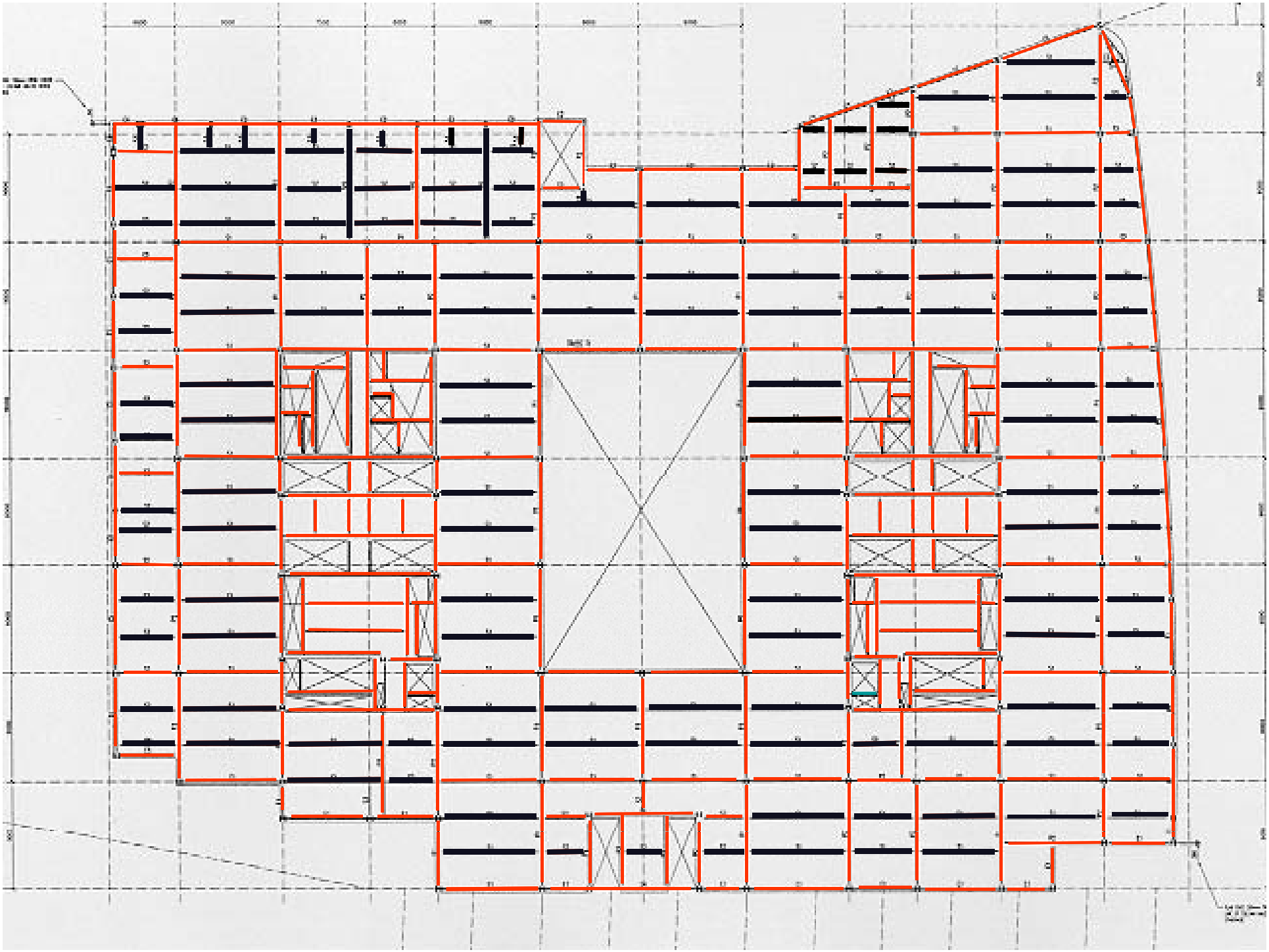
Research Fund for Coal & Steel

Comportement au feu des systèmes de plancher mixte acier-béton

Méthode de calcul simplifiée

Objectif de la méthode de calcul



Contenu de la présentation

- **Comportement mécanique des planchers mixtes en situation d'incendie**
- **Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C**
  - **Modèle de dalle**
  - **Modes de ruine**
- **Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à température élevées**
  - **Extension au comportement au feu**
  - **Effet membrane à température élevée**
  - **Contribution des poutres non protégées**
  - **Calcul des poutres protégées**

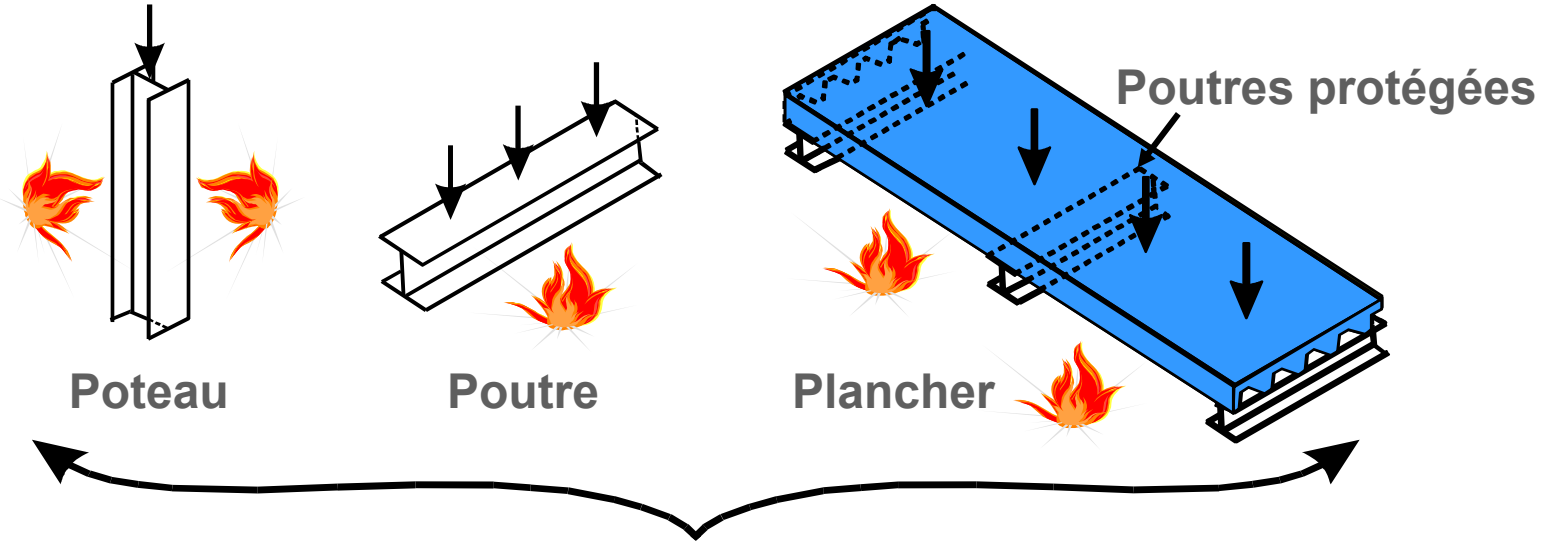
Comportement mécanique des planchers mixtes

Comportement mécanique des planchers mixtes

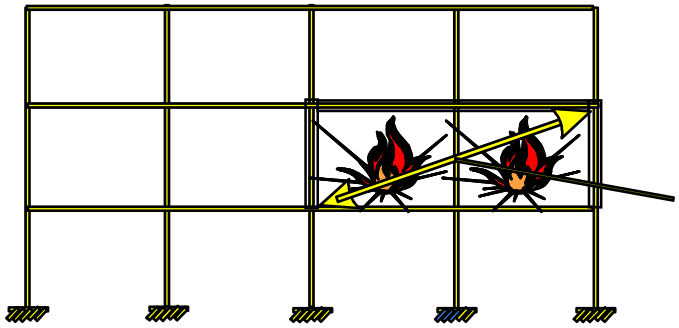
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Méthode de calcul traditionnelle**



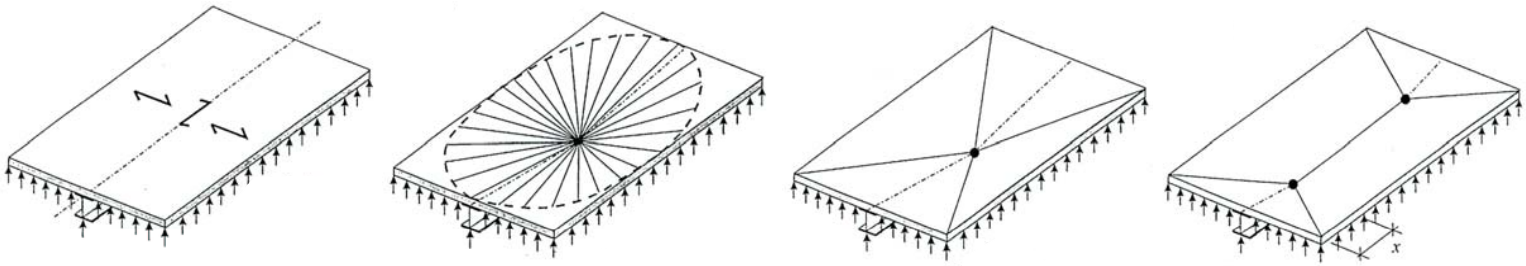
Les méthodes existantes supposent que les éléments isolés se comporteront de façon similaire dans un bâtiment réel



Comportment mécanique des planchers mixtes

- **Comportement réel d'un plancher mixte comprenant un treillis soudé dans la dalle**

Elévation de température au cours de l'incendie



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Flexion simple → **Comportement en membrane**

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

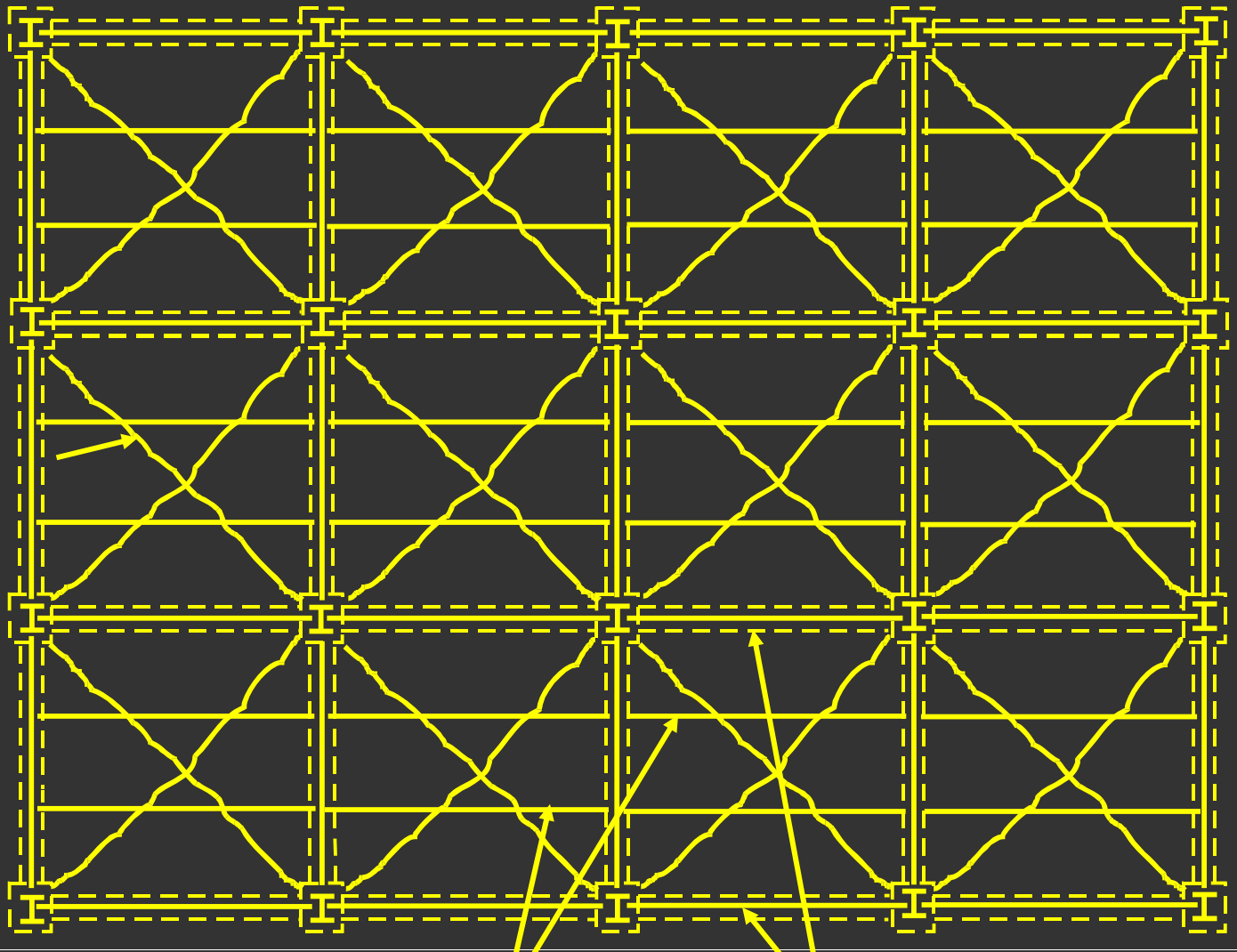
- **Méthode développée par le Professeur Colin Bailey**

  Université de Manchester

  anciennement avec le Building Research Establishment (BRE)

Dimensionnement pour l'effet membrane au feu

Chemin de fissura-tion



Poutres non protégées

Poutres protégées

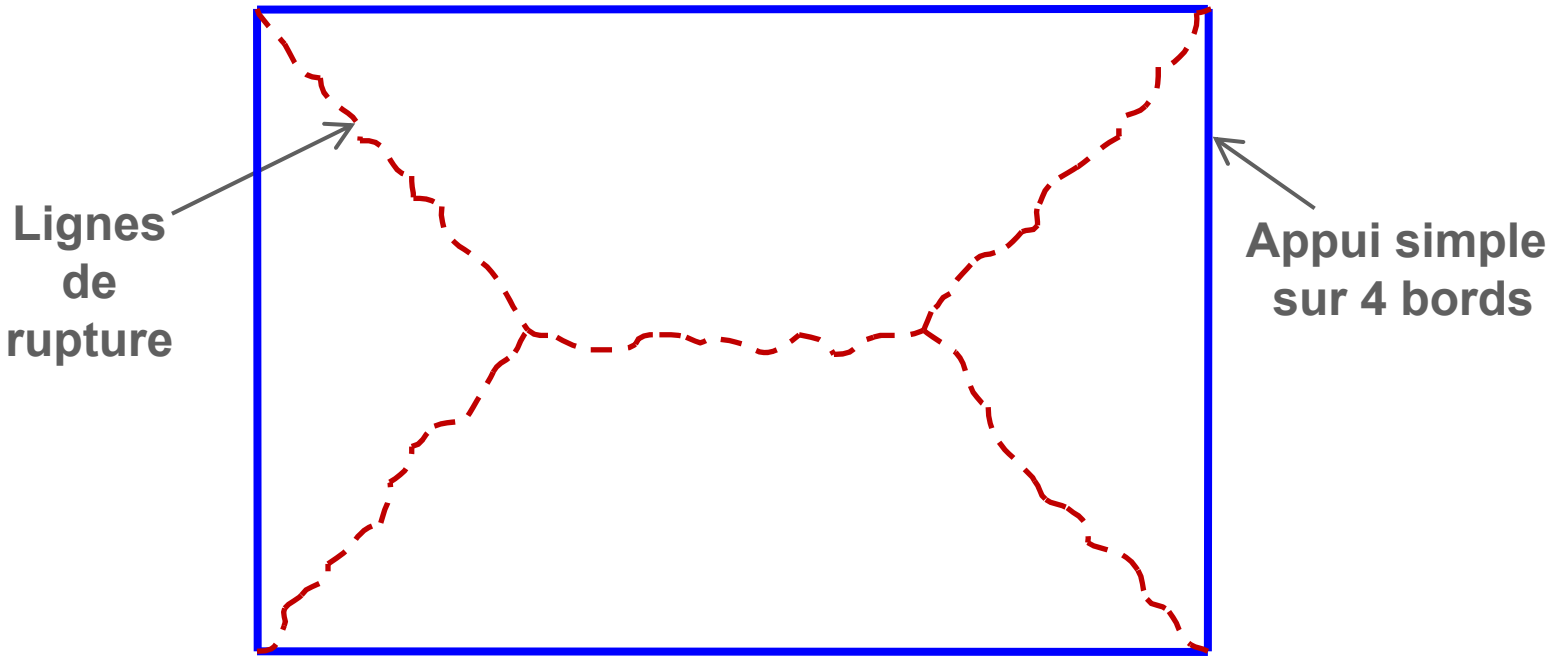
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

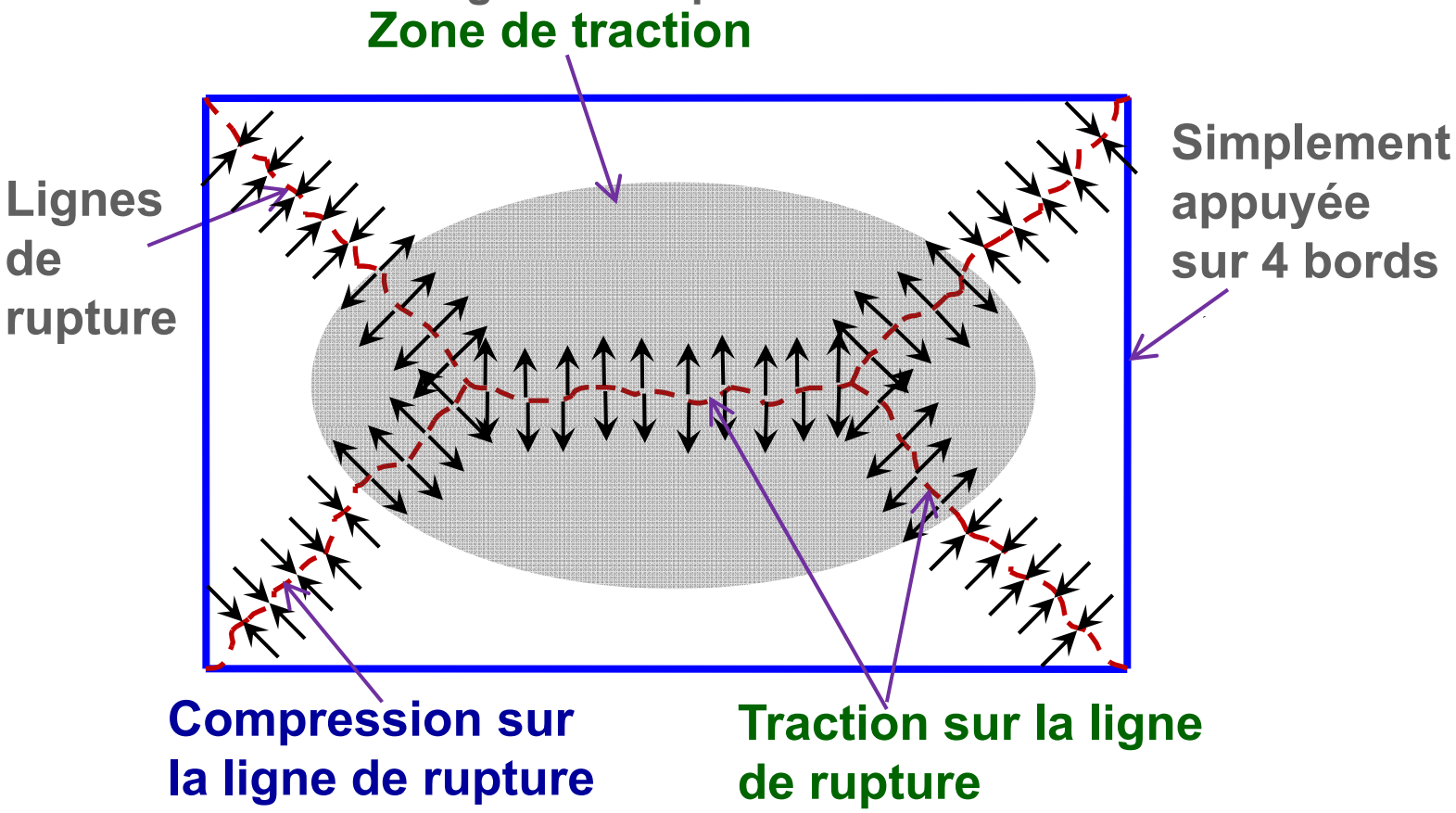
Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Modèle de dalle à 4 côtés maintenus verticalement** (lignes de rupture plastique) – sans maintien horizontal – hypothèse très conservative



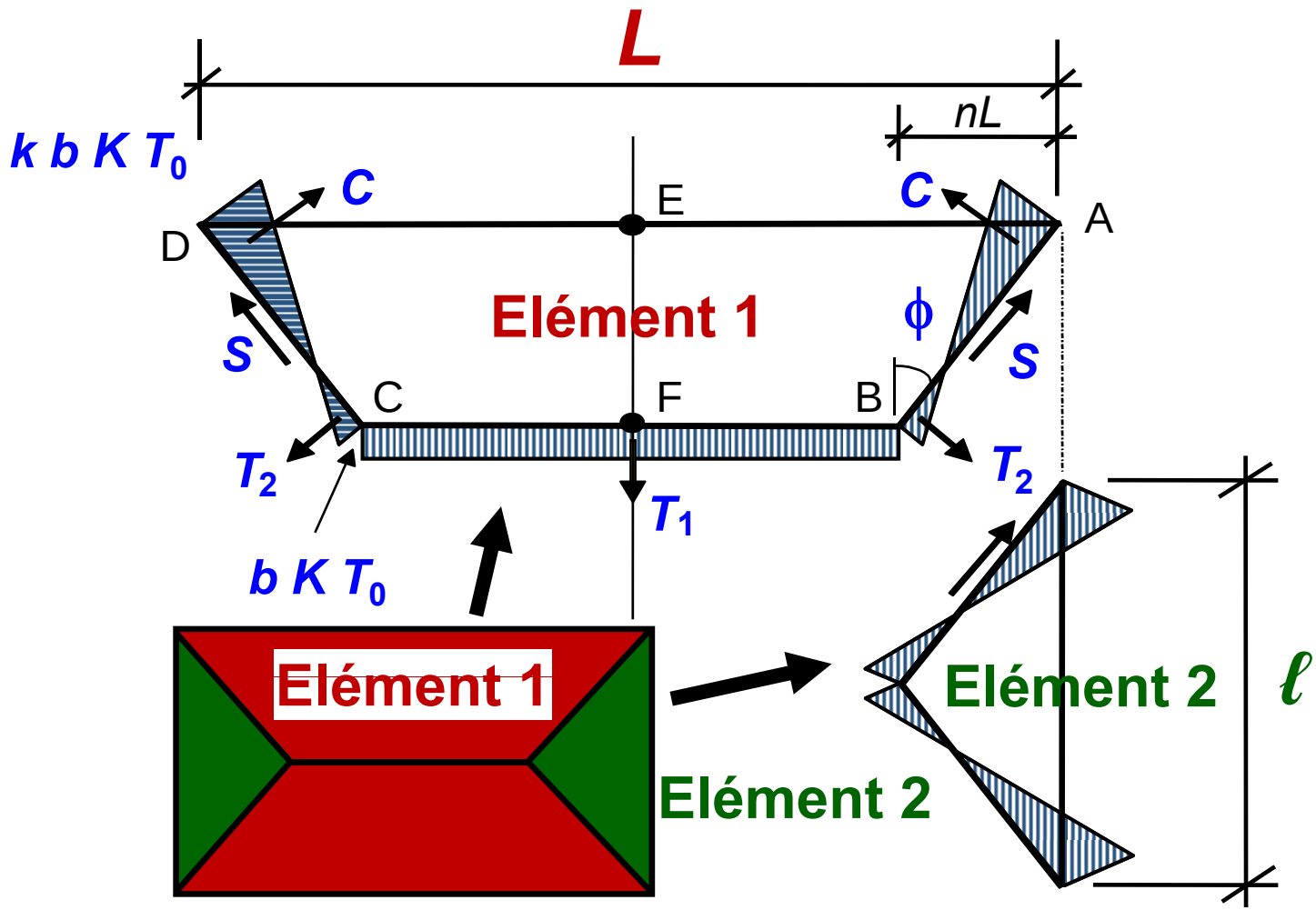
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Modèle de dalle**
  - Effet membrane augmentant la résistance selon la théorie des lignes de rupture



Méthode de calcul simplifée des dalles à en béton armé à 20 °C

- **Efforts membranaires le long des lignes de rupture (1)**



Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

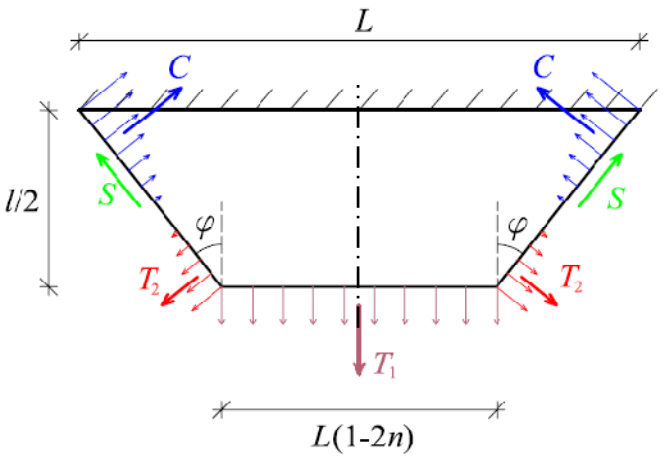
Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Efforts membranaires le long des lignes de rupture (2)**

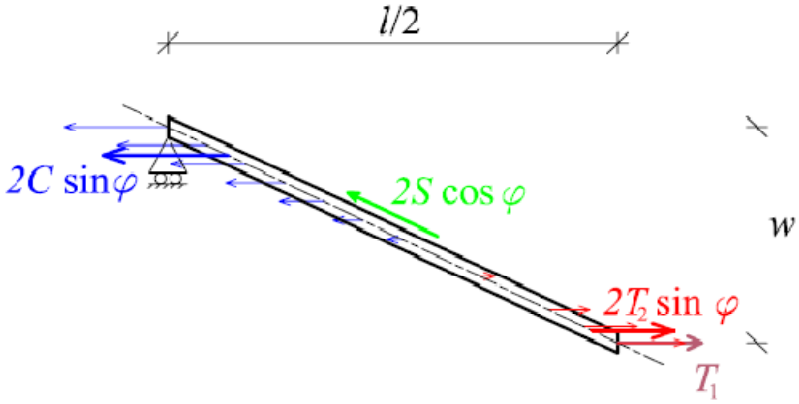
k*, *b	sont des paramètres définissant l'amplitudes des efforts membranaires,
n	est un facteur déduit de la théorie des lignes de rupture,
K	est le ratio du ferraillage de la plus petite dimension de la zone de calcul sur le ferraillage de la plus grande dimension,
KT_0	est la résistance du treillis soudé par unité de largeur,
T_1, T_2, ***C*, *S***	sont les efforts membranaires résultants le long des lignes de rupture.

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Contribution de l'effet membrane (1)**
  - **Elément 1**



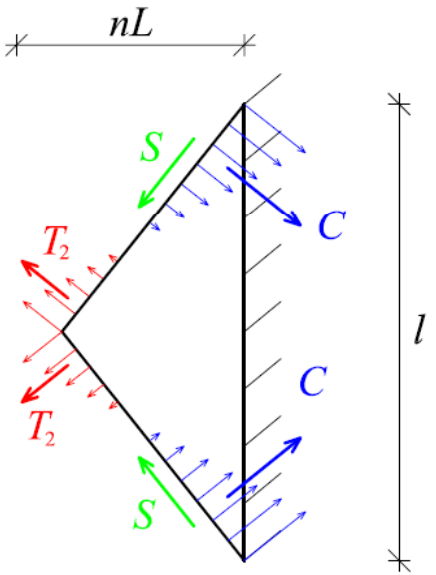
Vue en plan des efforts membranaires résultants



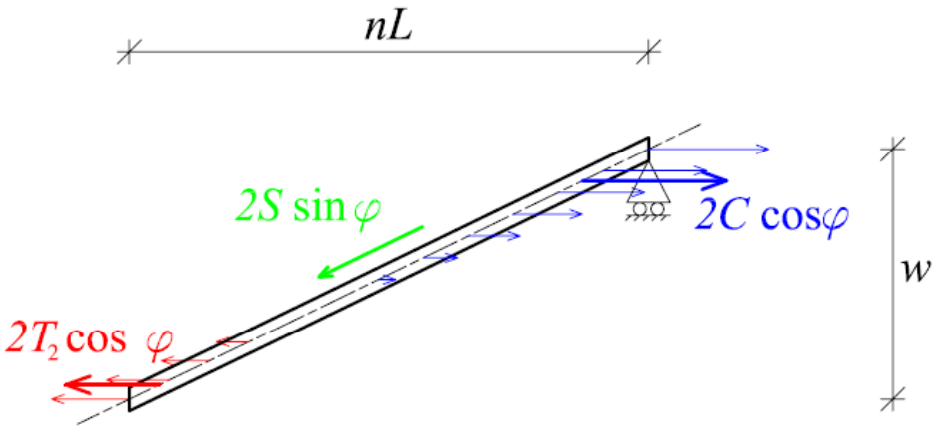
Vue latérale des efforts membranaires sous une flèche *w*

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Contribution de l'effet membrane (2)**
  - **Elément 2**



Vue en plan des efforts membranaires résultants



Vue latérale des efforts membranaires résultants sous une flèche *w*

- **Contribution de l'effet membrane (3)**
  - **Facteur de majoration pour chaque élément**

$e_{i,\ i=1,2}$ = { e_{im} : majoration due aux efforts membranaires sur l'élément i + e_{ib} : majoration due aux efforts plans sur la résistance en flexion.

  - **Majoration globale**

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2}$$

où :

μ est le coefficient d'orthotropie du ferraillage

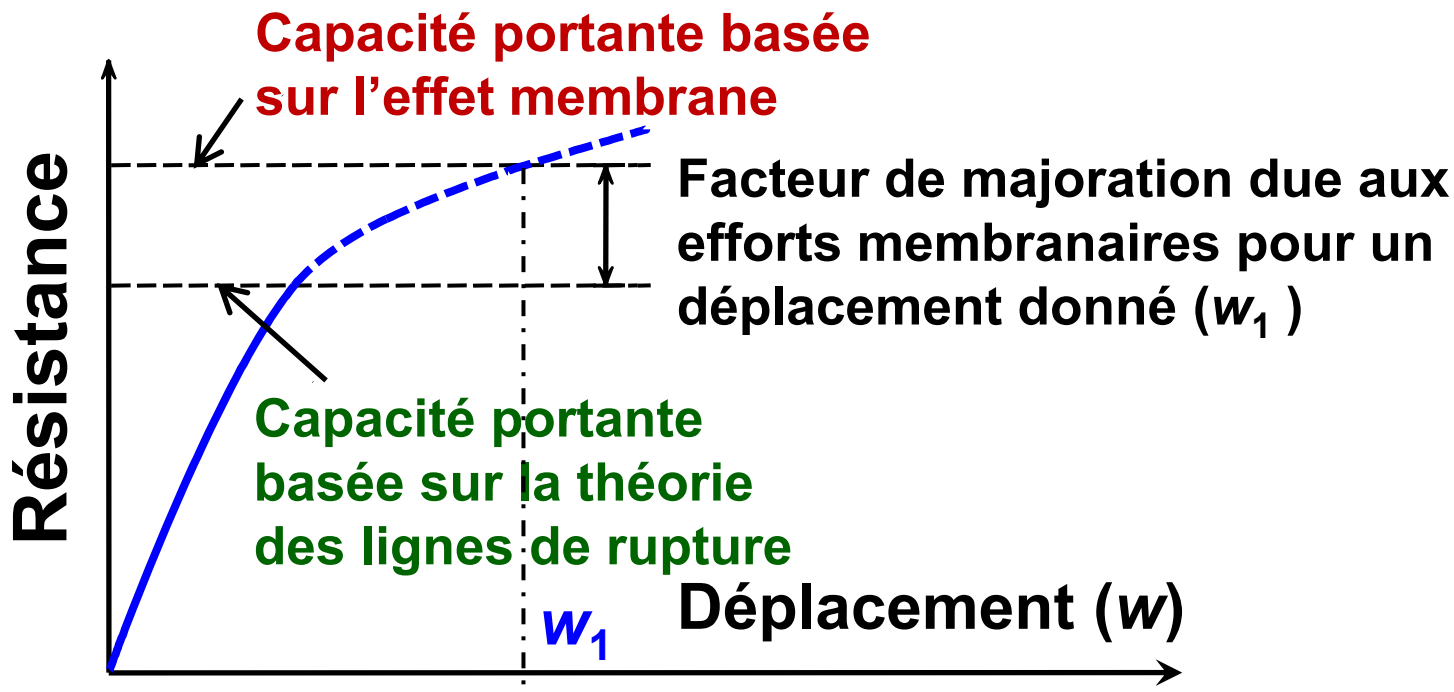
a est le ratio de longueur de la dalle = L/ℓ

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Contribution de l'effet membrane (4)**



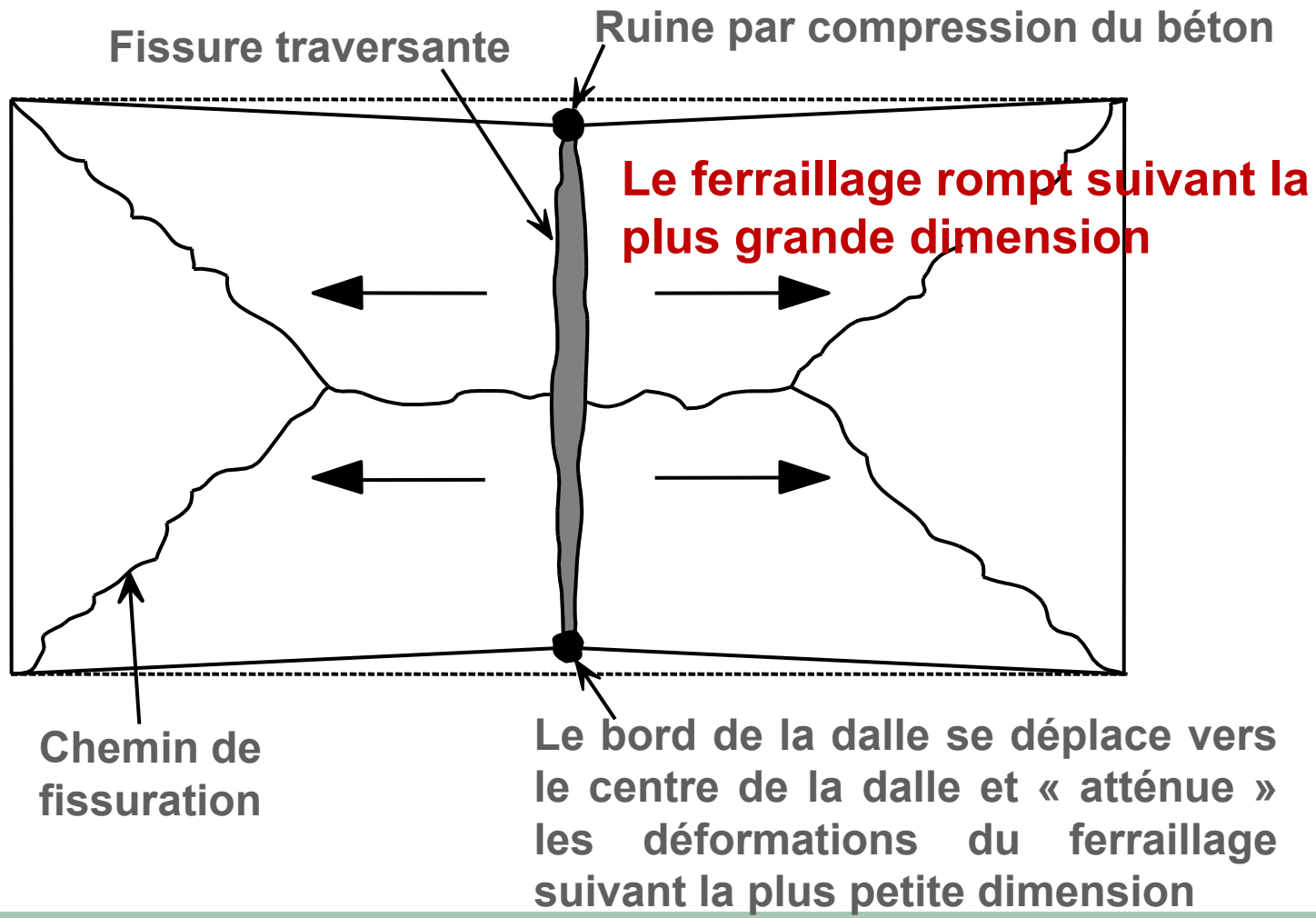
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

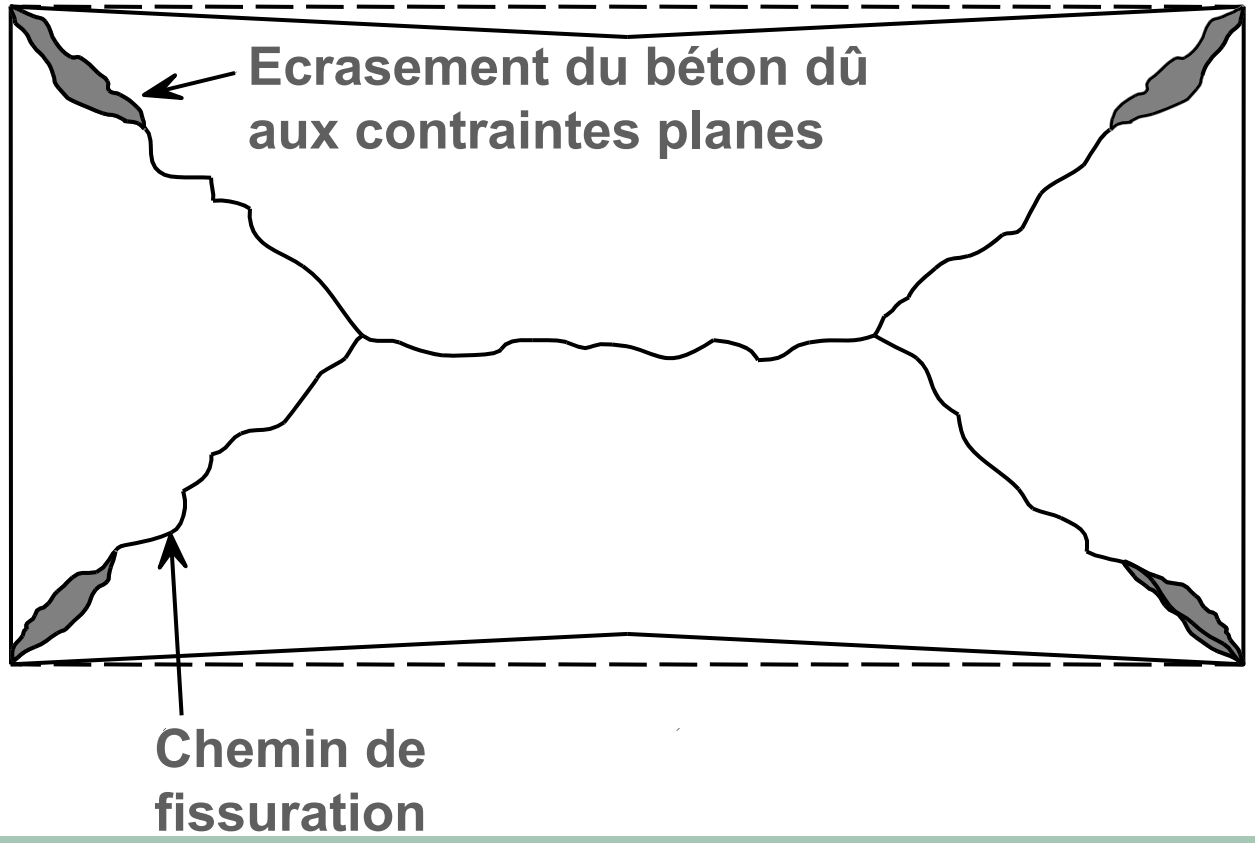
Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Modes de ruine** (rupture du ferraillage)



Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Modes de ruine** (écrasement du béton)
  - **Plus probable en cas de ferraillage important**



Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Modes de ruine** (preuves expérimentales)

Rupture du ferraillage (traction)

Ecrasement du béton (compression)

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Modèle de dalle à température élevée (1)**
  - **Sur la base du même modèle qu'à température normale**
  - **Prise en compte des effets de la température sur les propriétés des matériaux.**

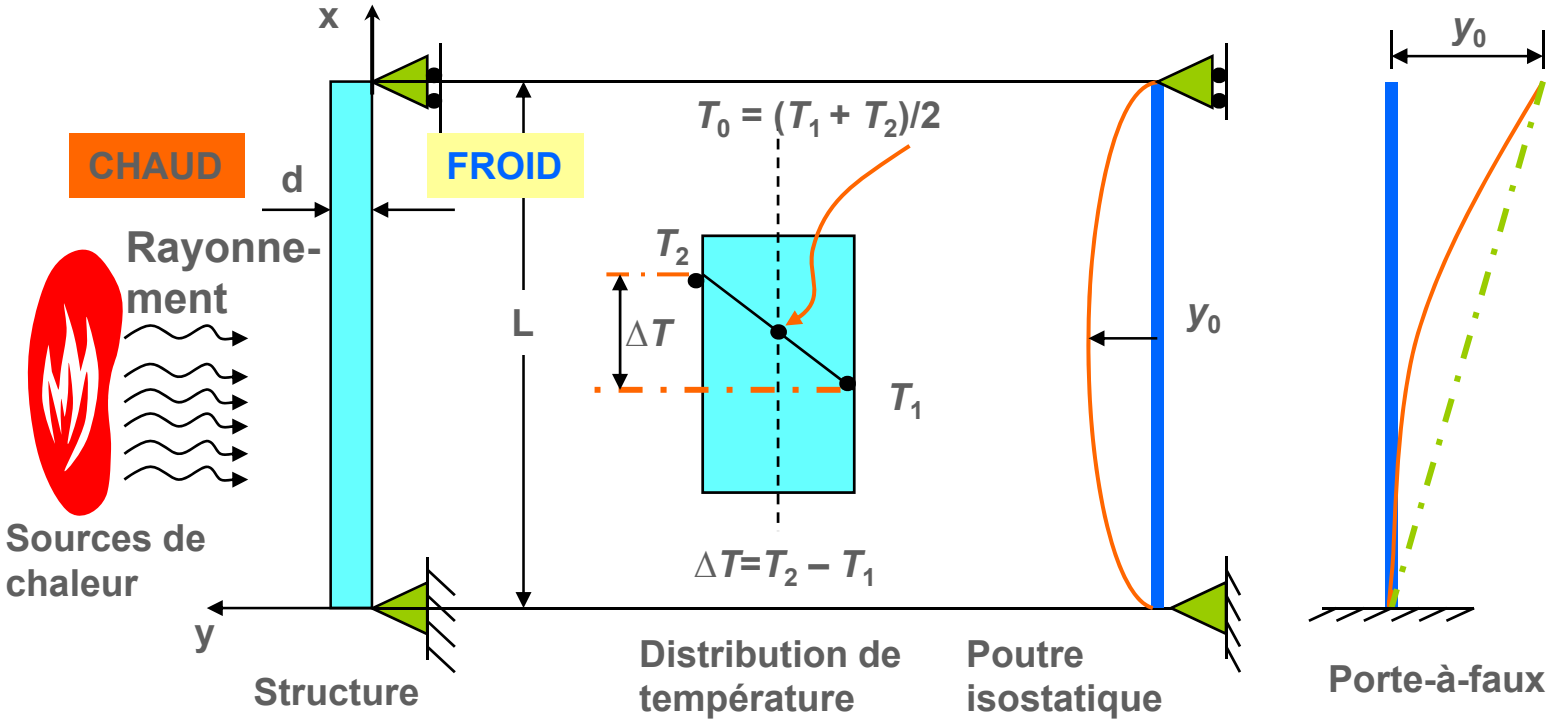
Méthode de calcul simplifiée à température élevée

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

Effet bilame d'une dalle en béton



Poutre isostatique $y_0 = \frac{\alpha L^2}{8}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$

Porte-à-faux $y_0 = \frac{\alpha L^2}{2}\frac{(T_2 - T_1)}{d}$

La courbure est due à la différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$ ou au gradient $\Delta T/d$

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

- **Modèle de dalle à température élevée (2)**
  - **Prise en compte de l'effet bilame de la dalle dû au gradient de température sur l'épaisseur :**

$$w_\theta = \frac{\alpha (T_2 - T_1) \ell^2}{19{,}2\ h}$$

où :

h est l'épaisseur efficace de la dalle

ℓ est la plus petite dimension de la zone de calcul

α est le coefficient de dilatation thermique du béton

Pour du béton léger, la valeur de l'EN 1994-1-2 est prise
α_{LC} **= 0,8 × 10^{-5} K^{-1}**

Pour du béton normal, une valeur sécuritaire est prise
α_{NC} **= 1,2 × 10^{-5} K^{-1} < 1,8 × 10^{-5} K^{-1}** (valeur de l'EN 1994-1-2)

T_2 est la température de la face inférieure de la dalle (côté exposé)

T_1 est la température de la face supérieure de la dalle (côté non exposé)

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

- **Modèle de dalle à température élevée (3)**
  - **Hypothèse : déformation mécanique moyenne pour une contrainte égale à la moitié de la limite d'élasticité à température normale**
  - **Flèche de la dalle basée sur une déformée parabolique de la dalle due au chargement transversal :**

$$w_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{0{,}5\, f_{sy}}{E_s}\right)\frac{3L^2}{8}} \leq \frac{\ell}{30}$$

où :

E_s est le module d'élasticité du ferraillage à 20°C

f_{sy} est la limite d'élasticité du ferraillage à 20°C

L est la plus grande dimension de la zone de calcul

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

- **Modèle de dalle à température élevée (4)**
  - **Ainsi, la flèche maximale de la dalle est :**

$$w = \frac{\alpha (T_2 - T_1)\ell^2}{19{,}2\ h} + \sqrt{\left(\frac{0{,}5\ f_{sy}}{E_s}\right)\frac{3L^2}{8}}$$

  - **Cependant, la flèche maximale de la dalle est limitée à :**

$$w < \frac{\alpha \left(T_2 - T_1\right) l^2}{19{,}2h} \quad + \quad \ell / 30$$

$$\boldsymbol{w \leq \frac{L + \ell}{30}}$$

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Aspect conservatif du modèle de dalle à température élevée**
  - **Le ferraillage au dessus des appuis est supposé rompre**
  - **Les déplacements verticaux dus à la courbure thermique sont sous-estimés par rapport aux valeurs théoriques**
  - **La courbure thermique est calculée à partir de la plus petite dimension de la zone de calcul**
  - **Tout déplacement vertical supplémentaire causé par la dilatation thermique empêchée lorsque la dalle est en phase post-critique est ignoré**
  - **Toute contribution du bac acier est ignorée**
  - **L'augmentation de la ductilité du treillis liée à l'échauffement est ignorée**

Méthode de calcul simplifée à température élevée

- **Capacité portante du modèle de dalle augmentée en présence de poutres en acier non protégées (1)**
  - **L'effet de chaînette des poutres non protégées est négligé**
  - **La résistance en flexion des poutres non protégées est prise en compte avec les hypothèses suivantes :**

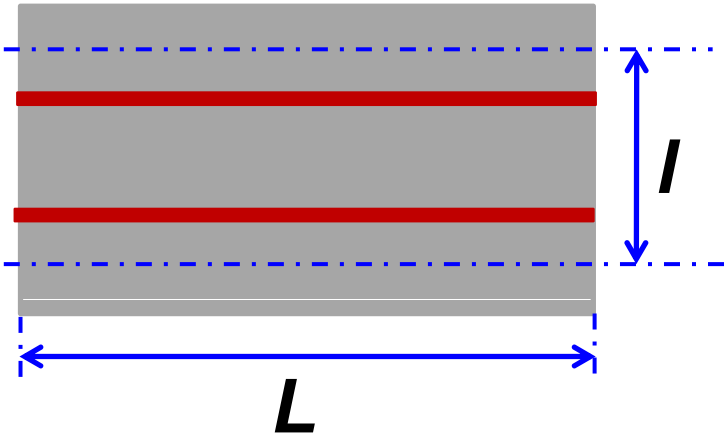
    Appui simple aux deux extrémités

    Echauffement de la section transversale en acier calculé selon l'EN1994-1-2 4.3.4.2, considérant un effet d'ombre

    Propriétés thermiques et mécaniques de l'acier et du béton données dans l'EN 1994-1-2

- **Capacité portante de la dalle augmentée en présence de poutres non protégées (2)**
  - **L'augmentation de la capacité portante due aux poutres non protégées est :**

$$\frac{8M_{fi,Rd}}{L^2}\frac{1+n_{ub}}{\ell}$$



où :

n_{ub} est le nombre de poutres non protégées

$M_{fi,Rd}$ est le moment résistant de chaque poutre non protégée

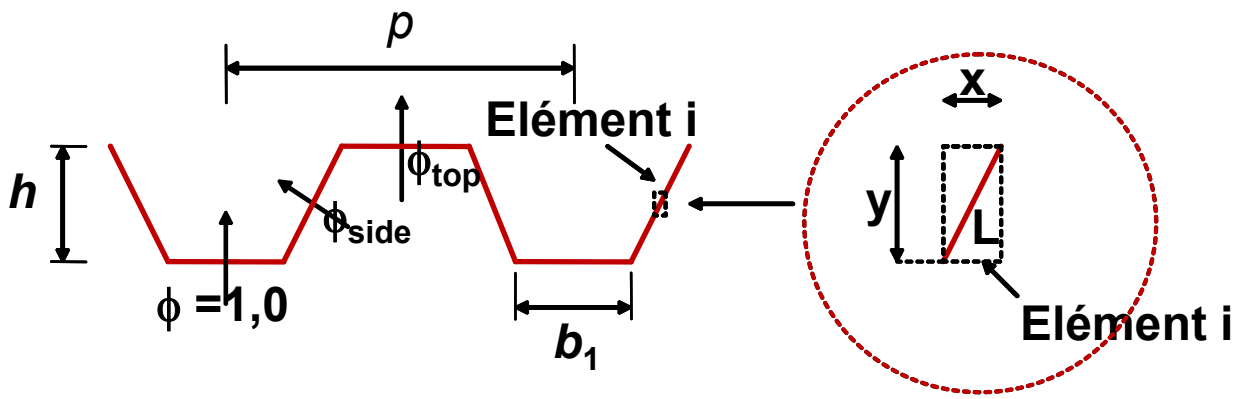
Méthode de calcul simplifée à température élevée

- **Calcul de température de la dalle mixte**
  - **Basé sur des modèles de calcul avancés**

    Méthode des différences finies en mode bidimensionnel

    Propriétés thermiques selon l'Eurocode 4 partie 1-2 pour l'acier et le béton

    L'effet d'ombre est pris en compte pour les dalles mixtes



Méthode de calcul simplifée à température élevée

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

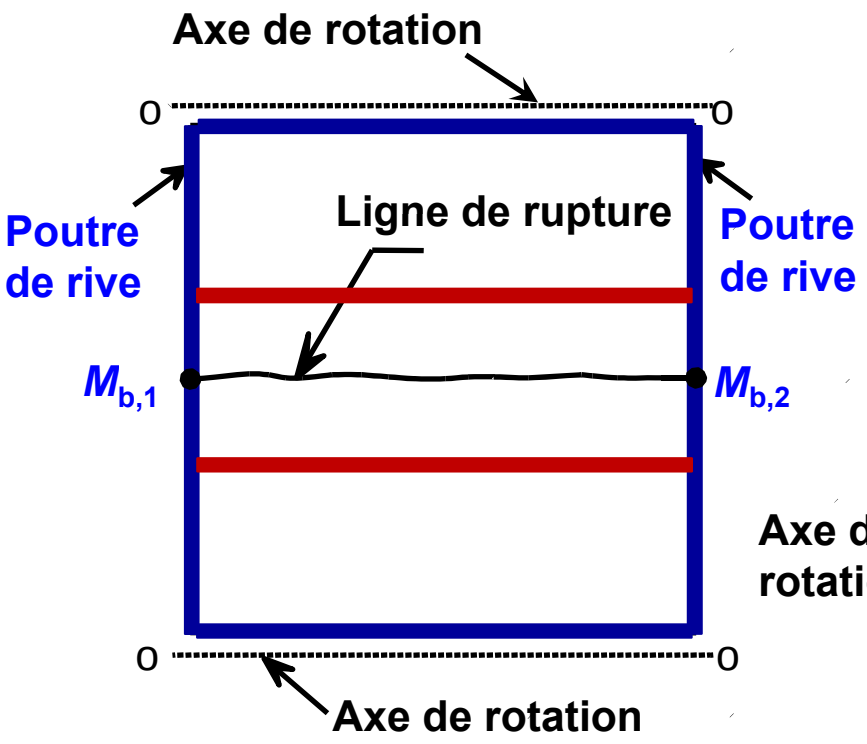
Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

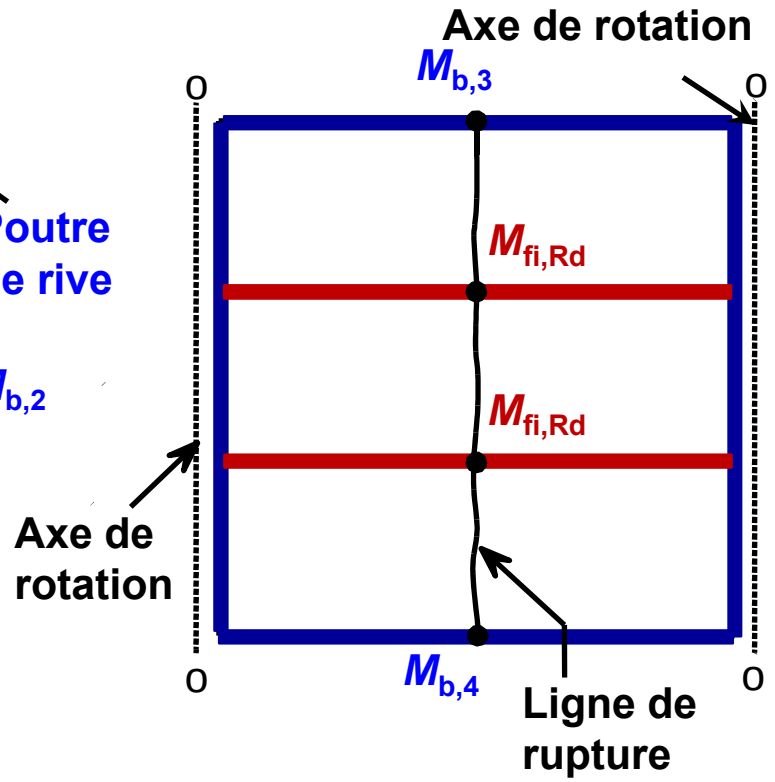
- **Capacité portante des poutres périphériques protégées**
  - **Mécanisme plastique global basé sur la résistance des poutres**
  - **Niveau de chargement en situation d'incendie**

    Charge additionnelle sur les poutres protégées
  - **Méthode de calcul simplifiée de la température critique (EN 1994-1-2)**

Méthode de calcul simplifiée à température élevée

- **Capacité portante des poutres périphériques protégées basée sur un mécanisme plastique global**





Validation par rapport à des données expérimentales

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

7 essais de Cardington en grandeur réelle

1 essai du BRE en grandeur réelle (froid mais simulé pour l'incendie)

10 essais à froid menés dans les années 1960/1970

15 essais à échelle réduite menés par l'Université de Sheffield en 2004

44 essais à froid et à chaud à échelle réduite menés par l'Université de Manchester

Essais sous feu ISO FRACOF et COSSFIRE

Essai en grandeur réelle mené par l'Université d'Ulster en 2010.

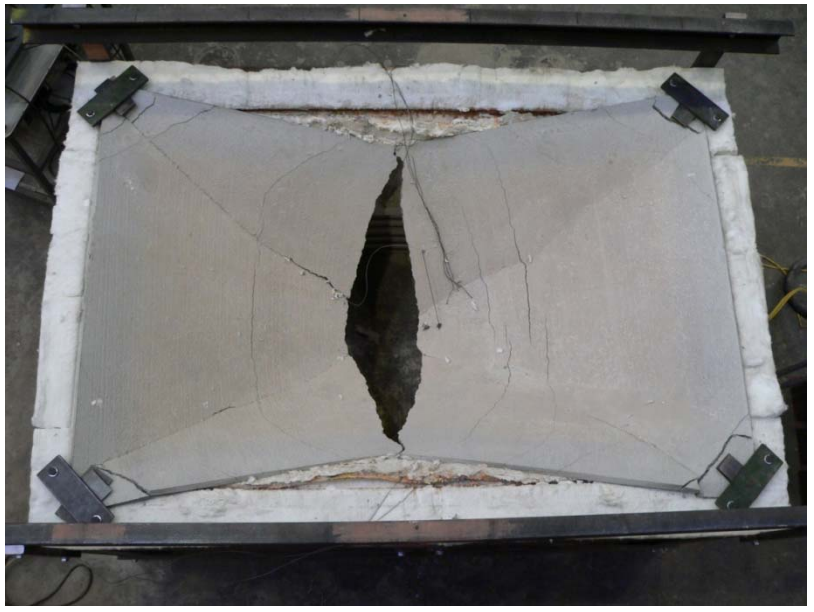
Comportement expérimental à échelle réduite et calcul de dalle en béton

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

22 essais à froid et 22 essais à chaud (ferraillage en acier doux et inoxydable)



Résultats obtenus en appliquant la méthodologie

Comportement mécanique des planchers mixtes

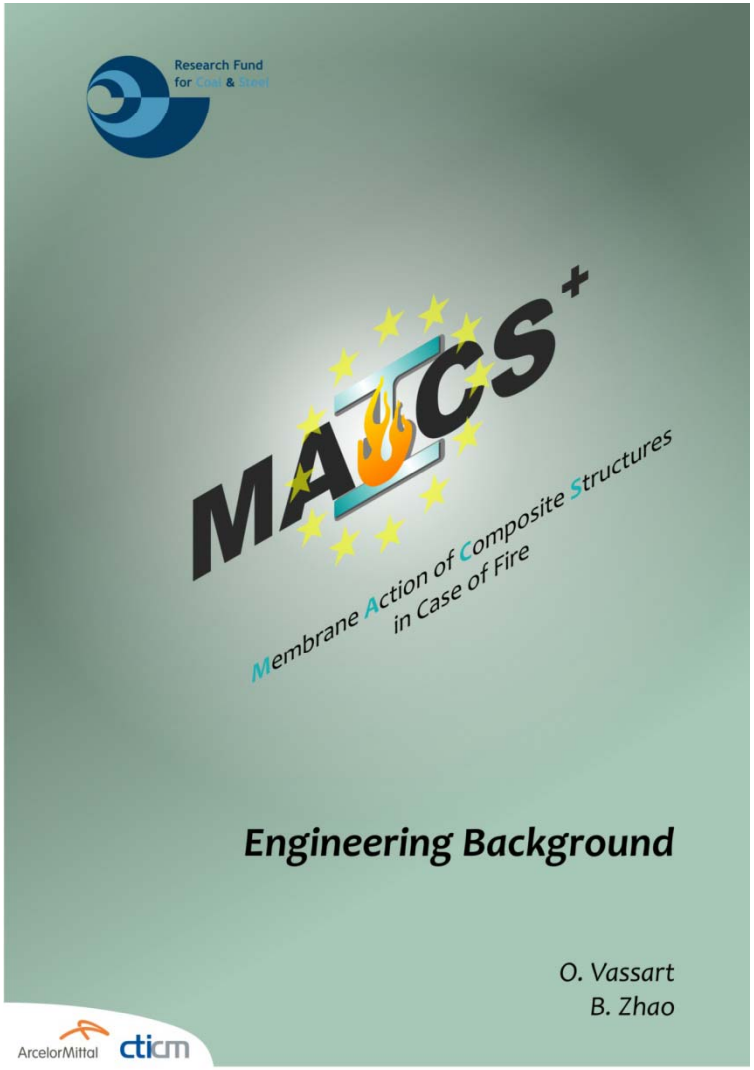
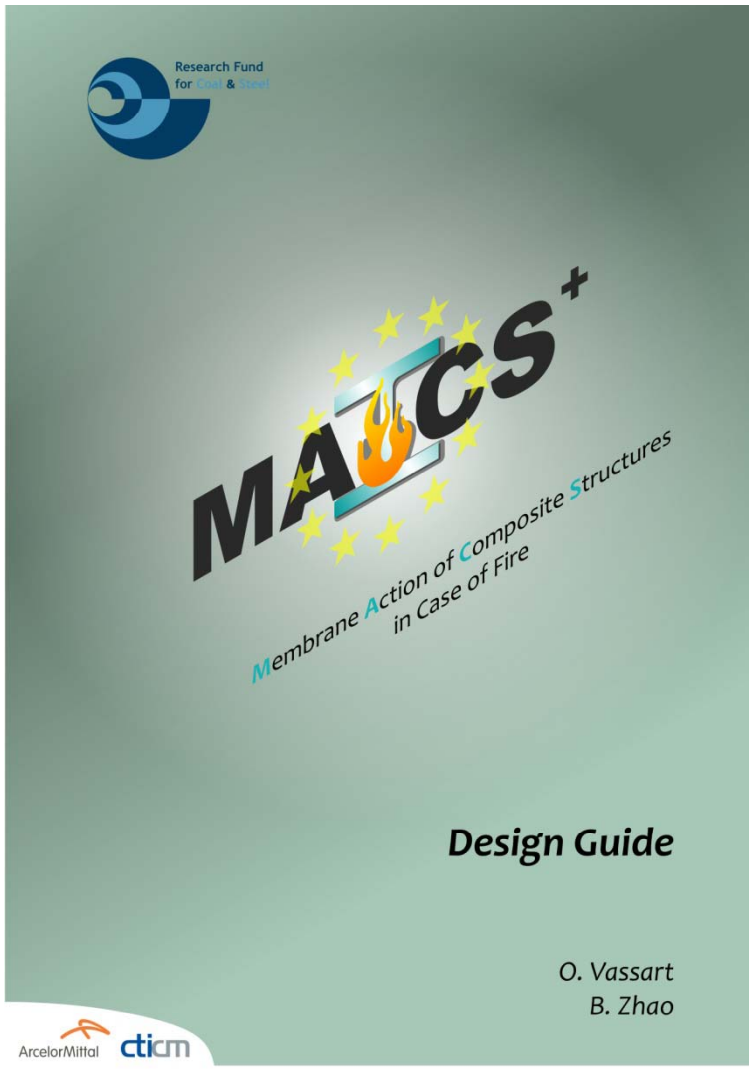
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

40 à 55% des poutres peuvent être non protégées en appliquant la protection où elle est nécessaire.

Documents disponibles

Comportement mécanique des planchers mixtes

Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées