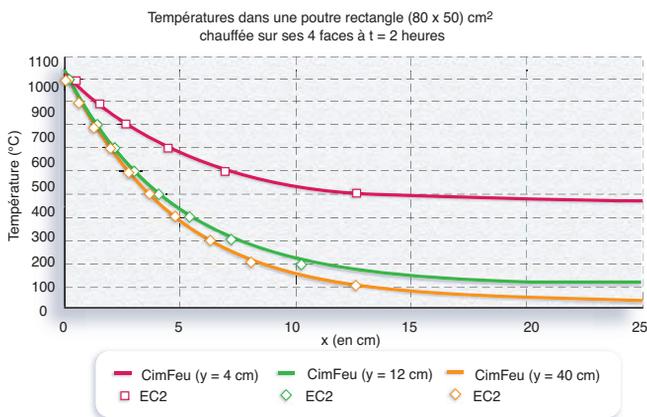


Figure 2-1 : Poutre rectangulaire chauffée 4 faces.  
Résultats de la figure A.15 de l'EC2 – Guide « distributions de température »

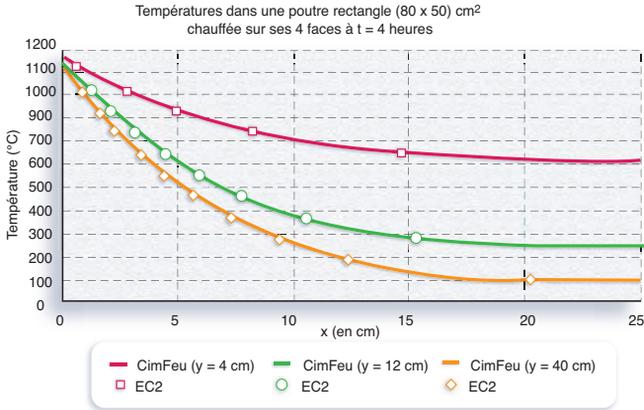


Figure 2-2: Poutre rectangulaire chauffée 4 faces.  
Résultats de la figure A.13 de l'EC2 – Guide « distributions de température »

## Poteau circulaire de diamètre 30 cm

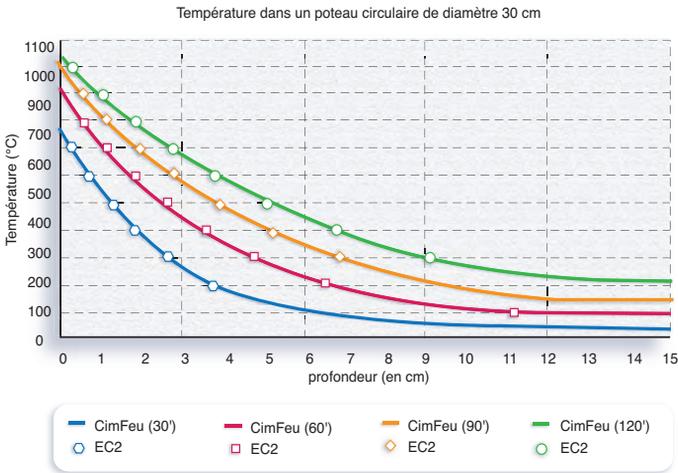


Figure 2-3: Poteau circulaire chauffé sur tout le périmètre.  
Résultats des figures A.21 à A.24 de l'EC2 – Guide « distributions de température »

## Dalle d'épaisseur 20 cm

Les résultats du programme BISOT ont été confrontés aux résultats des programmes TASEF [4]

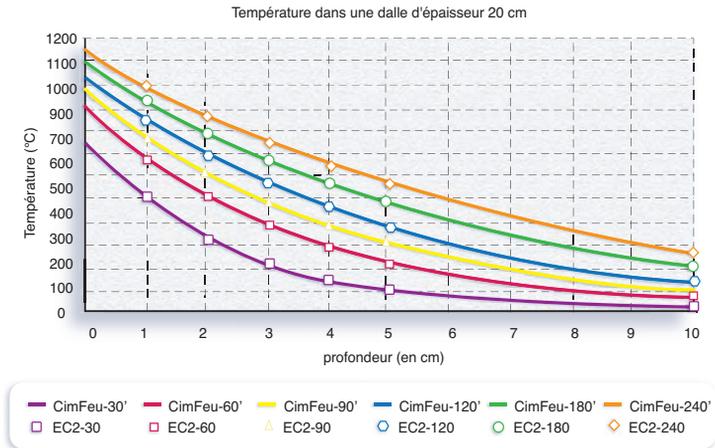


Figure 2-4 : Dalle chauffée une face.  
Résultats de la figure A.3 de l'EC2 – Guide « distributions de température »

## Confrontation avec le logiciel Marc

Les sections suivantes ont été retenues :

Section n° 1. **Poutre rectangulaire** : hauteur 80 cm, largeur 50 cm. Table de compression d'épaisseur 20 cm

Section n° 2. **Poutre rectangulaire** : hauteur 48 cm, largeur 30 cm. Table de compression d'épaisseur 12 cm.

Section n° 3. **Poutre I** : hauteur 41 cm, largeur 20 cm, épaisseur de l'âme 5 cm. Le talon inférieur a une hauteur de 7 cm (4,5 cm + 2,5 cm). L'épaisseur de la semelle supérieure est égale 13 cm (11 cm + 2 cm).

Section n° 4. **Poutre I** : hauteur 35 cm, largeur 20 cm, épaisseur de l'âme 5 cm. Le talon inférieur a une hauteur de 7 cm (4,5 cm + 2,5 cm). L'épaisseur de la semelle supérieure est égale 7 cm (5 cm + 2 cm).

Section n° 5. **Poutre I + table** : hauteur 41 cm, de largeur 20 cm, épaisseur de l'âme 5 cm. Talon inférieur : hauteur 7 cm (4,5 cm + 2,5 cm). semelle supérieure : 13 cm (11 cm + 2 cm). Épaisseur de la table : 20 cm.

Section n° 6. **Poutre I + table**: hauteur 35 cm, largeur 20 cm, épaisseur de l'âme 5 cm. Talon inférieur 7 cm (4,5 cm + 2,5 cm). Semelle supérieure: 7 cm (5 cm + 2 cm). Épaisseur de la table: 12 cm

Comme précédemment, l'action thermique considérée est la courbe ISO.

La durée de la simulation est fixée à 4 heures.

Pour chaque section on a représenté sur un même graphe l'évolution temporelle de la température en 5 points de la section de béton calculée avec CIM'Feu EC2 et le logiciel MARC.

Le tableau suivant fournit les coordonnées des points pour les 6 sections considérées. Le coin inférieur gauche de la section de poutre est l'origine du repère. Les valeurs sont exprimées en centimètres.

N° Section	Coordonnées Point n°1	Coordonnées Point n°2	Coordonnées Point n°3	Coordonnées Point n°4	Coordonnées Point n°5
1	(5 ; 5)	(15 ; 5)	(25 ; 5)	(25 ; 20)	(25 ; 70)
2	(3 ; 3)	(9 ; 3)	(15 ; 3)	(15 ; 12)	(15 ; 42)
3	(3 ; 3)	(10 ; 3)	(10 ; 18)	(10 ; 38,5)	(5,5 ; 38,5)
4	(3 ; 3)	(10 ; 3)	(10 ; 6)	(10 ; 32,5)	(3 ; 32,5)
5	(3 ; 3)	(10 ; 3)	(10 ; 18)	(10 ; 38,5)	(5,5 ; 38,5)
6	(3 ; 3)	(10 ; 3)	(10 ; 6)	(10 ; 32,5)	(3 ; 32,5)

Les figures 2-5 à 2-10 représentent la température en cinq points des sections considérées pour l'action thermique ISO.

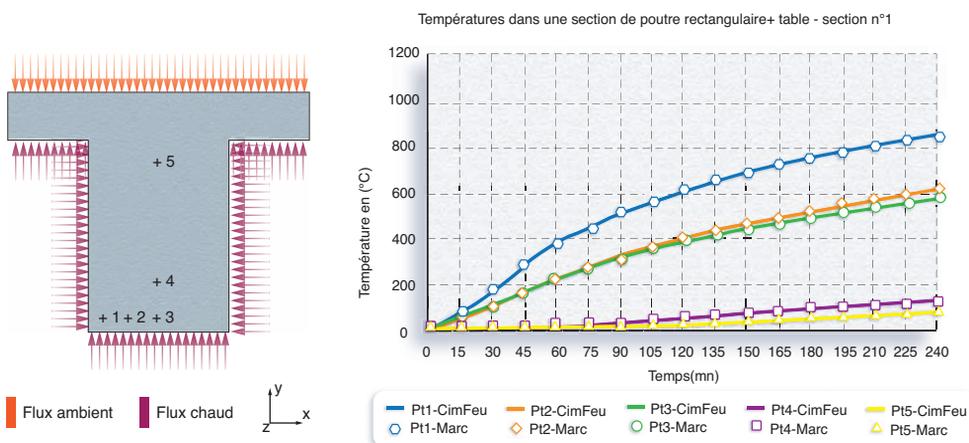


Figure 2-5: Section 1: Poutre rectangulaire + table – ISO

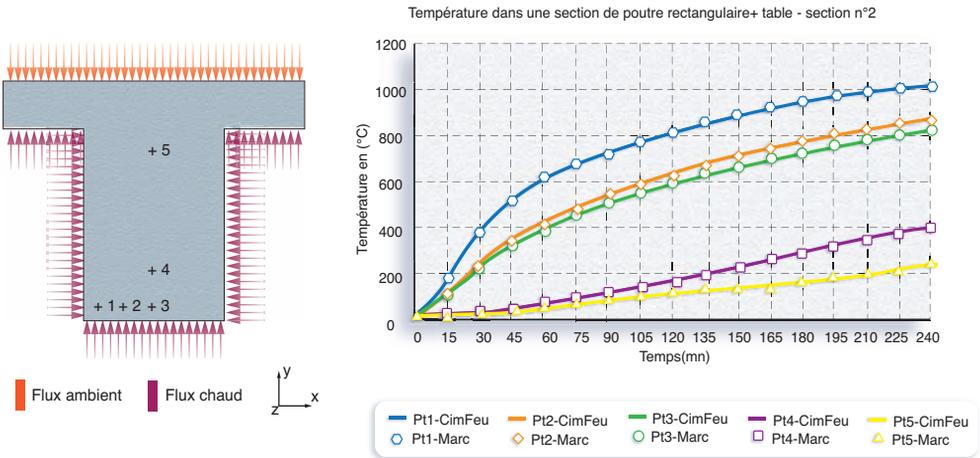


Figure 2-6: Section 2: Poutre rectangulaire + table – ISO

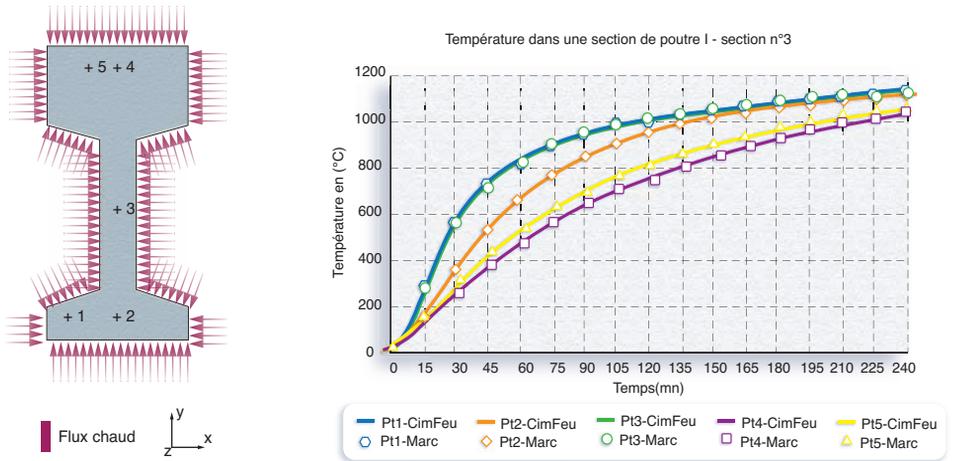


Figure 2-7: Section 3: Poutre I – ISO

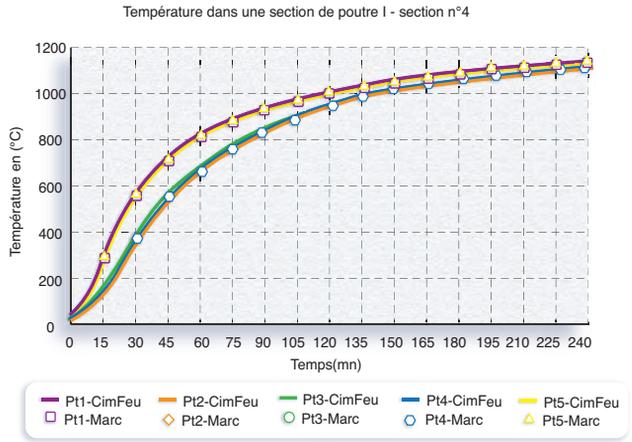
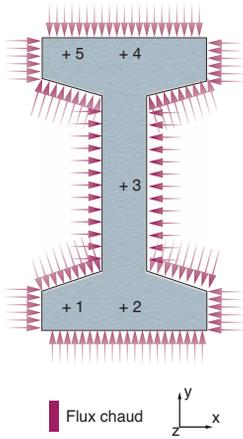


Figure 2-8: Section 4: Poutre I – ISO

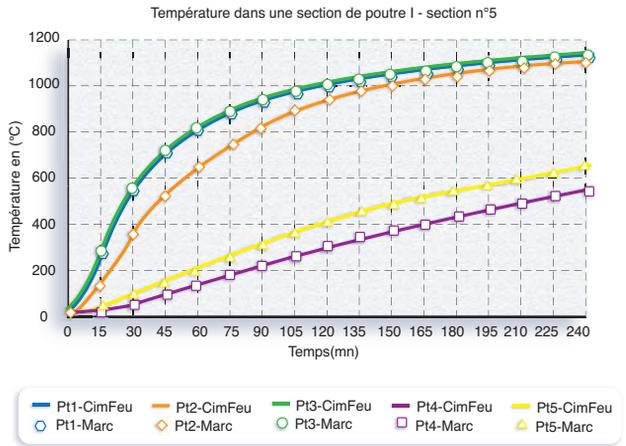
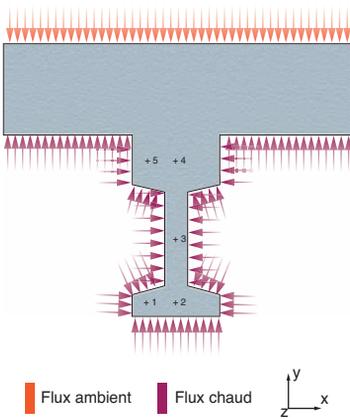


Figure 2-9: Section 5: Poutre I + table – ISO

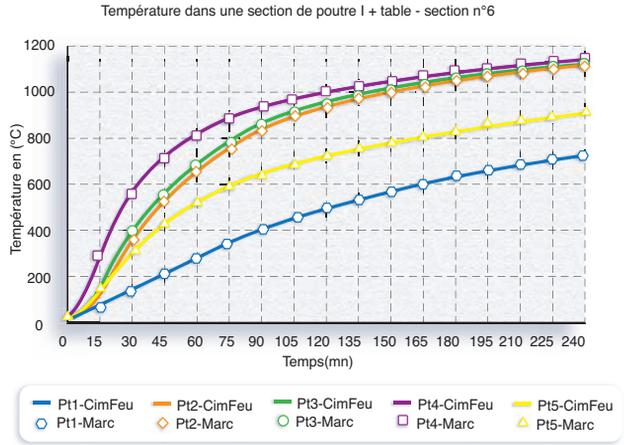
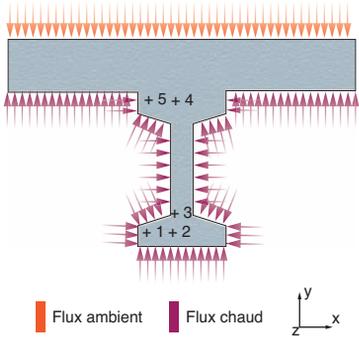


Figure 2-10 : Section 6 : Poutre I + table – ISO

**ANNEXE 2 : ANALYSE RELATIVE À LA PRISE  
EN COMPTE DE PROPRIÉTÉS THERMIQUES  
PARTICULIÈRES POUR LES BÉTONS À  
HAUTE RÉSISTANCE**

---

# Introduction

---

La question se pose d'étendre les possibilités du logiciel CIM'Feu EC2 à la prise en compte, pour une section donnée, de l'association d'un béton de haute résistance et d'un béton courant. Cette fonctionnalité nouvelle requiert des développements complémentaires relativement importants. Toutefois, dans la mesure où la masse volumique, la chaleur spécifique du béton haute résistance sont identiques à celle du béton courant et que de plus, la conductivité thermique ne diffère que dans l'intervalle de température 140 °C - 200 °C (elle est identique pour toutes les autres valeurs de la température comprise entre 20 et 1 200 °C), il a été envisagé d'évaluer l'effet de cette différence de propriétés thermiques sur la température au sein du béton. Les résultats permettront de savoir s'il reste possible d'utiliser le logiciel dans sa version actuelle (propriétés thermiques du béton courant) pour rendre compte avec une précision acceptable des températures d'une section de béton à haute résistance.

Pour cela des simulations ont été effectuées. Elles visent principalement à évaluer les écarts de températures au sein du béton entre un béton courant et un béton haute résistance. Les trois configurations suivantes ont été retenues :

1. dalle de 20 cm chauffée sur une seule face ;
2. mur de 20 cm chauffé sur les deux faces ;
3. poutre rectangulaire + table de 20 cm d'épaisseur.

Pour chaque configuration, deux simulations ont été effectuées. La première a utilisé les caractéristiques du béton de granulats siliceux et calcaires, la seconde celles du béton haute résistance. Les écarts de température au sein de la section ont ensuite été calculés.

## Documents de référence

---

### **Pour le volet thermique du béton à haute résistance**

- Le document « NF EN 1992-1-2 ; octobre 2005 ; P 18-712-1 » en note (4) du chapitre 6.1 précise que « les propriétés et les recommandations sont données pour une exposition au feu correspondant uniquement à la courbe température-temps normalisée ». Dans son chapitre 6.3, il indique que :
  - > « les valeurs données en 3.3 (propriétés thermo-physiques du béton de granulats siliceux et calcaires) peuvent également être appliquées pour le béton à haute résistance. »

> « Note 1 : La valeur de la conductivité thermique pour le béton à haute résistance à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale dans l'intervalle défini par les limites inférieure et supérieure indiquées en 3.3.3. »

> « Note 2: La conductivité thermique du béton à haute résistance peut être supérieure à celle du béton de résistance normale. »

*Remarque: les autres propriétés (masse volumique, chaleur spécifique) restent identiques à celles du béton courant.*

- Le document « Pr NF EN 1992-1-2/NA; Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-2:2005 » dans sa clause 6.3 (1) Note 1 fournit l'évolution de la conductivité à utiliser (figure 1).

## Données

---

La masse volumique et la chaleur spécifique du béton haute résistance sont identiques à celles du béton de granulats calcaires ou siliceux. Seule la conductivité thermique varie. La figure 1 représente l'évolution de la conductivité en fonction de la température.

On remarque que celle-ci est identique sauf dans l'intervalle de température 140 °C à 200 °C où la conductivité du béton haute résistance diminue moins vite que celle du béton courant. Dans cet intervalle, l'écart de conductivité est au maximum égal à 0,5 W/m/K.

### Conductivité thermique

Elle varie avec la température. Elle suit l'évolution fournie dans le document Pr NF EN 1992-1-2/NA (avant projet soumis à enquête jusqu'au 5 novembre 2006). Elle est exprimée en W/m/K.

### Béton courant

- Pour  $T \leq 140 \text{ °C}$  :  $\lambda = 2 - 0,2451 \times \frac{T}{100} + 0,0107 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$
- Pour  $T > 140 \text{ °C}$  et  $T \leq 160 \text{ °C}$  :  $\lambda = 5,324 - 0,02604 \times T$
- Pour  $T > 160 \text{ °C}$  :  $\lambda = 1,36 - 0,136 \times \frac{T}{100} + 0,0057 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$

## Béton de haute résistance

- Pour  $T \leq 165 \text{ °C}$  :  $\lambda = 2 - 0,2451 \times \frac{T}{100} + 0,0107 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$
- Pour  $T > 165 \text{ °C}$  et  $T \leq 185 \text{ °C}$  :  $\lambda = 5,734 - 0,02484 \times T$
- Pour  $T > 185 \text{ °C}$  :  $\lambda = 1,36 - 0,136 \times \frac{T}{100} + 0,0057 \times \left(\frac{T}{100}\right)^2$

## Masse volumique

Elle varie avec la température. Elle suit l'évolution fournie dans le document: NF EN 1992-1-2 d'octobre 2005 – § 3.3.2. Elle est exprimée en  $\text{kg/m}^3$ .

- Pour  $T \leq 115 \text{ °C}$  :  $\rho = 2300$
- Pour  $T > 115 \text{ °C}$  et  $T \leq 200 \text{ °C}$  :  $\rho = 2300 \times \left[ 1 - 0,02 \times \left(\frac{T-115}{85}\right) \right]$
- Pour  $T > 200 \text{ °C}$  et  $T \leq 400 \text{ °C}$  :  $\rho = 2300 \times \left[ 0,98 - 0,03 \times \left(\frac{T-200}{200}\right) \right]$
- Pour  $T > 400 \text{ °C}$  et  $T \leq 1200 \text{ °C}$  :  $\rho = 2300 \times \left[ 0,95 - 0,07 \times \left(\frac{T-400}{800}\right) \right]$

## Chaleur massique

Elle varie avec la température et la fraction massique d'eau. Elle suit l'évolution fournie dans le document: NF EN 1992-1-2 d'octobre 2005 – § 3.3.2. Elle est exprimée en  $\text{J/kg/K}$ . La teneur en eau reçoit trois valeurs: 0 %, 1,5 % ou 3 %.

- Pour  $T \leq 100 \text{ °C}$  :  $C = 900$
- Pour  $T > 100 \text{ °C}$  et  $T \leq 115 \text{ °C}$  :  $C = C_{\text{peak}}$  avec

$$C_{\text{peak}} = 1470 \text{ pour } \tau = 1,5 \% \text{ et } C_{\text{peak}} = 2020 \text{ pour } \tau = 3 \%$$

- Pour  $T > 115 \text{ °C}$  et  $T \leq 200 \text{ °C}$  :  $C = C_{\text{peak}} - \frac{(C_{\text{peak}} - 1000)}{85} \times (T - 115)$
- Pour  $T > 200 \text{ °C}$  et  $T \leq 400 \text{ °C}$  :  $C = 1000 + \frac{(T - 200)}{2}$
- Pour  $T > 400 \text{ °C}$  et  $T \leq 1200 \text{ °C}$  :  $C = 1100$

## Analyse des résultats

---

Ils montrent:

- Que l'amplitude de l'écart reste inférieure à 10 °C. On relève une valeur de 7 °C (figures 4,5 et 6);
- Que l'écart de température se situe dans la plage de température 140 °C - 200 °C (figures 2 et 3);
- Que pour des valeurs de la température du béton supérieure à 200 °C, l'écart n'est plus que 2 °C au maximum (figures 3 et 4);
- Que de plus, il tend à diminuer à mesure que la température augmente. Par exemple à 500 °C il n'est plus que de 1 °C (figures 3 et 4);
- Que pour des valeurs de la température inférieure à 140 °C, l'écart est inférieur à 5 °C et diminue quand la température du béton diminue (figures 3 et 4);
- Que de plus, la présence d'eau n'accroît pas les écarts (figure 5);
- Qu'une sollicitation thermique sur les deux faces ne contribue pas à accroître les écarts, mais au contraire les diminue à mesure que la durée de sollicitation augmente (figure 6);
- Qu'enfin, à deux heures, l'écart de température est inférieur à 5 °C dans la table et à 10 °C dans la poutre. Ces écarts ne portent que sur des valeurs de la température inférieures à 200 °C. Pour des valeurs supérieures l'écart est de l'ordre de 2 °C (figure 7);
- Qu'ainsi, l'effet thermique du béton haute résistance reste très limité et ne porte de plus que sur une plage de température (140 °C - 200 °C) pour laquelle les performances du béton comme de l'acier ne sont pas fortement diminuées;
- **Que donc les caractéristiques du béton courant peuvent être utilisées pour calculer, avec une précision acceptable, la température d'un béton courant comme de haute résistance ;**
- **Que les écarts de température présentés conduisent à des écarts sur les capacités résistantes des bétons ou des aciers de différentes natures toujours inférieures à 1 %.**

**Nota: les écarts de température présentés dans la suite correspondent à la différence: température avec propriété du béton courant moins température avec propriété du béton à haute résistance.**

# Résultats détaillés

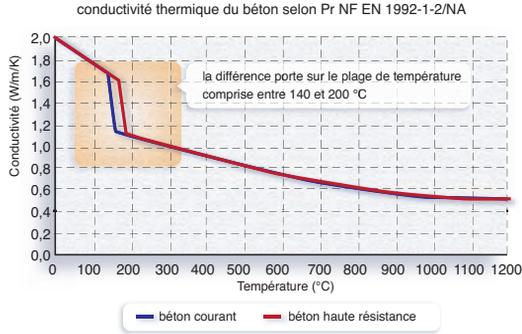


Figure 1 : Evolution de la conductivité du béton courant et haute résistance en fonction de la température

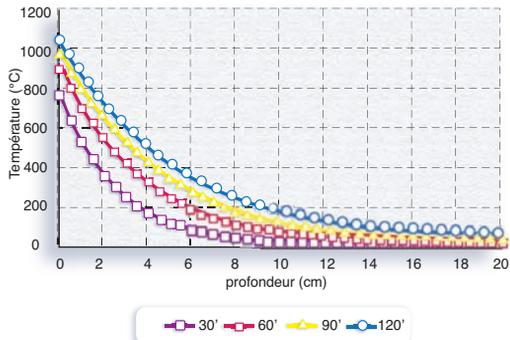


Figure n° 2 : Dalle chauffée une face – température au sein de la dalle

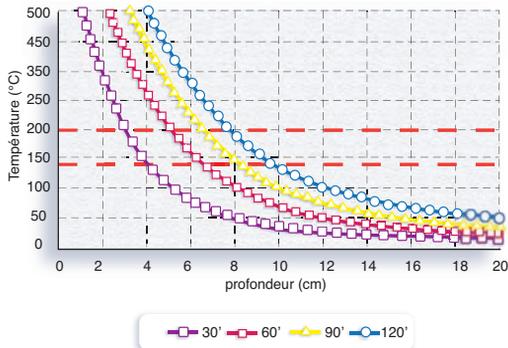


Figure n° 3 : Dalle chauffée une face – température au sein de la dalle – détail

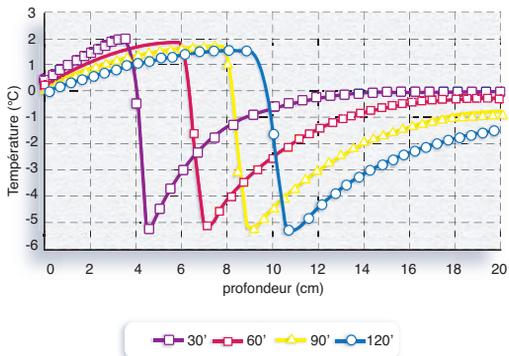


Figure n° 4 : Dalle chauffée sur une seule face  
Écart de température entre un béton courant et un béton haute résistance

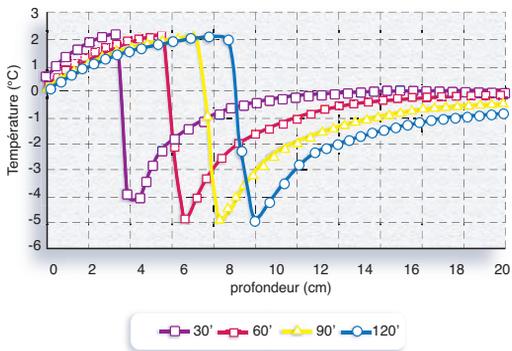


Figure n° 5 : Dalle chauffée sur une seule face – 3 % eau  
Écart de température entre un béton courant et un béton haute résistance

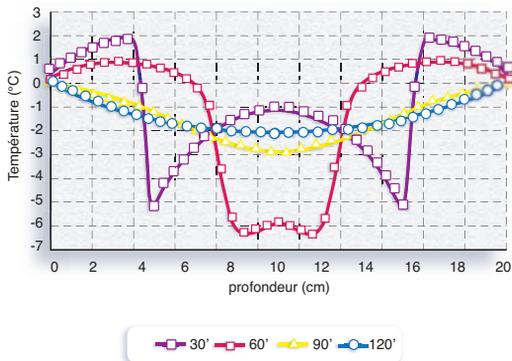


Figure n° 6 : Mur chauffé deux faces  
Écart de température entre un béton courant et un béton haute résistance

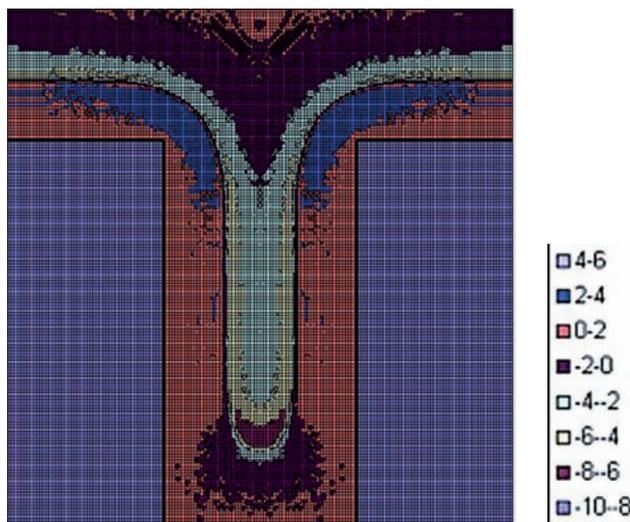


Figure n° 7 : Poutre rectangulaire + dalle  
Écart de température entre un béton courant et un béton haute résistance

Plage de température °C	Différence de température °C	Différence de capacité résistante en % des bétons			Différence de capacité résistante en % des aciers			
		siliceux	calcaire	Fck compris en 60 et 80	de BA laminés	de BA formés	de précontrainte formés	de précontrainte trempés et revenus
20-140	5	0,25	0,15	0,30	0	0	0,68	0,31
140-200	7	0,35	0,21	0	0	0	0,96	0,44
200-500	2	0,21	0,12	0,31	0	0,12	0,67	0,44
500-1200	1	0,25	0,19	0,11	0,39	0,40	0,53	0,19

Figure n° 8 : Bilan sur les écarts en termes de capacités résistantes  
Valeur maxi 0,96 %

Les différents éléments présentés dans ce rapport invitent à considérer qu'il est inutile de procéder dans CIM'Feu EC2 aux développements particuliers que nécessiterait la prise en compte d'une conductivité thermique particulière pour les bétons à haute résistance.

Cette conclusion a obtenu l'accord des membres du comité de pilotage de CIM'Feu EC2.

**ANNEXE 3 : VÉRIFICATION AU FEU  
DES DALLES SELON LA NORME  
NF EN 1992-1-2/NA**

---

# Rotules plastiques sur appuis – Calcul des paramètres utiles

La méthode développée pour le calcul des rotules plastiques sur appuis repose sur la connaissance, pour une dalle d'épaisseur donnée et pour un temps d'exposition au feu normalisé, de 2 paramètres : l'inertie et la courbure de la dalle soumise au seul gradient de température. Nous calculons donc ces paramètres dans CIM'Feu EC2.

La méthode pour aboutir au moment d'appui consiste à admettre qu'il est possible de maintenir à chaud les hypothèses habituelles de la résistance des matériaux et du béton armé, de telle sorte que l'on admette que l'hyperstaticité puisse être levée par la méthode usuelle qui ramène le calcul des moments sur appuis intermédiaires à celui du calcul des moments sur appuis dans des poutres à deux travées. La méthode s'accompagne de l'hypothèse que l'inertie est celle du coffrage de la section droite que l'on suppose constituée d'un matériau homogène élastique et linéaire. La méthode, sanctionnée par l'expérience, évite ainsi de voir l'inertie dépendre du ferrailage et du comportement réel non linéaire du béton.

Considérons pour développer la méthode de calcul une section droite de dalle de largeur unité et de hauteur « h » soumise à la seule action d'un gradient de température.

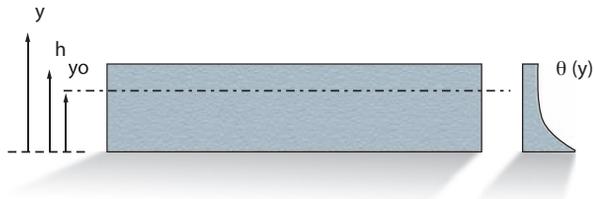


Illustration 1 – Section droite de dalle soumise à un gradient de température

Introduisons la cote  $y_0$ , la déformation longitudinale  $\epsilon_0$  à la cote  $y_0$  et la courbure  $\omega_0$  [rad/m] de la dalle soumise au seul gradient thermique, comptée positivement lorsque l'extension de la face inférieure est supérieure à celle de la face supérieure.

Avec ces notations, la déformation longitudinale à la cote  $y$ , comptée positivement s'il s'agit d'une extension, revêt l'expression :

$$\epsilon(y) = \epsilon_0 - \omega_0 (y - y_0)$$

L'hypothèse des petites transformations permet de considérer la partition des déformations  $\varepsilon = \varepsilon^m + \varepsilon^{th}$ . Cette équation exprime le fait que la déformation totale est la somme d'une déformation d'origine mécanique (associée à une contrainte) et de la dilatation thermique. Elle peut encore s'écrire :

$$\varepsilon(y) = \frac{\sigma(y)}{E_c(\theta(y))} + \varepsilon^{th}(\theta(y))$$

Où  $\sigma$  est la contrainte,  $E_c$  est le module du béton à la température  $\theta$  et  $\varepsilon^{th}$  est la dilatation thermique.

On arrive ainsi à l'expression de la contrainte à la cote  $y$  :

$$\sigma(y) = E_c(\theta(y)) [\varepsilon_0 - \varepsilon_0 (y-y_0) - \varepsilon^{th}(\theta(y))]$$

Connaissant les contraintes dans la section droite, on en déduit les éléments de réduction, effort normal et moment fléchissant :

$$N = \int_0^h \sigma(y) dy \quad \text{et} \quad M = -\int_0^h (y - y_0) \sigma(y) dy$$

En l'absence d'action extérieure autre que le gradient de température, le torseur des efforts extérieurs est nul ( $N = M = 0$ ). Il s'ensuit les deux relations :

$$\begin{cases} \int_0^h E_c(\theta(y)) [\varepsilon_0 - \omega_0(y - y_0) - \varepsilon^{th}(\theta(y))] dy = 0 \\ \int_0^h (y - y_0) E_c(\theta(y)) [\varepsilon_0 - \omega_0(y - y_0) - \varepsilon^{th}(\theta(y))] dy = 0 \end{cases}$$

Ces équations sont valables quel que soit  $y_0$ . Afin de simplifier les expressions,

nous allons le choisir tel que  $\int_0^h E_c(\theta(y)) (y - y_0) dy = 0$  .

On reconnaît dans cette expression une généralisation à chaud de l'équation de moment statique nul qui permet de définir à froid la position du centre de gravité des sections. De façon similaire, cette intégrale permet de définir la cote  $y_0$  du centre de rotation des sections pour un gradient de température donné.

Cette valeur particulière de  $y_0$  simplifie le système en :

$$\begin{cases} \int_0^h E_c(\theta(y)) [\varepsilon_0 - \varepsilon^{th}(\theta(y))] dy = 0 \\ \int_0^h (y - y_0) E_c(\theta(y)) [\omega_0(y - y_0) + \varepsilon^{th}(\theta(y))] dy = 0 \end{cases}$$

Le système d'équations précédent conduit finalement aux expressions de  $\varepsilon_0$  et  $\omega_0$  :

$$\varepsilon_0 = \frac{\int_0^h E_c(\theta(y)) \varepsilon^{th}(\theta(y)) dy}{\int_0^h E_c(\theta(y)) dy} \quad \text{et} \quad \omega_0 = - \frac{\int_0^h (y - y_0) E_c(\theta(y)) \varepsilon^{th}(\theta(y)) dy}{\int_0^h (y - y_0)^2 E_c(\theta(y)) dy}$$

Voyons à présent ce que devient la loi de comportement en flexion de la dalle à chaud en utilisant toujours la même définition de  $y_0$  et en introduisant la courbure  $\omega$  de la dalle soumise au moment  $M$  et au gradient de température précédent. On a dans ce cas :

$$M = \int_0^h (y - y_0) E_c(\theta(y)) [\omega(y - y_0) + \varepsilon^{th}(\theta(y))] dy$$

Soit finalement en introduisant la courbure  $\omega_0$  :

$$\omega - \omega_0 = \frac{M}{\int_0^h (y - y_0)^2 E_c(\theta(y)) dy}$$

On reconnaît dans cette expression la généralisation en présence d'un gradient thermique de la loi de comportement en flexion à froid  $\omega = \frac{M}{E_c I}$ . Le dénominateur est donc la rigidité principale de flexion  $E_c I$  cherchée pour un gradient de température donné.

Nous disposons à ce stade des expressions de la courbure sous gradient thermique et de l'inertie pour des dalles d'épaisseurs quelconques, il reste à présent à estimer ce que devient la rotation maximale  $\Omega_R$  quand l'épaisseur de la dalle est supérieure à 25 cm (limite anciennement adoptée dans le DTU).

La rotation maximale sur appui peut être obtenue par intégration de la courbure sur la zone autour de l'appui où le moment est compris entre le moment limite élastique  $M_y$  et le moment ultime  $M_u$ .

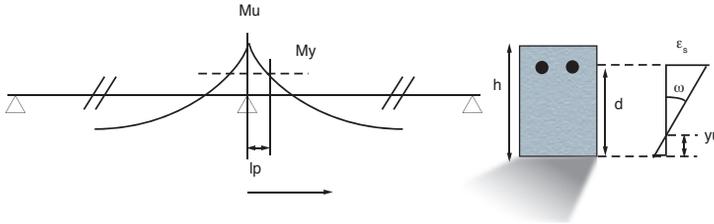


Illustration 2 – Rotation maximale sur appui – notations nécessaires au calcul

Avec les notations de la figure et en considérant la valeur absolue de la courbure, la rotation maximale sur appui est de la forme :

$$\Omega_R = 2 \int_{l_p} \omega(x) dx$$

En utilisant le diagramme rectangle des contraintes à l'ELU, on obtient la relation  $z = d - 0,4 y_u$  où « z » est le bras de levier et  $y_u$  la cote de la fibre neutre. Il est établi par ailleurs que le bras de levier d'une poutre ne varie pratiquement pas entre les moments  $My$  et  $M_u$  et que sa valeur est proche de  $0,9d$ . La cote

de la fibre neutre est donc  $y_u \approx \frac{d}{4}$ .

On en déduit que l'extension des aciers supérieurs est liée à la courbure par la relation :

$$\epsilon_s \approx \omega(d - y_u) \approx \omega \frac{3d}{4}$$

Or, la hauteur utile « d » d'une poutre est couramment égale à  $0,9h$ . On obtient alors  $\epsilon_s \approx 0,675 \omega h$ .

Il s'ensuit la relation suivante, obtenue sans hypothèse particulière sur la courbe des moments :

$$h\Omega_R \approx 3 \int_{l_p} \epsilon_s(x) dx$$

On constate que le produit ne dépend que de l'allongement de rupture des aciers, caractéristique intrinsèque, indépendante de la section étudiée et de la longueur  $l_p$ , elle-même proportionnelle à la hauteur de l'élément (Eurocode 2). On en déduit que  $\Omega_R$  doit être constant pour appliquer la méthode.

# Justification des rotules plastiques sur appuis dans le cas des dalles portant dans une direction

Comme évoqué précédemment, la méthode est une généralisation du calcul des moments sur appui intégrant l'existence d'une fissure d'appui caractérisée par la rotation  $\Omega$ . L'application de la méthode conduit à l'expression de la valeur absolue du moment sollicitant sur un appui intermédiaire :

$$M = M_a + M_\theta - M_\Omega$$

Avec :

- $M_a$ , la valeur absolue du moment sur appui provoqué par les charges et les surcharges, qui est celui que l'on prend en compte dans le calcul à froid des dalles (aux coefficients de sécurité près) ;
- $M_\theta$ , la valeur absolue du moment sur appui provoqué par le phénomène de gradient thermique résultant de l'action du feu ;
- $M_\Omega = k\Omega$ , le moment « libéré » par la rotation  $\Omega$  de la rotule plastique.

On peut évaluer la rotation de la rotule plastique en admettant que le comportement d'une rotule d'appui est de type rigido-plastique. Sa courbe expérimentale se réduit alors à une droite horizontale caractérisée par la valeur  $M_R$  lorsque la rotation est inférieure à la rotation limite  $\Omega_R$ . En écrivant alors que le moment résistant est égal au moment sollicitant, on obtient :

$$\Omega = \frac{M_a + M_\theta - M_R}{k}$$

Deux cas peuvent alors se présenter :

- $\Omega \leq \Omega_R$ , les aciers ne cassent pas et par conséquent le moment résistant  $M_R$  calculé est bien mobilisé.
- $\Omega > \Omega_R$ , les aciers cassent et par conséquent le moment mobilisé sur appui est nul ( $M_R = 0$ ).

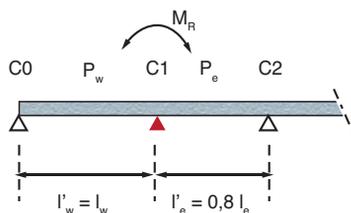
Pour les dalles portant dans un seul sens et dans le cas d'un chargement uniformément réparti (ou assimilé) dans chaque travée de part et d'autre de l'appui considéré, les moments  $M_a$  et  $M_\theta$  et le coefficient « k » revêtent la forme suivante :

$$M_a = \frac{P_w l_w^3 + P_e l_e^3}{8 (l_w + l_e)} ; \quad M_\theta = \frac{3E_c j}{2} \omega_0 ; \quad k = \frac{3E_c j}{l_w + l_e}$$

Où  $p_w, p_e$  sont les charges uniformément réparties par unité de longueur sur la travée de gauche, respectivement celle de droite et  $l'_w, l'_e$  sont les longueurs des travées fictives égales à la portée libre de la travée si elle est simplement posée sur l'autre rive et à 0,8 fois la portée libre si elle est continue au-delà de l'autre rive.

L'exemple suivant illustre les développements précédents. On s'intéresse ici à la rotule plastique le long de la coupure d'appui C1.

Les calculs précédents devront être effectués sur chaque appui de continuité afin de déterminer si les moments sur appuis sont mobilisables ou non.



## Justification des rotules plastiques sur appuis dans le cas des dalles portant dans deux directions

La démarche est formellement identique à ce qui vient d'être présenté à ceci près que les sollicitations dans la dalle n'ayant plus la forme simple précédente, les moments  $M_a$  et  $M_\theta$  et le coefficient « k » ont des expressions plus compliquées et dépendantes du ratio largeur sur longueur des panneaux situés de part et d'autre de l'appui étudié. Dans le cas d'un chargement uniformément réparti, ces expressions ont été évaluées par J.P.BOUTIN [5]. Nous les reproduisons ici.

Les longueurs « l' » sont maintenant des longueurs réduites définies par :  $l' = Xl_x$  où  $l_x$  représente toujours le petit côté du panneau considéré même si ce côté ne correspond pas au sens de la portée pour l'appui étudié.

$$M_a = \frac{k_{1w} P_w l_w^3 + k_{1e} P_e l_e^3}{k_{2w} l'_w + k_{2e} l'_e} ; M_\theta = \frac{(l'_w + l'_e) E_c i}{2 (k_{2w} l'_w + k_{2e} l'_e)} \omega_0 ; k = \frac{E_c i}{k_{2w} l'_w + k_{2e} l'_e}$$

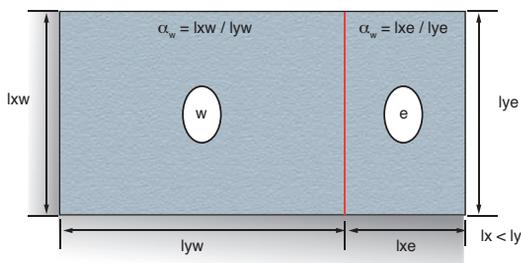


Illustration 3 – Notations pour le calcul des rotules plastiques sur appuis continus

Pour chaque panneau (w et e), les coefficients  $k_1$ ,  $k_2$  et  $X$  sont donnés dans le tableau suivant en fonction des rapports  $\alpha$  des portées (le petit côté étant toujours au numérateur) et selon que l'appui étudié corresponde à un petit ou un grand côté du panneau considéré (voir illustration).

$\alpha$	sur grands cotés		sur petits cotés		$X$	
	$k_1$	$k_2$	$k_1$	$k_2$		
1,00	0,0135	0,233	0,0135	0,235	0,920	
0,98	0,0141	0,233	0,0138	0,241	0,917	
0,96	0,0146	0,233	0,0141	0,247	0,914	
0,94	0,0152	0,234	0,0144	0,252	0,912	
0,92	0,0158	0,235	0,0147	0,258	0,909	
0,90	0,0164	0,237	0,0150	0,264	0,907	
0,88	0,0170	0,239	0,0153	0,270	0,905	
0,86	0,0176	0,241	0,0156	0,276	0,902	
0,84	0,0183	0,243	0,0159	0,281	0,900	
0,82	0,0190	0,244	0,0162	0,287	0,897	
0,80	0,0197	0,246	0,0165	0,293	0,894	
0,78	0,0204	0,247	0,0167	0,298	0,891	
0,76	0,0212	0,248	0,0170	0,304	0,888	
0,74	0,0220	0,249	0,0173	0,309	0,881	
0,72	0,0228	0,250	0,0175	0,314	0,885	
0,70	0,0236	0,251	0,0178	0,319	0,878	
0,68	0,0245	0,252	0,0180	0,324	0,874	
0,66	0,0254	0,253	0,0183	0,329	0,871	
0,64	0,0263	0,254	0,0185	0,333	0,868	
0,62	0,0272	0,256	0,0187	0,337	0,864	
0,60	0,0281	0,257	0,0189	0,341	0,861	
0,58	0,0290	0,259	0,0191	0,344	0,857	
0,56	0,0299	0,261	0,0193	0,348	0,854	
0,54	0,0308	0,264	0,0194	0,351	0,850	
0,52	0,0317	0,267	0,0196	0,353	0,845	
0,50	0,0326	0,271	0,0197	0,356	0,841	
0,48	0,0335	0,275	0,0198	0,358	0,835	
0,46	0,0344	0,279	0,0199	0,360	0,828	
0,44	0,0352	0,284	0,0200	0,362	0,820	
0,42	0,0361	0,289	0,0201	0,364	0,811	
0,40	0,0369	0,294	0,0202	0,366	0,800	
0,38	0,0377	0,300	0,0203	0,367		
0,36	0,0385	0,306				
0,34	0,0393	0,312				
0,32	0,0401	0,317				
0,30	0,0409	0,323				
↓	0,0417	0,333				

Illustration 4 – Valeurs des paramètres  $k_1$ ,  $k_2$  et  $X$  pour le calcul des rotules plastiques dans le cas des dalles portant dans deux directions

## Vérification aux moments fléchissants dans le cas des dalles portant dans une direction

---

Les moments résistants sur appuis étant définis et vérification faite qu'ils sont effectivement mobilisables (ceux qui ne le sont pas, sont nuls dans les calculs qui suivent), il reste à vérifier le panneau de plancher à la flexion.

Cette justification consiste à calculer le moment résistant en travée par unité de largeur de dalle et à vérifier :

$$\frac{M_w + M_e}{2} + M_t \geq M_0$$

Soit :

$$\frac{M_{wx} + M_{ex}}{2} + M_{tx} \geq p \frac{l_x^2}{8}$$

Avec  $p$  la charge uniformément répartie définie par unité d'aire du panneau.

## Vérification aux moments fléchissants dans le cas des dalles portant dans deux directions

---

Le principe de vérification est rigoureusement identique. Seule l'expression du moment isostatique provoqué par les charges appliquées diffère.

Les inégalités à vérifier sont maintenant :

$$\frac{M_{wx} + M_{ex}}{2} + M_{tx} \geq M_x \quad \text{et} \quad \frac{M_{wy} + M_{ey}}{2} + M_{ty} \geq \mu_y M_x$$

Avec  $p$  la charge uniformément répartie définie par unité d'aire du panneau,  $l_x \leq l_y$  et  $M_x = \mu_x p l_x^2$ .

Les valeurs de  $\mu_x$  et  $\mu_y$  utilisées dans CIM'Feu EC2 sont montrées dans le tableau suivant en fonction du rapport  $\alpha = \frac{l_x}{l_y}$ .

$l_x/l_y$	$\nu = 0$ (*)	
	$\mu_x = M_x / l_x^2$	$\mu_y = M_y / M_x$
0,385	0,110	0,200(**)
0,40	0,109	0,204
0,45	0,102	0,220
0,50	0,095	0,241
0,55	0,088	0,282
0,60	0,081	0,327
0,65	0,0745	0,369
0,70	0,068	0,436
0,75	0,062	0,509
0,80	0,056	0,595
0,85	0,051	0,685
0,90	0,046	0,778
0,95	0,041	0,887
1,00	0,037	1,000

(\*) Il est rappelé que, sauf cas particulier, le coefficient de Poisson du béton est pris égal à 0 pour le calcul des sollicitations et à 0,2 pour le calcul des déformations.

(\*\*) Les valeurs de  $\mu_y$  inférieures à 0,2 (correspondant à  $\alpha \leq 0,385$ ) ne sont pas à prendre en considération, en application de l'article 9.3.1.1 (2) de la norme NF EN 1992-1-1.

Image de couverture d'après photos Fotolia, DR.  
Conception, mise en page et graphiques : Amprincipe et D. Lozach  
[www.amprincipe.com](http://www.amprincipe.com)  
Impression : Print Concept – juin 2011

En prévision de l'adaptation prochaine de la réglementation française au nouveau contexte des Eurocodes en matière de sécurité au feu, Cimbéton (Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications) et le CSTB (Centre scientifique et technique du Bâtiment) ont réalisé, en partenariat, une refonte du logiciel CIM'feu, dédié à la vérification au feu des éléments de structure en béton.

Vous êtes... bureau d'études ou de contrôle, calculateur au sens large de structures en béton? Cimbéton et le CSTB vous invitent à découvrir le logiciel CIM'feu-Eurocode 2, parfait outil d'accompagnement pour une vérification aisée des éléments de structure en béton.

**CSTB**  
*le futur en construction*



**Autodesk**



**CIM**béton

**CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS**

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10  
E-mail : [centrinfo@cimbeton.net](mailto:centrinfo@cimbeton.net) • internet : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)