

Modélisation thermique des structures

Dans l'analyse du comportement d'une structure sous l'action du feu, la première étape est le calcul thermique pour trouver le champ de température dans la structure. Ce champ est la donnée pour le calcul analytique ou numérique de la structure.

Quand une structure est exposée au feu, le transfert thermique se produit par convection et radiation. La convection a lieu au contact entre la structure et le feu ou l'air ambiant ou l'air dans les espaces vides de la structure. La radiation a lieu entre le feu et la face exposée de la structure ou entre les surfaces de la structure qui sont opposées.

L'objet de ce chapitre est de proposer une méthode performante dans ANSYS qui est capable de considérer tous les phénomènes ci-dessus pour n'importe quel type de structure. Les structures étudiées au CERIB peuvent être une paroi d'un tunnel, une cheminée, une dalle ... La structure choisie dans ce chapitre est une dalle alvéolée. Elle est suffisamment complexe pour considérer tous les phénomènes cités ci-dessus. De plus, les dalles alvéolées, avec leur grande utilité dans l'industrie, ont été beaucoup étudiées au CERIB ces dernières années.

4.1 Description de la structure testée au CERIB

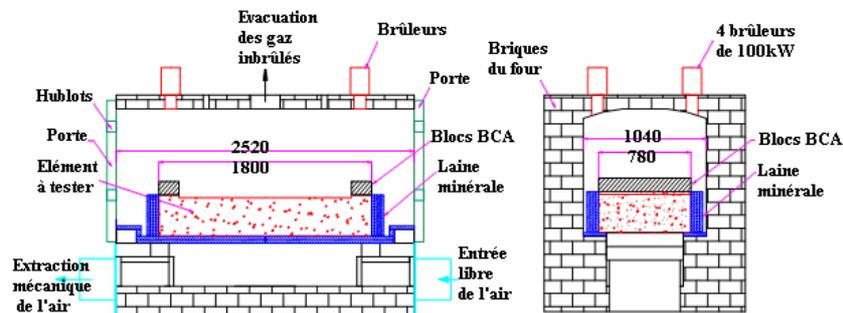


Figure 4.1

Schéma du four d'essai avec la dalle testée

La dalle modélisée a une épaisseur de 28cm. Sa largeur est de 78cm et sa longueur est de 180cm (y compris le dépassement des torons sur 15 cm en about). Aux deux abouts, la section est pleine sur une longueur de 15cm. Dans les autres positions de la dalle, la section est alvéolée comme sur la Figure 4.2. La dalle est placée horizontalement dans le four d'essai du CERIB (face chauffée au dessus, c'est-à-dire à l'envers par rapport à leur configuration en réalité) (voir la Figure 4.1).

Un isolant en laine minérale est interposé sur la périphérie. Il assure l'étanchéité au feu autour de la dalle et permet d'isoler la face latérale comme dans le cas d'une configuration réelle (présence de dalles adjacentes). Deux éléments isolants de béton cellulaire de hauteur de 10

cm sont ajoutés au niveau des chaînages d'about, côté face exposée afin de simuler la présence d'un voile porteur ou d'une retombée de poutre. L'essai ne représente pas totalement la configuration réelle en particulier l'effet de pincement des torons dépassants.

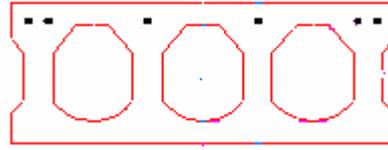


Figure 4.2

Section transversale

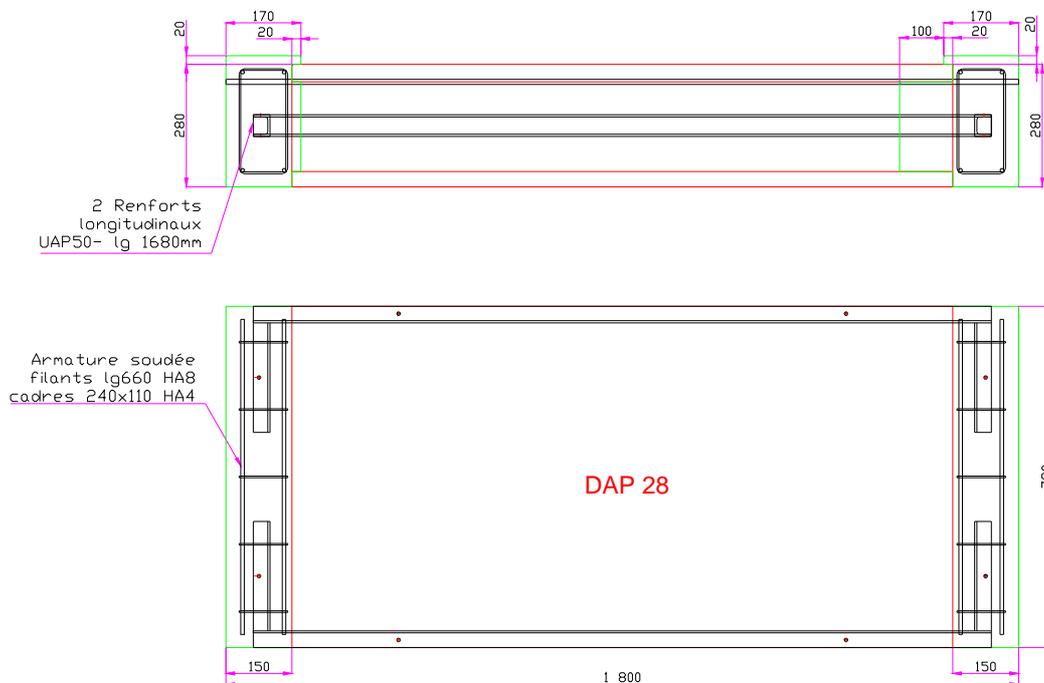


Figure 4.3

Plan de la dalle de l'essai du CERIB

Pour les chaînages d'about, des armatures en forme de U sont mises en place afin de confiner la dalle testée et garder les fissures bien fermées. A une extrémité de la dalle, le béton de chaînage remplit les alvéoles sur 2 cm. A l'autre extrémité, le béton de chaînage remplit les alvéoles sur 10 cm (voir la Figure 4.3).

Le four d'essai est muni de quatre brûleurs à gaz de 100 kW pilotés de manière automatique au moyen de thermocouples à plaque placés à 10 cm de la face exposée de la dalle.

L'augmentation de la température de l'air en contact avec la face exposée suit la courbe de feu ISO 834.

4.2 Généralités sur la modélisation

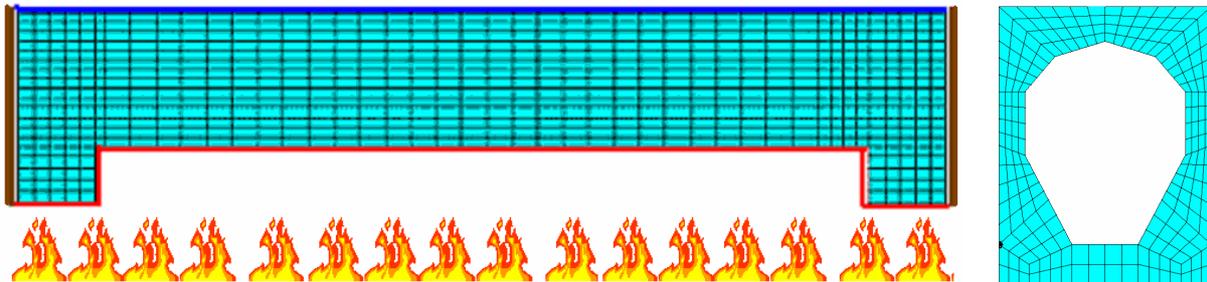


Figure 4.4

Modèle numérique et section transversale modélisée

La section transversale de la dalle est périodique, le feu est constant sur toute la largeur de la dalle. C'est pourquoi, un volume élémentaire de la dalle qui contient une alvéole est modélisé. Dans la modélisation, la face exposée est la face inférieure, contrairement à l'essai (voir la Figure 4.4).

En ce qui concerne les conditions limites, les faces inférieures (ligne rouge) sont exposées au feu. La face supérieure (ligne bleue) est en contact avec l'air de l'environnement. Les quatre faces latérales (ligne en marron) peuvent être considérées isolées thermiquement. Il n'y a donc pas de flux thermique traversant ces quatre faces.

Quand aux matériaux, il y a trois différents matériaux utilisés dans cette modélisation : le béton de la dalle, le béton cellulaire et l'acier du toron. Les propriétés à déclarer sont la conductivité, la chaleur spécifique et la masse volumique.

Pour le béton cellulaire, ces valeurs sont prises constantes par simplification : conductivité thermique = 0,125 W.m.K, chaleur spécifique = 1110 J/kg/K, masse volumique = 400 kg /m³.

Pour le béton de la dalle, ses propriétés sont définies dans l'Eurocode II. Leurs illustrations sont présentées dans les figures : Figure 4.5, Figure 4.6 et Figure 4.7.

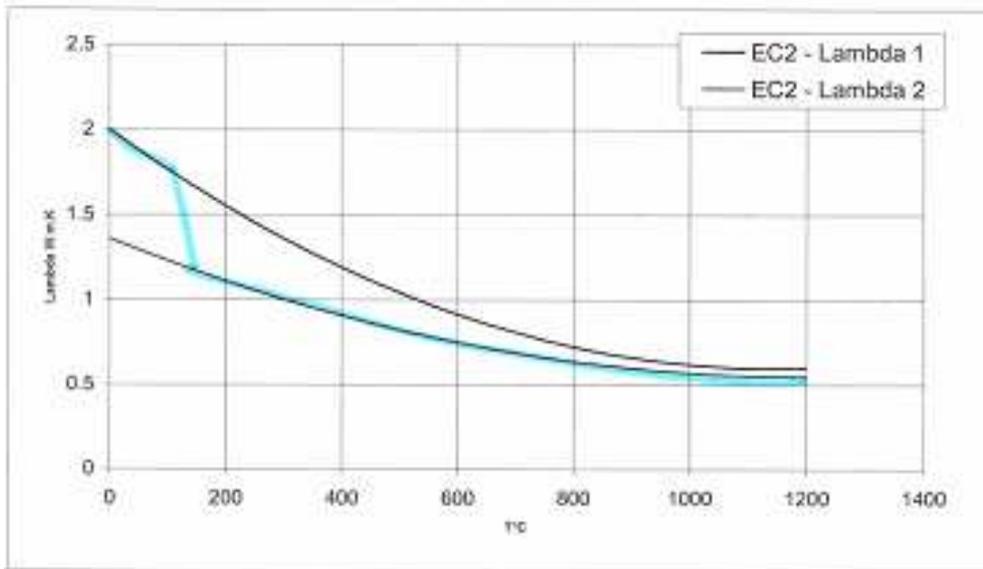


Figure 4.5

Conductivité thermique du béton de la dalle [28]

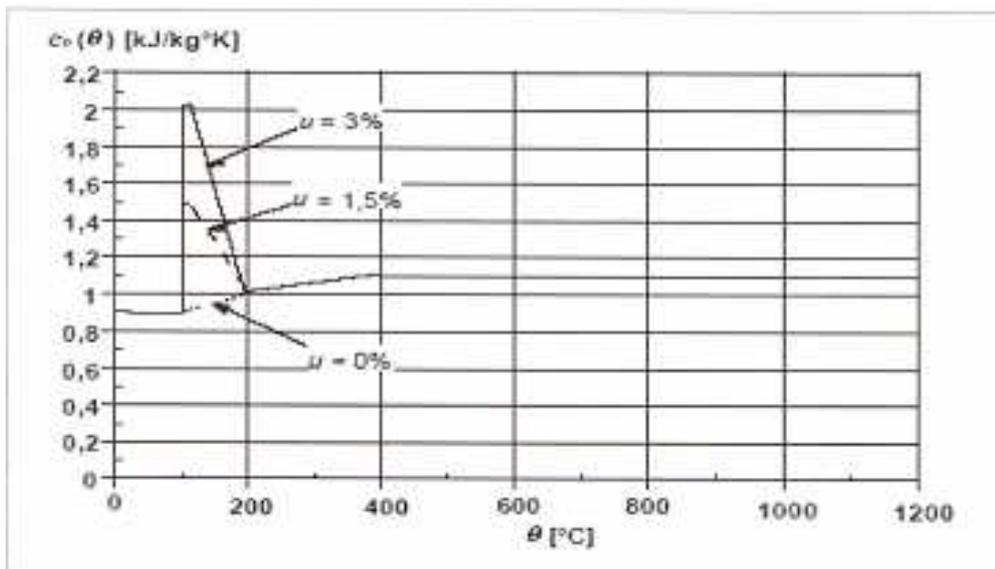


Figure 4.6

Chaleur spécifique du béton de la dalle [28]

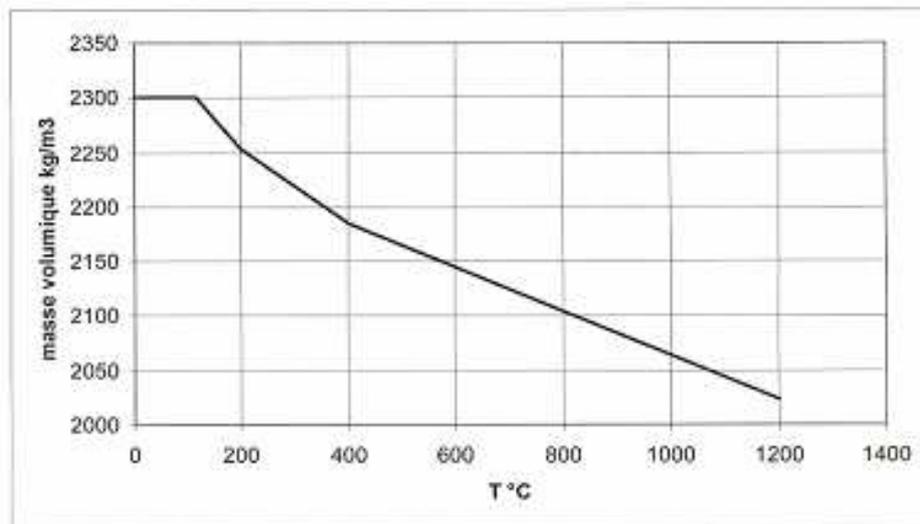


Figure 4.7

Masse volumique du béton [28]

Pour l'acier de toron, la masse volumique est constante et égale à 7800 kg/m^3 . Les autres propriétés sont définies dans l'Eurocode II et sont illustrées sur les figures : Figure 4.8 et Figure 4.9.

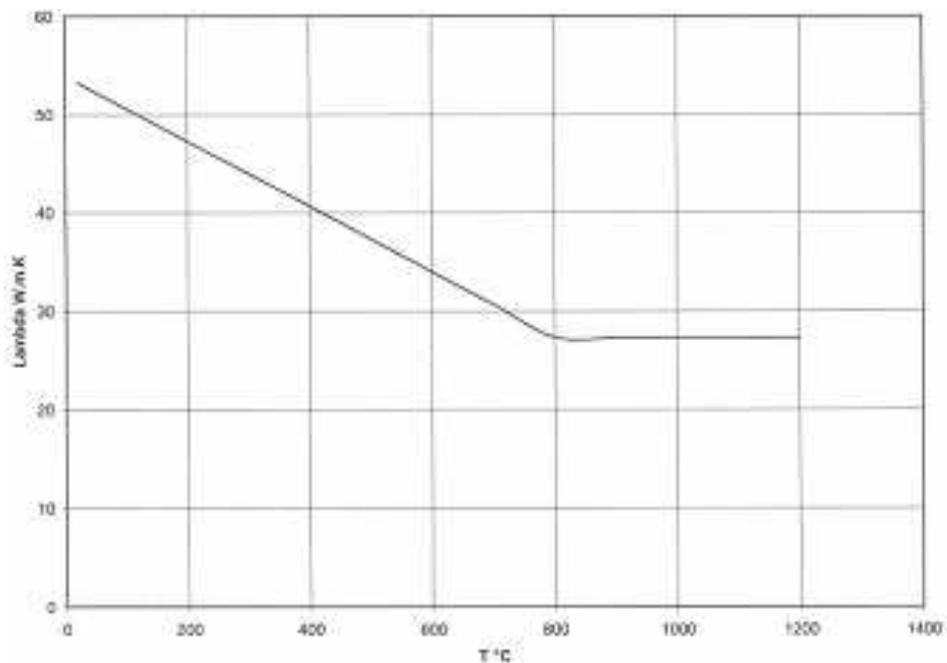


Figure 4.8

Conductivité thermique de l'acier de toron [28]

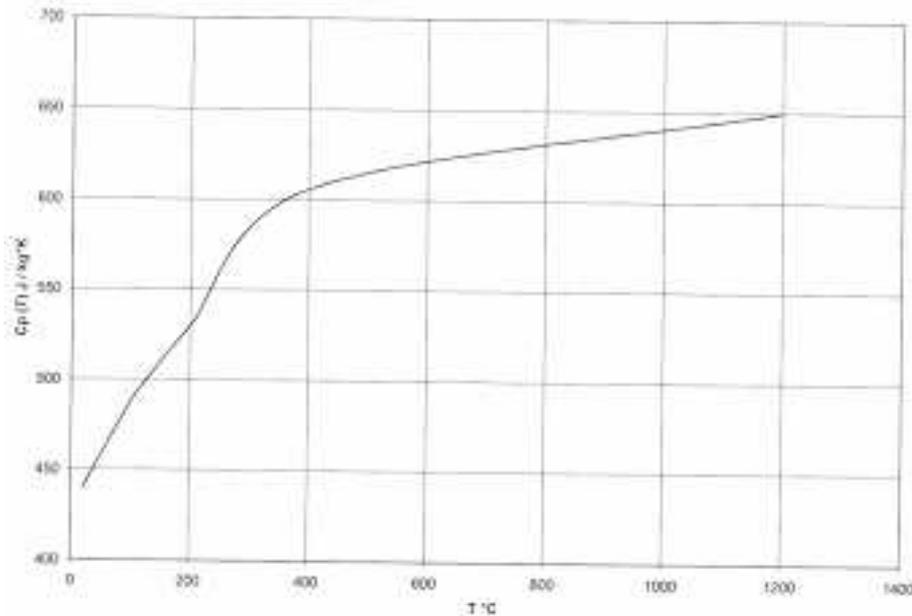


Figure 4.9

Chaleur spécifique de l'acier de toron [28]

4.3 Méthodes avancées de la modélisation thermique dans ANSYS

Cette section a pour but de décrire la méthode utilisée par ANSYS dans la modélisation thermique des structures.

4.3.1 Modélisation du feu

L'action du feu sur la structure peut se traduire en deux flux thermiques traversant la face exposée : un flux par convection et un flux par radiation. Dans le cas du feu, la température de l'air varie en fonction du temps ainsi que les flux thermiques. Pour pouvoir modéliser ces actions, ANSYS dispose d'un élément spécial qui s'appelle « Élément surfacique SURF152 ».

L'élément SURF152 (voir la Figure 4.10) a cinq noeuds. Les quatre premiers noeuds se trouvent sur la surface de structure pour simuler la température et le flux thermique traversant la surface. Le dernier noeud qui s'appelle « extra node » se trouve en dehors de la surface. Cet élément simule le transfert thermique entre les quatre noeuds de la surface et le noeud « extra node ».

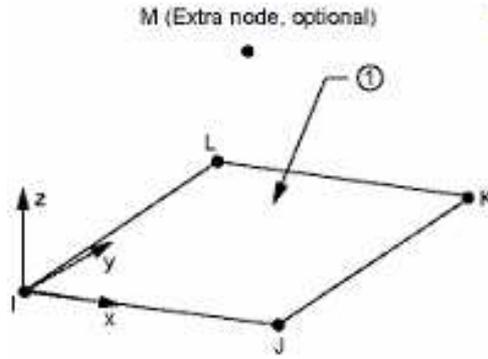


Figure 4.10

Elément surfacique SURF152 [19]

Le comportement de l'élément SURF152 est la relation entre le vecteur des températures des nœuds et le vecteur des flux thermiques aux nœuds. Selon l'explication donnée dans [19], on peut écrire le comportement de SURF152 comme suit :

$$\begin{bmatrix} Q_I \\ Q_J \\ Q_K \\ Q_L \\ Q_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_I & & & & -K_I \\ & K_J & & & -K_J \\ & & K_K & & -K_K \\ & & & K_L & -K_L \\ -K_I & -K_J & -K_K & -K_L & (K_I + K_J + K_K + K_L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_I \\ T_J \\ T_K \\ T_L \\ T_M \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Dans le cas de convection, chaque terme de la matrice de rigidité est calculé selon la formule (4.2) dans [19]. Ici, $N_i(x, y)$ est la fonction de forme de l'élément quadratique contenant les quatre premiers nœuds I, J, K, L de SURF152 et h_f est le coefficient de convection.

$$K_i = \int_{\text{Aire}_{IJKL}}^{x,y} h_f \cdot N_i(x, y) d(\text{aire}) ; i = I, J, K, L \quad (4.2)$$

A partir des équations (4.1) et (4.2), on a :

$$Q_i = K_i \cdot (T_i - T_M) = \left[\int_{\text{Aire}_{IJKL}}^{x,y} N_i(x, y) d(\text{aire}) \right] \cdot h_f \cdot (T_i - T_M); \text{ avec } i = I, J, K, L \quad (4.3)$$

L'équation (4.3) nous permet de conclure que la nature de l'élément SURF152 est la combinaison des quatre éléments de barre de convection IM, JM, KM et LM et l'aire de chaque élément est la suivante :

$$A_i = \int_{\text{Aire}_{IJKL}}^{x,y} N_i(x, y) d(\text{aire}) ; i = I, J, K, L \quad (4.4)$$

Et on a l'équation de la convection de chaque élément est :

$$Q_i = A_i \cdot h_f \cdot (T_i - T_M); \text{ avec } i = I, J, K, L \quad (4.5)$$

La température à un point quelconque sur la surface IJKL peut être calculée par l'équation suivante :

$$T(x, y) = T_i \cdot N_i(x, y) ; \text{ avec } i = I, J, K, L \quad (4.6)$$

De la même façon, dans le cas de la radiation, le flux thermique de chaque élément de barre est calculé comme suit :

$$Q_i = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_i \cdot A_i (T_i^4 - T_M^4) = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_i \cdot A_i (T_i^2 + T_M^2) \cdot (T_i + T_M) \cdot (T_i - T_M) \quad (4.7)$$

Dans la formule ci-dessus, F_i est le facteur qui prend en compte l'angle d'inclinaison de la ligne reliant le nœud M au point d'intégration proche du nœud i (voir la Figure 4.11).

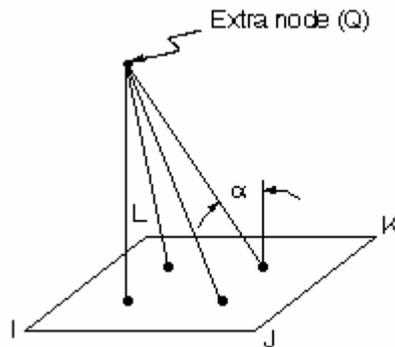


Figure 4.11

Illustration de l'angle d'inclinaison [19]

Pour transformer l'équation analytique (4.7) en équation algébrique qui peut être utilisable dans la méthode des éléments finis, cette équation va être résolue par des calculs itératifs (selon [19]). Le flux thermique à l'itération n est donc égal à :

$$\begin{aligned} Q_{i,n} &= \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_i \cdot A_i (T_{i,n}^2 + T_{M,n}^2) \cdot (T_{i,n} + T_{M,n}) \cdot (T_{i,n} - T_{M,n}) \\ &= \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_i \cdot A_i \cdot C_{n-1} \cdot (T_{i,n} - T_{M,n}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Donc, les valeurs de la matrice K sont aussi mises à jours à chaque itération dans le calcul éléments finis. A partir de (4.1) et (4.8) on peut trouver la formule de calcul des coefficients de la matrice K :

$$K_i^{n-1} = \int_{\text{Aire}_{IJKL}}^{\text{x,y}} \sigma \cdot \varepsilon \cdot F_i \cdot A_i \cdot C_{n-1} \cdot N_i(x, y) d(\text{aire}) ; i = I, J, K, L \quad (4.9)$$

A partir des analyses ci-dessus, on peut conclure que, avec cet élément, le nœud « extra node » peut jouer le rôle d'une source thermique et le feu est modélisé en définissant l'évolution de la température du nœud « extra node » en fonction du temps. Les flux

thermiques traversant la surface de structure seront calculés en fonction des paramètres de la convection et de la radiation qu'on déclare pour l'élément.

Pour l'utilisation de cet élément dans notre calcul, on n'a besoin que d'un seul nœud « extra node » pour représenter le feu parce que le feu ISO est, en tous points, identique sur toute la surface exposée. Ce nœud va être attaché dans tous les éléments SURF152 qui sont collés sur toute la surface exposée au feu. Dans ce cas, la position du nœud « extra node » n'a aucune influence sur le transfert thermique. L'effet de l'angle d'inclinaison est donc supprimé.

4.3.2 Modélisation du transfert thermique dans l'alvéole

L'alvéole de la dalle est fermée. Au cours du réchauffement de la dalle, la convection se produit entre les surfaces intérieures de l'alvéole et l'air dans l'alvéole. La difficulté est qu'on ne connaît pas la valeur de la température de l'air dans l'alvéole parce qu'elle est déterminée automatiquement par l'équilibre thermique dans l'alvéole. Face à cette difficulté, on utilise l'élément SURF152 qui permet de modéliser l'air de l'alvéole par les nœuds « extra node ». Ces nœuds jouent le rôle d'un pont pour le transfert thermique dans l'alvéole.

Pour la structure étudiée, le feu est identique sur toute la longueur de la dalle. C'est pourquoi, le phénomène de convection de l'air de l'alvéole dans cette direction n'est pas considérable. En plus, dans la direction transversale, on utilise l'hypothèse d'une température moyenne homogène de l'air de Fellingner (voir [29]). Cette hypothèse est acceptable parce que la capacité calorifique de l'air est très faible par rapport à celle du béton. Pour toutes ces raisons, on a besoin seulement d'un nœud « extra node » pour représenter l'air dans l'alvéole. Ce nœud est inclus dans tous les éléments surfaciques SURF152 qui sont attachés aux surfaces intérieures de l'alvéole.

Concernant la radiation entre les surfaces intérieures de l'alvéole, la méthode « radiosity solution » est utilisée. L'idée de cette méthode est que la résolution du système des équations basiques de la radiation entre les surfaces est faite en combinaison avec la résolution de la conduction thermique dans le corps de la structure.

Le système des équations basiques de cette méthode est déduit directement des équations fondamentales de la radiation entre N faces. Ce système qui est présenté dans [19] est comme suit :

$$\sum_{j=1}^N [\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) \cdot F_{ij}] q_j^0 = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 \quad (4.10)$$

et

$$q_i = q_i^0 - \sum_{j=1}^N F_{ij} \cdot q_j^0 \quad (4.11)$$

Ici, q_i^0 est le flux thermique sortant de la surface i et q_i est le flux total de chaque surface i.

T_i est la température moyenne de chaque surface. F_{ij} est le coefficient qui prend en compte la distance et l'orientation entre deux surfaces i et j . Le système (4.10) permet de calculer le champ q_i^0 en sachant le champ T_i selon les formules de [19] suivantes :

$$[A]\{q^0\} = \{D\} \quad (4.12)$$

Ici,

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) \cdot F_{ij} \\ D_i &= \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 \end{aligned} \quad (4.13)$$

A partir de ces équations, on peut décrire les étapes de calcul pour chaque pas de chargement comme suit :

- A partir du champ de température initiale T_i , calculer les flux thermiques qui sortent de chaque face de l'alvéole q_i^0 selon le système algébrique (4.12)
- Calculer le flux thermique net de chaque face q_i selon l'équation (4.11)
- Ces flux thermiques constituent le chargement pour le calcul de la conduction dans le corps de la dalle
- Le nouveau champ de température obtenu est utilisé pour recalculer les flux thermiques
- Cette boucle continue jusqu'au moment où la convergence du champ de température T_i et du champ de flux thermique q_i au bord de l'alvéole est atteinte.

4.4 Résultats et validation

4.4.1 Résultats

La structure est maillée en 21170 éléments. Le calcul thermique transitoire dure environ 60 minutes. Ce qui reste raisonnable en termes de temps de calcul.

La distribution de la température le long de la dalle est présentée sur la Figure 4.12. La température ne varie pas le long de la dalle sauf aux zones d'appui. L'existence des appuis diminue considérablement la température dans les zones au-dessus des appuis. Cela favorise l'ancrage des armatures (HA ou toron) à l'extrémité de la dalle.

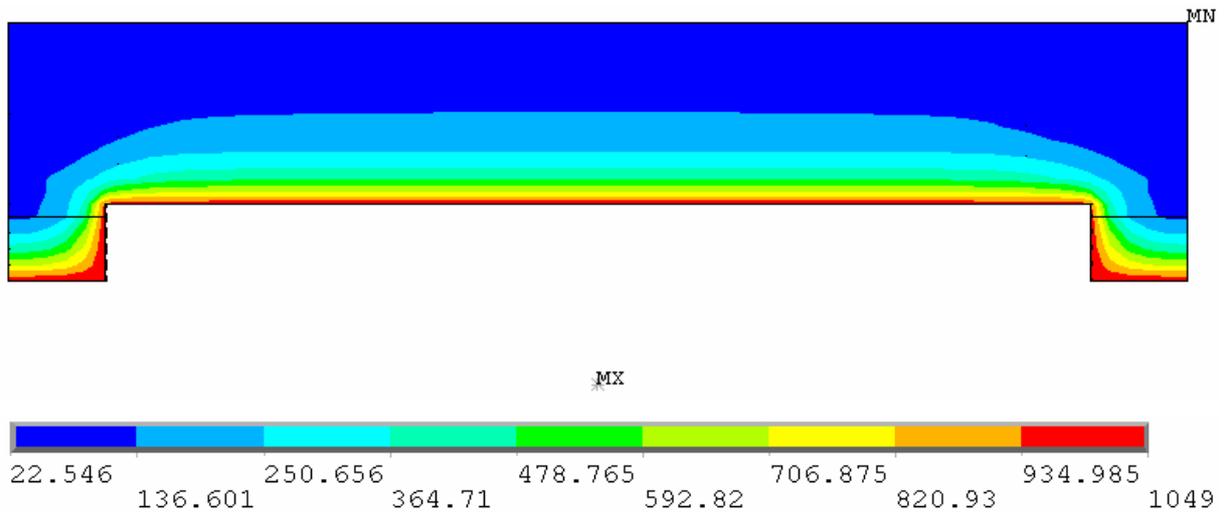


Figure 4.12

Distribution de la température dans la dalle après 2h du feu

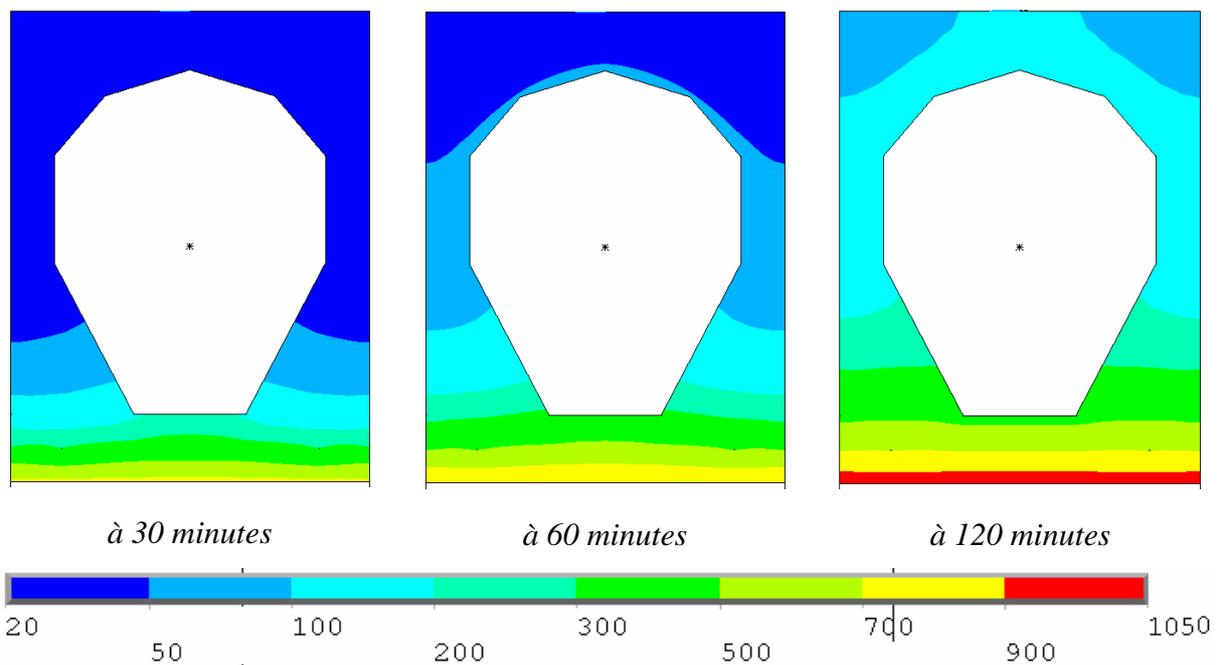


Figure 4.13

Distribution de la température dans la section transversale

La Figure 4.13 présente la distribution de la température sur la section transversale après 30min, 1h et 2h. Au bout de deux heures, la température maximale est de 1050°C à la surface exposée, la température minimale est de 82°C à la surface non exposée. On peut trouver que la variation de la température le long de la hauteur est très importante. La partie supérieure de la dalle est beaucoup moins affectée par le feu que les couches inférieures.

En réalisant les calculs avec et sans radiation/convection dans l'alvéole, on trouve l'importance de prendre en compte la radiation et la convection dans l'alvéole. En fait, si on ne les prend en compte, la température de la partie supérieure de la section transversale est diminuée d'environ 50%.

4.4.2 Validation

Pour valider la modélisation, il faut comparer les résultats du calcul numérique avec ceux de l'essai expérimental du CERIB. Les résultats de l'essai sont les températures mesurées par les thermocouples qui sont disposées en deux zones :

- Au milieu de la dalle, la distribution de la température sur la section transversale sera validée. Les points mesurés se trouvent le long de la hauteur de la nervure : à la surface exposée, à la position du toron, à mi-hauteur, à la surface non exposée.
- Aux abouts, la distribution de la température le long du tronçon de toron sur les appuis sera validée. Les données de la température du toron dans cette zone seront utiles pour l'étude de l'ancrage du toron à haute température.

Le schéma de disposition des thermocouples est illustré sur les figures : Figure 4.14 et Figure 4.15.

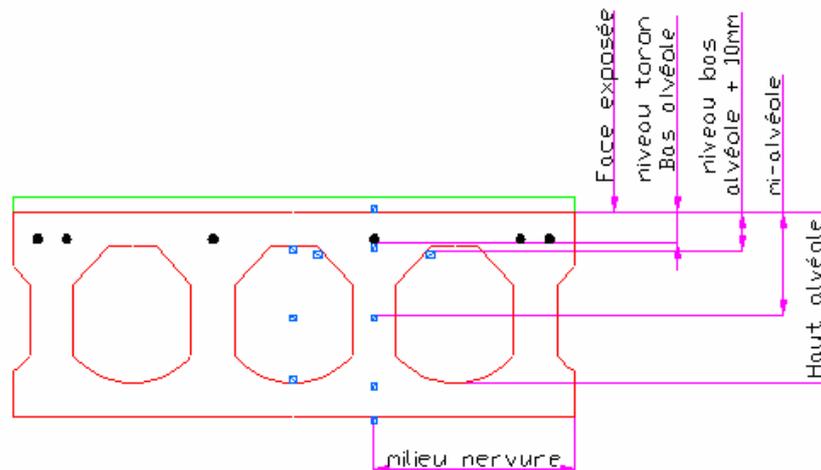


Figure 4.14

Schéma du positionnement des thermocouples dans la section

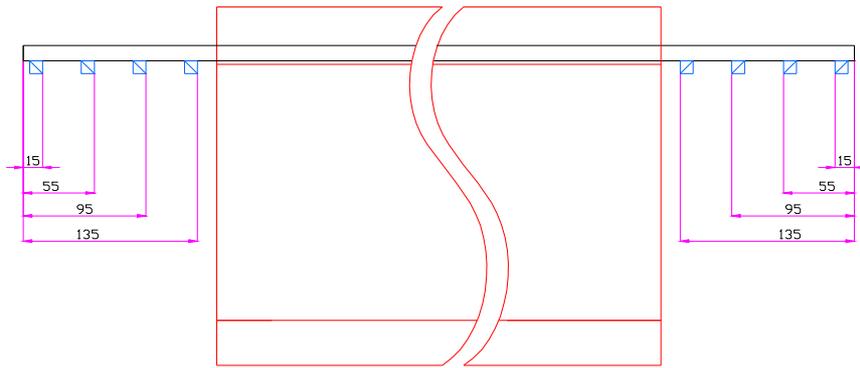


Figure 4.15

Schéma du positionnement des thermocouples dans les abouts

4.4.2.1 Validation des résultats dans la section transversale

Sur les diagrammes dans la Figure 4.16 et la Figure 4.17, les valeurs de calcul (lignes continues) et celles d'essai (points) de la température mesurées aux points le long de la hauteur de la nervure de la section de la dalle sont présentées.

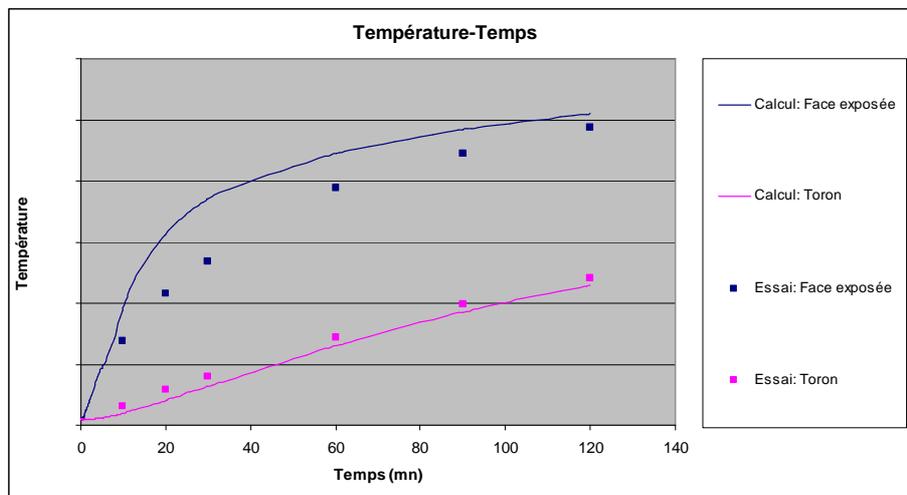


Figure 4.16

Evolution de la température à la surface exposée et à la position du toron (calcul et essai)

On peut noter un écart entre les températures calculées et mesurées à la surface exposée de l'ordre de 50°C à 100°C entre 20 minutes et 90 minutes. De fait, la résistance du béton à cette zone sera plus faible par la modélisation que la résistance réelle. A 120 min, la valeur de calcul est presque identique à celle de l'essai. Quand à la température à la position du toron, la

valeur de calcul est en bon accord avec les résultats de l'essai.

La Figure 4.17 représente la température à mi-hauteur de la nervure et à la surface non exposée : les résultats de calcul et ceux de l'essai sont en bon accord.

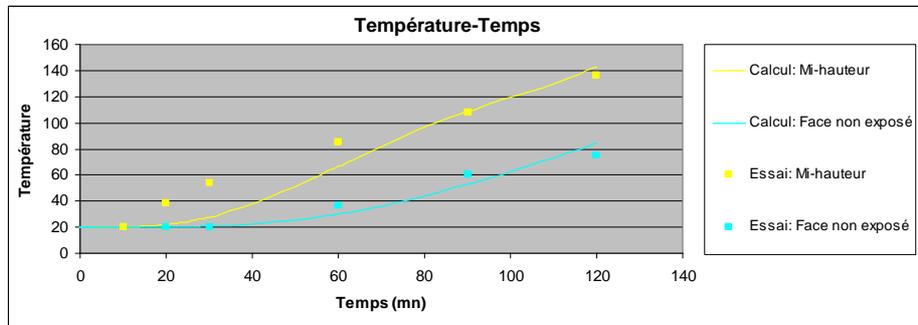


Figure 4.17

Evolution de la température à mi-hauteur de la section et à la surface non exposée

4.4.2.2 Validation aux abouts

Dans la Figure 4.18, les lignes continues représentent la température sur toute la longueur du tronçon du toron au-dessus de l'appui. La position 0 mm est celle de l'appui et la position 150 mm est à l'extrémité du toron. Les températures mesurées sont présentées par les points discrets à quatre différentes positions : à 15 mm, 55 mm, 95 mm et 135 mm de l'extrémité de la dalle.

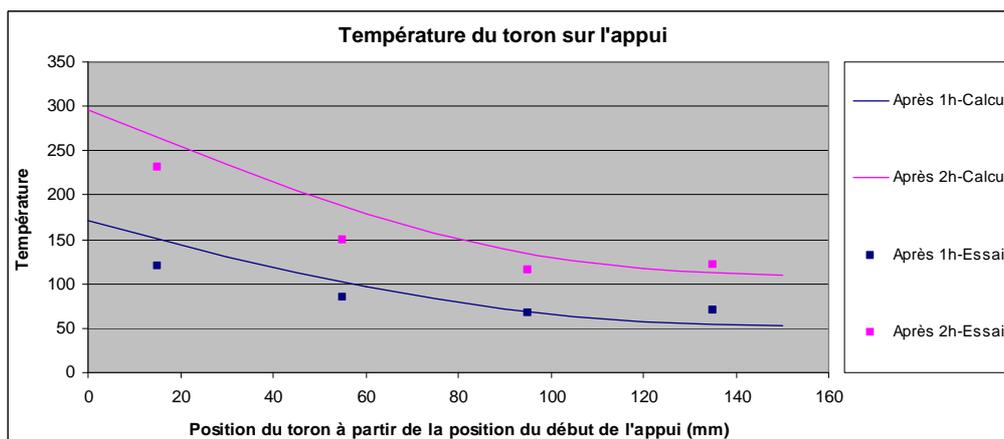


Figure 4.18

Distribution de la température le long du tronçon du toron au-dessus de l'appui

La modélisation prévoit bien la température aux différents points du toron dans la partie au-dessus des appuis. La différence entre le calcul et l'essai est faible.

4.4.2.3 Conclusion

La méthodologie de modélisation thermique proposée dans ce chapitre présente sa performance en tenant compte de plusieurs phénomènes thermiques lors d'incendie et en donnant des résultats généralement proches de la réalité.

En général, les températures à la face exposée au feu et aux torons au-dessus des appuis sont un peu plus élevées dans la modélisation que dans l'essai.

Les calculs ont prouvé la nécessité de modéliser la radiation et la convection dans les alvéoles pour simuler bien le comportement thermique de la structure.