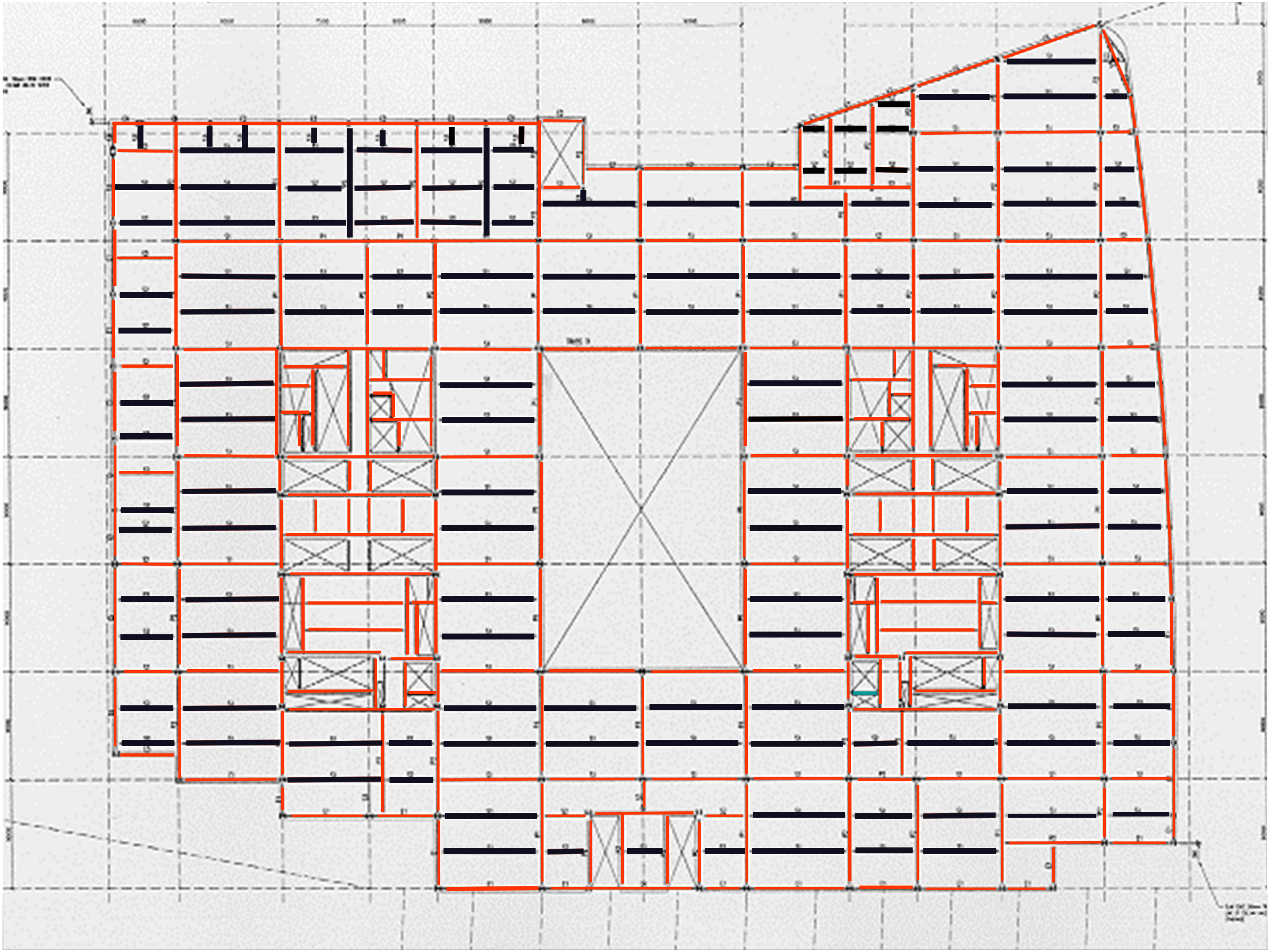
Research Fund
for Coal & Steel

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**

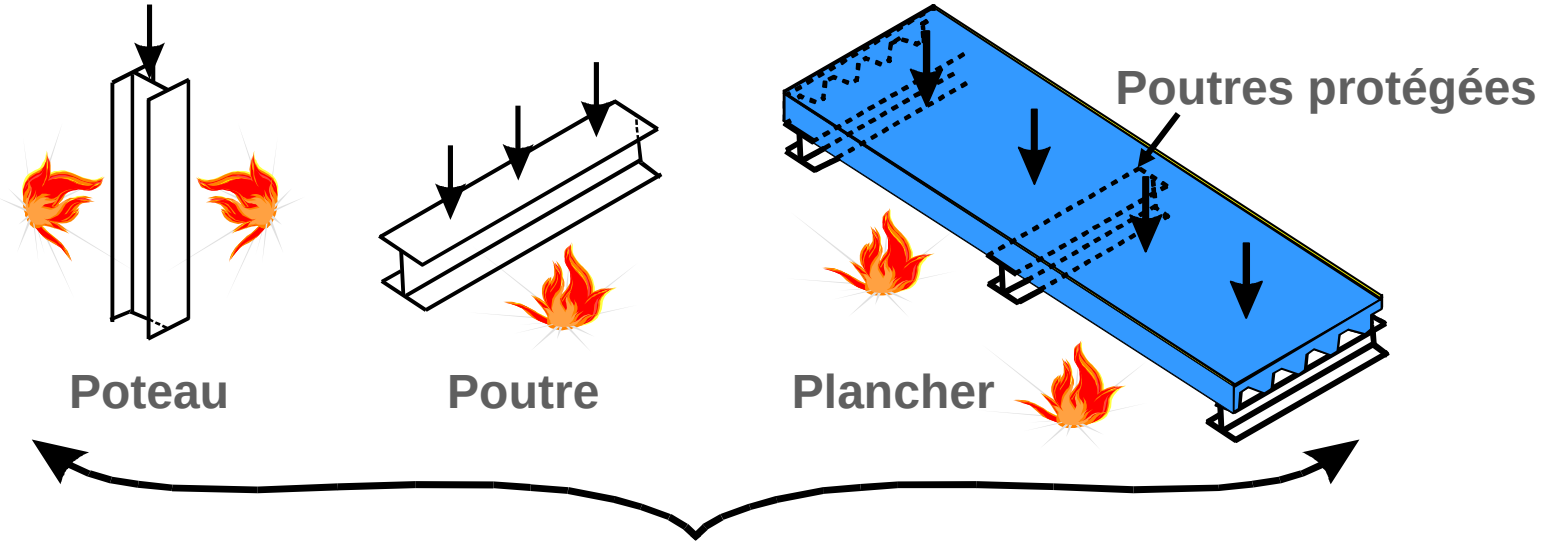
Comportement mécanique des planchers mixtes

Comportement mécanique des planchers mixtes

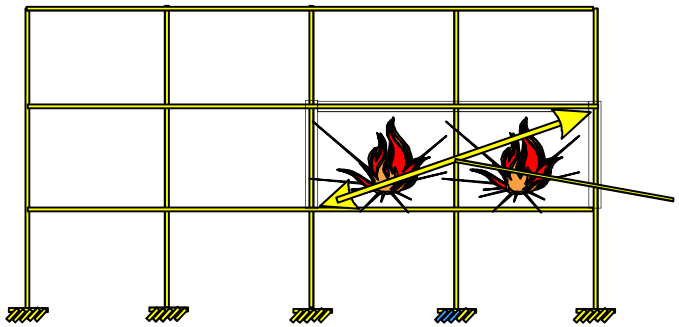
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

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



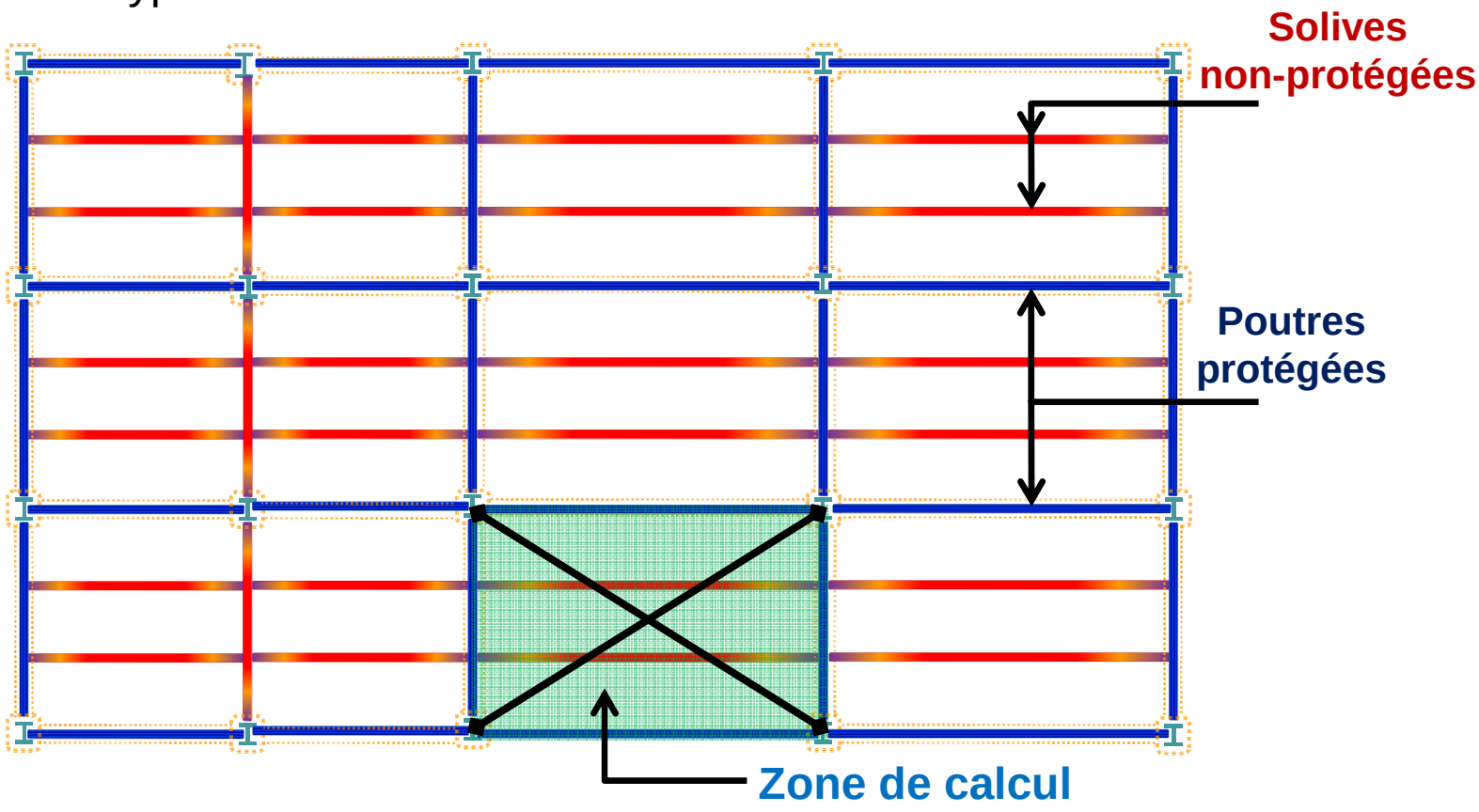
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

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

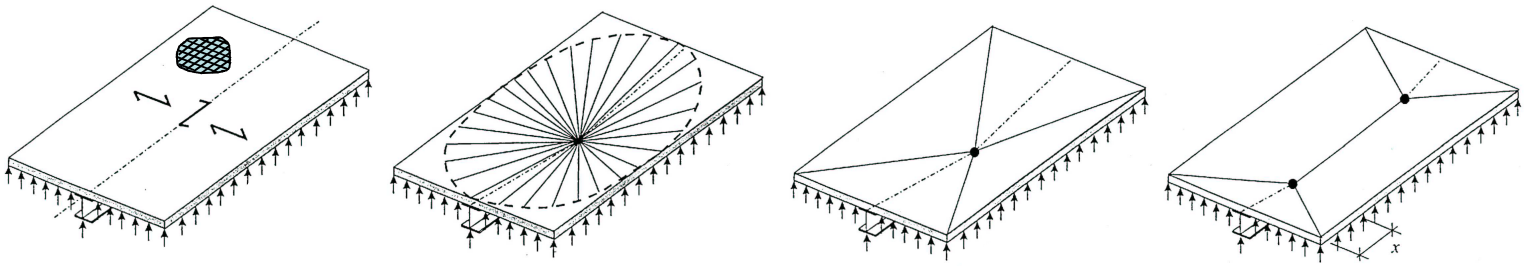
- **Modèle de dalle à 4 côtés maintenus verticalement** (lignes de rupture plastique) – sans maintien horizontal – hypothèse très conservative



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)

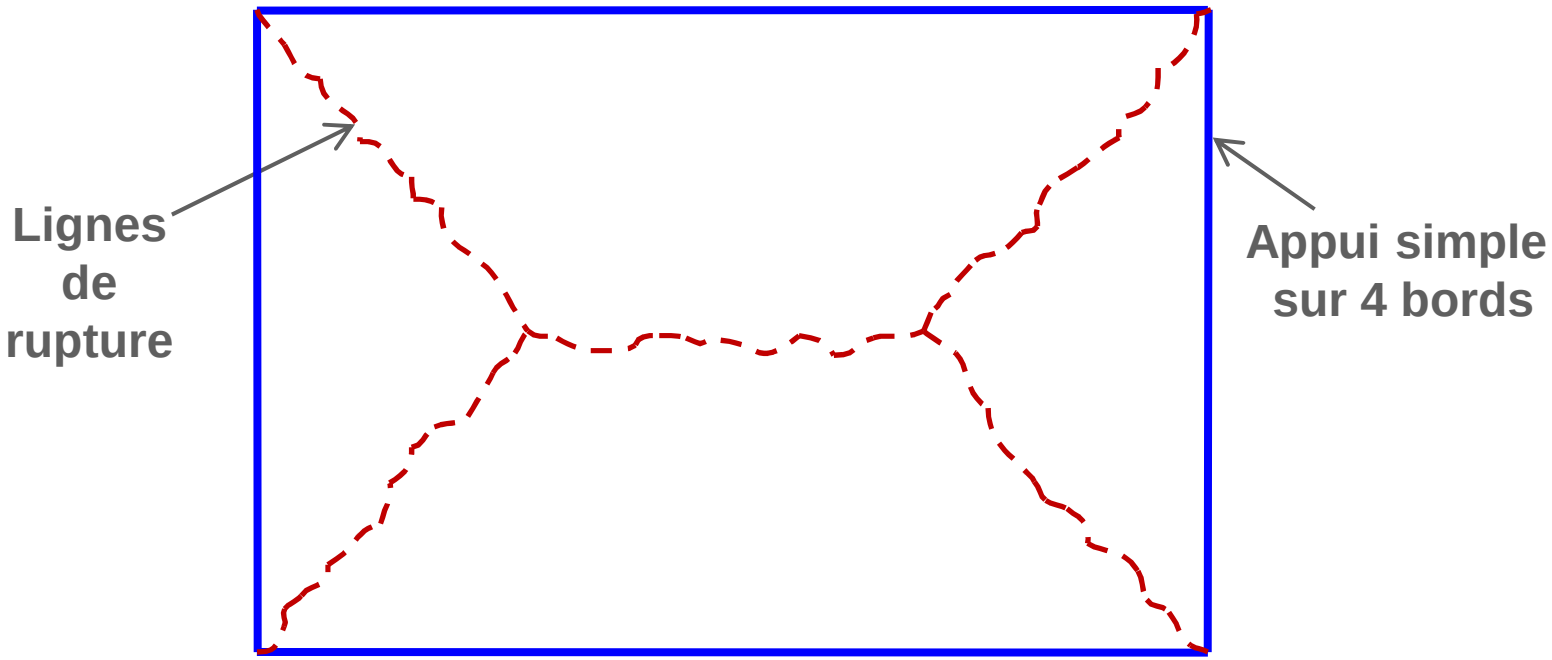
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

Comportement mécanique des planchers mixtes

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

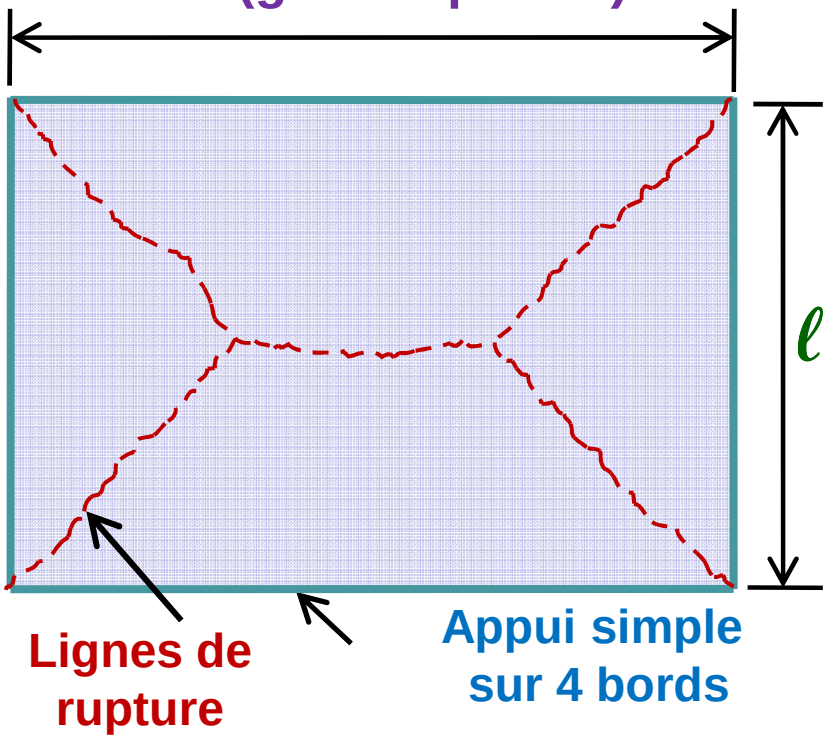
Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

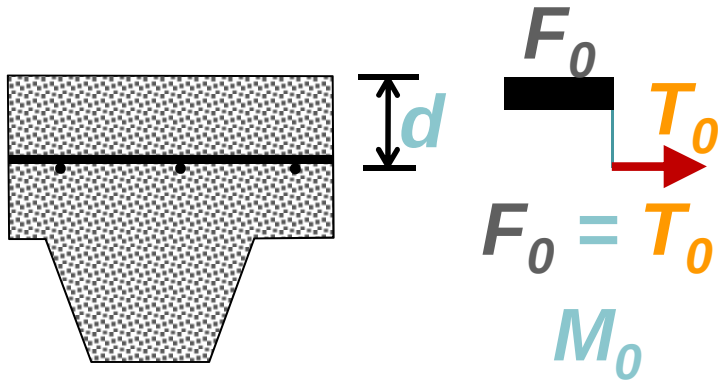
- **Modèle de dalle à 4 côtés maintenus verticalement** (lignes de rupture plastique) – sans maintien horizontal – hypothèse très conservative



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

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





$$p = \frac{6M_0}{n^2 a^2 \ell^2}$$

with

$a = L / \ell$

n: **paramétre de calcul**

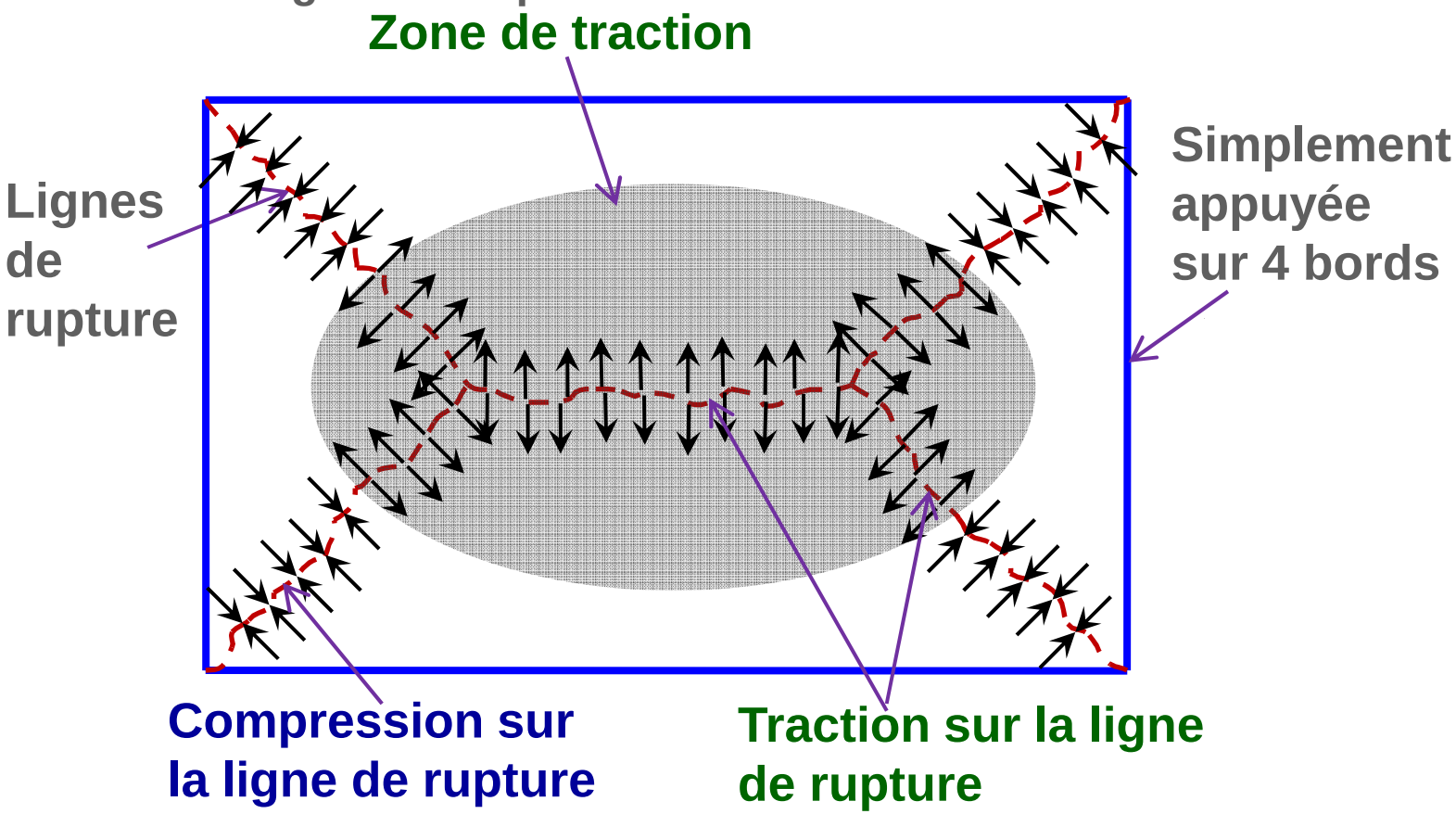
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

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**
  - **Effet de membrane augmentant la résistance basée sur les lignes de rupture**



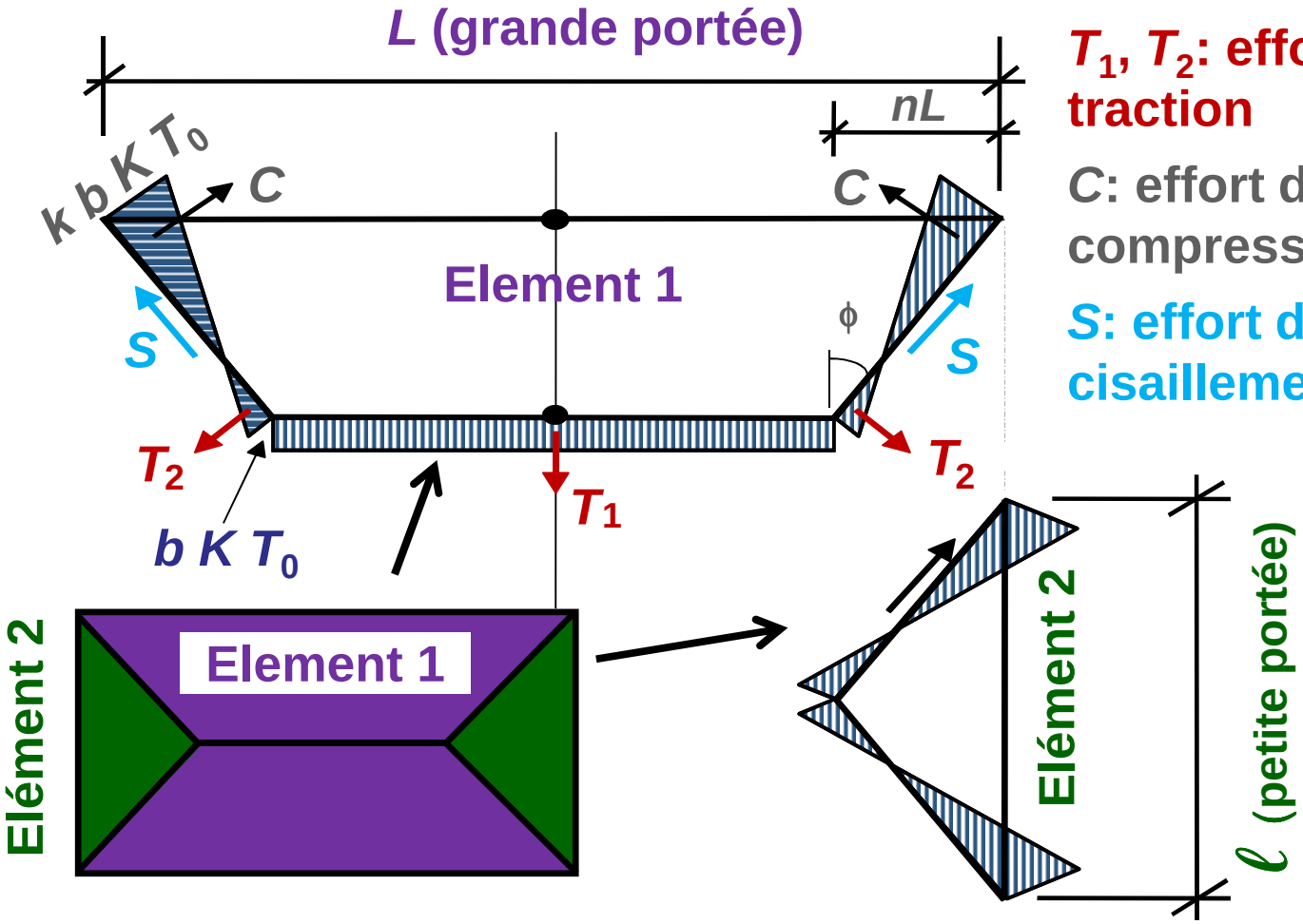
Méthode de calcul simplifiée des dalles à en béton armé à 20 °C

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

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



T_1, T_2: efforts de traction

C: effort de compression

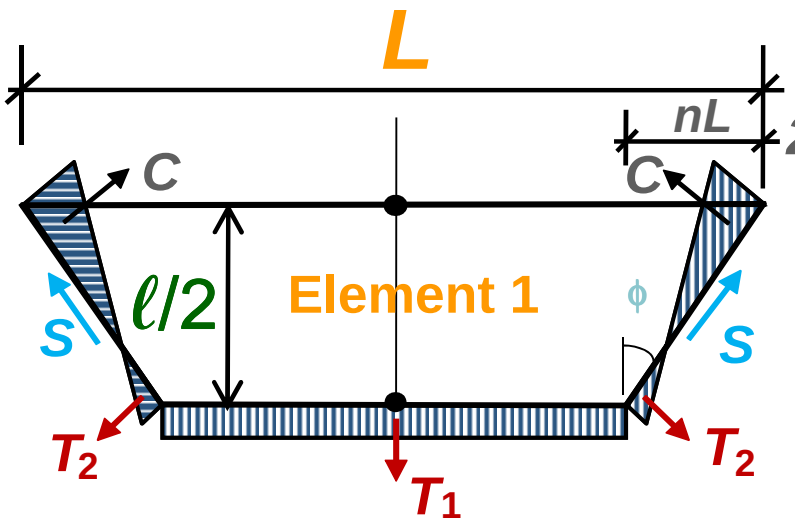
S: effort de cisaillement

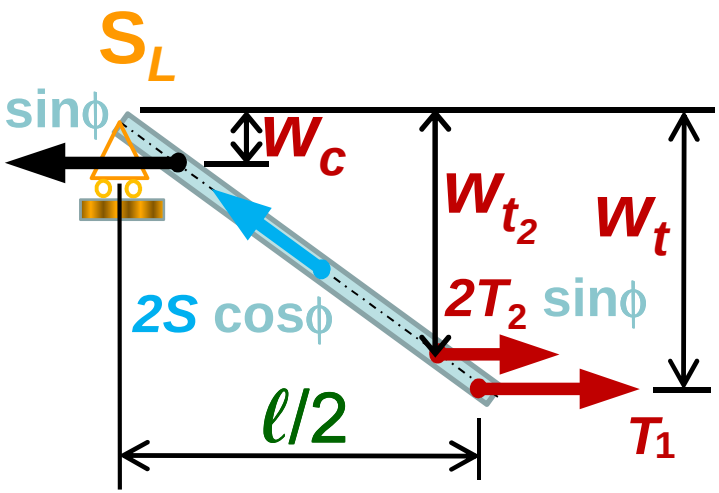
- **Efforts membranaires le long des lignes de rupture (2)**

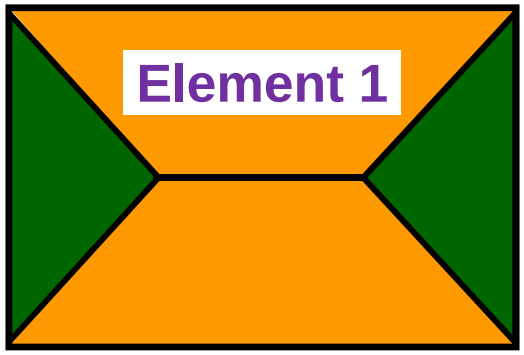
k*, *b	sont des paramètres définissant l'amplitudes des efforts membranaires,
n	est un facteur déduit de la théorie des lignes de rupture,
K	est le ratio du ferraillage de la plus petite dimension de la zone de calcul sur le ferraillage de la plus grande dimension,
KT_0	est la résistance du treillis 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 de membrane (1)**
  - **Elément 1 (résistance additionnelle)**







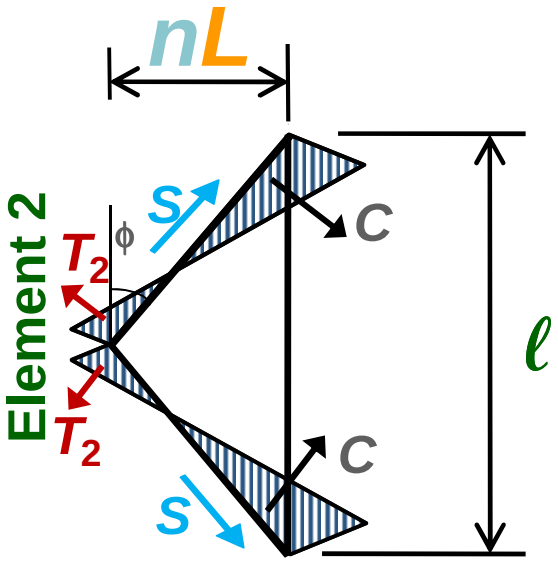
$$M_L = 2T_2 \sin\phi \times W_{t_2} + T_1 \times W_t$$

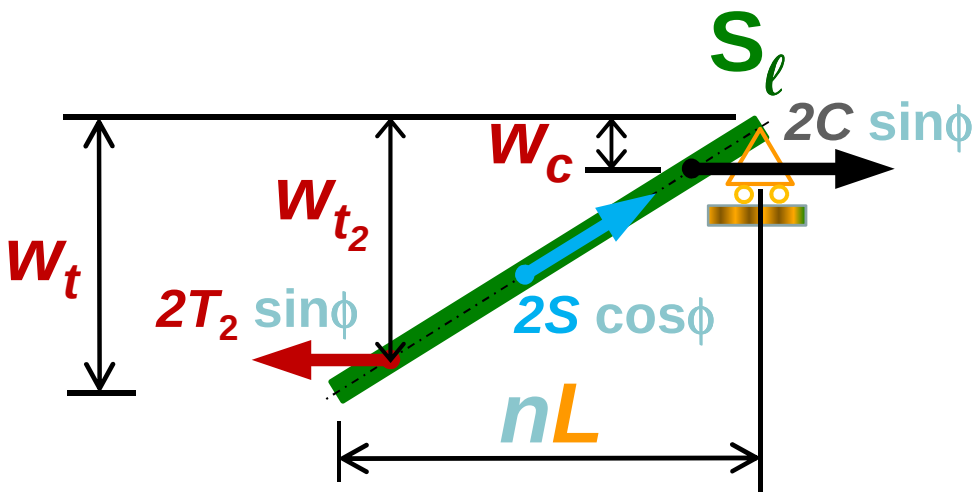
$$- 2C \sin\phi \times W_C$$

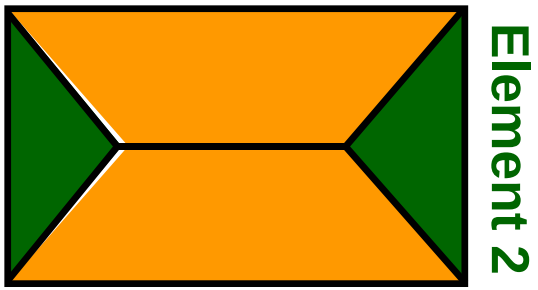
→ **Facteur de majoration : e_{1m}**

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

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





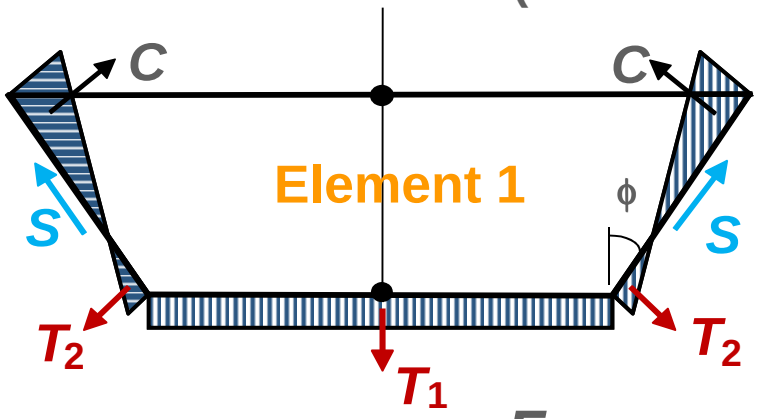


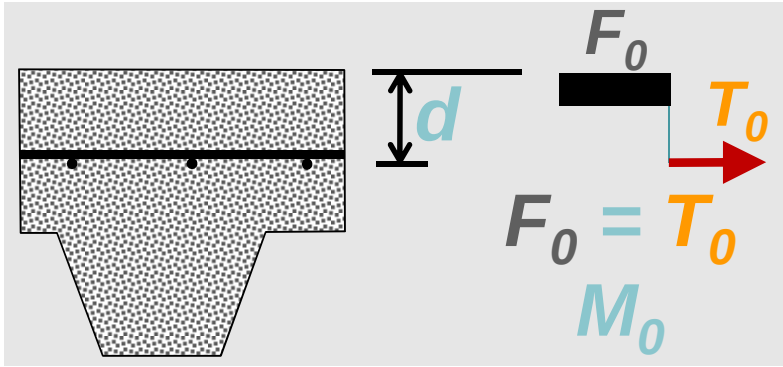
$$M_\ell = 2T_2 \sin\phi \times W_{t_2} - 2C \sin\phi \times W_C$$

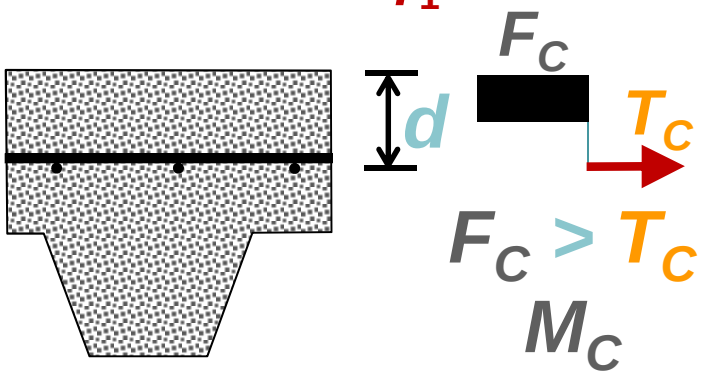
→ Facteur de majoration : e_{2m}

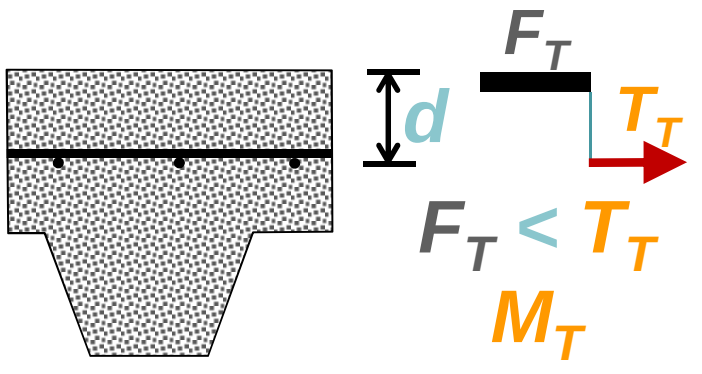
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

- **Contribution de l'effet de membrane (3)**
  - Elément 1 (modification des moments résistants)





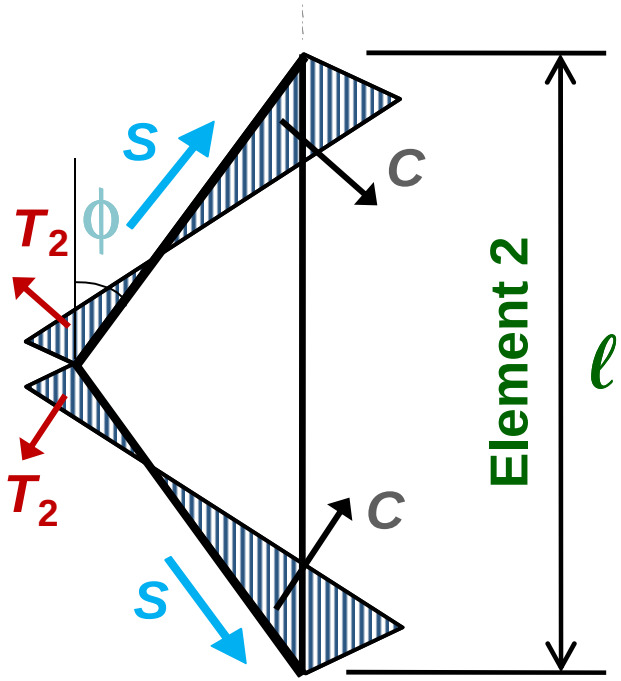


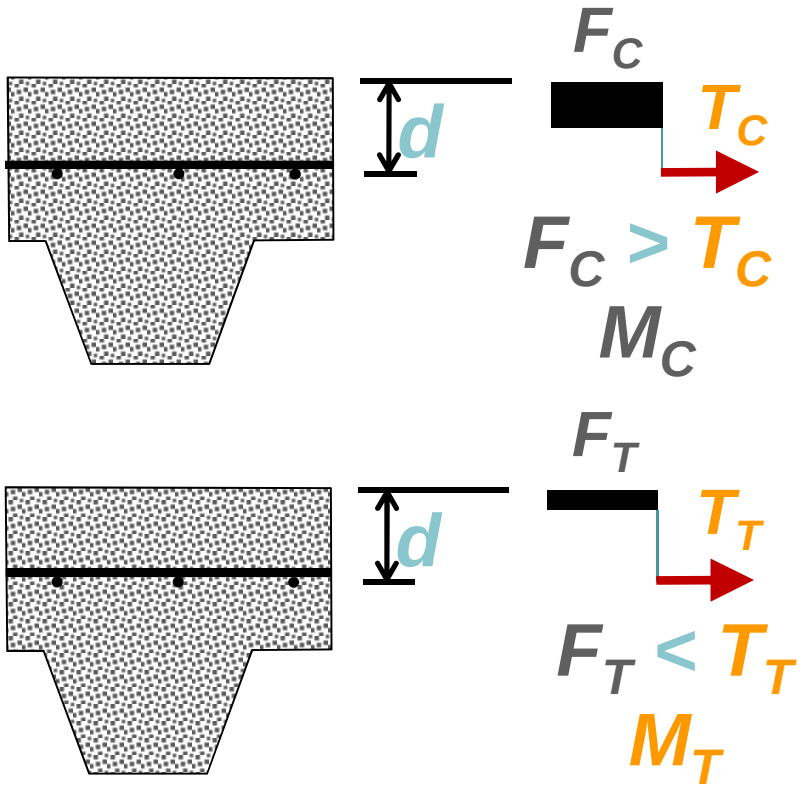


$M_C > M_0 > M_T$ ➡ **Facteur de modification : e_{1b}**

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

- **Contribution de l'effet de membrane (4)**
  - **Elément 2**





Facteur de modification : e_{2b}

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

- **Contribution de l'effet de membrane (5)**
  - **Facteur de majoration pour chaque élément**

$$e_{i,\ i=1,2} = (e_{im} + e_{ib})$$

avec :

e_{im} : majoration due aux efforts membranaires sur l'élément **i**

e_{ib} : modification due aux efforts plans sur les moments résistants

  - **Majoration globale**

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

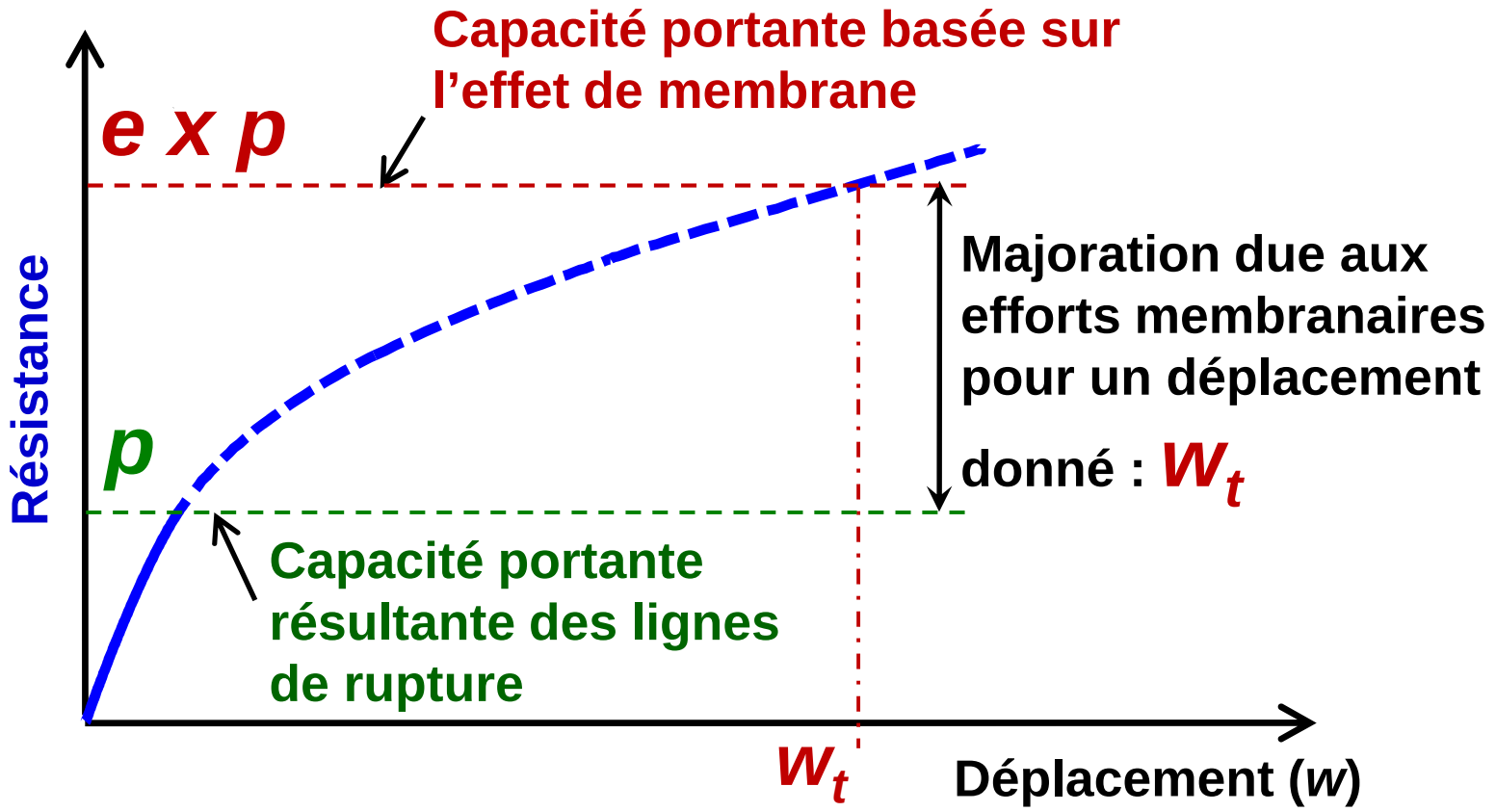
où :

μ est le coefficient d'orthotropie du ferraillage

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

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

- **Contribution de l'effet de membrane (6)**



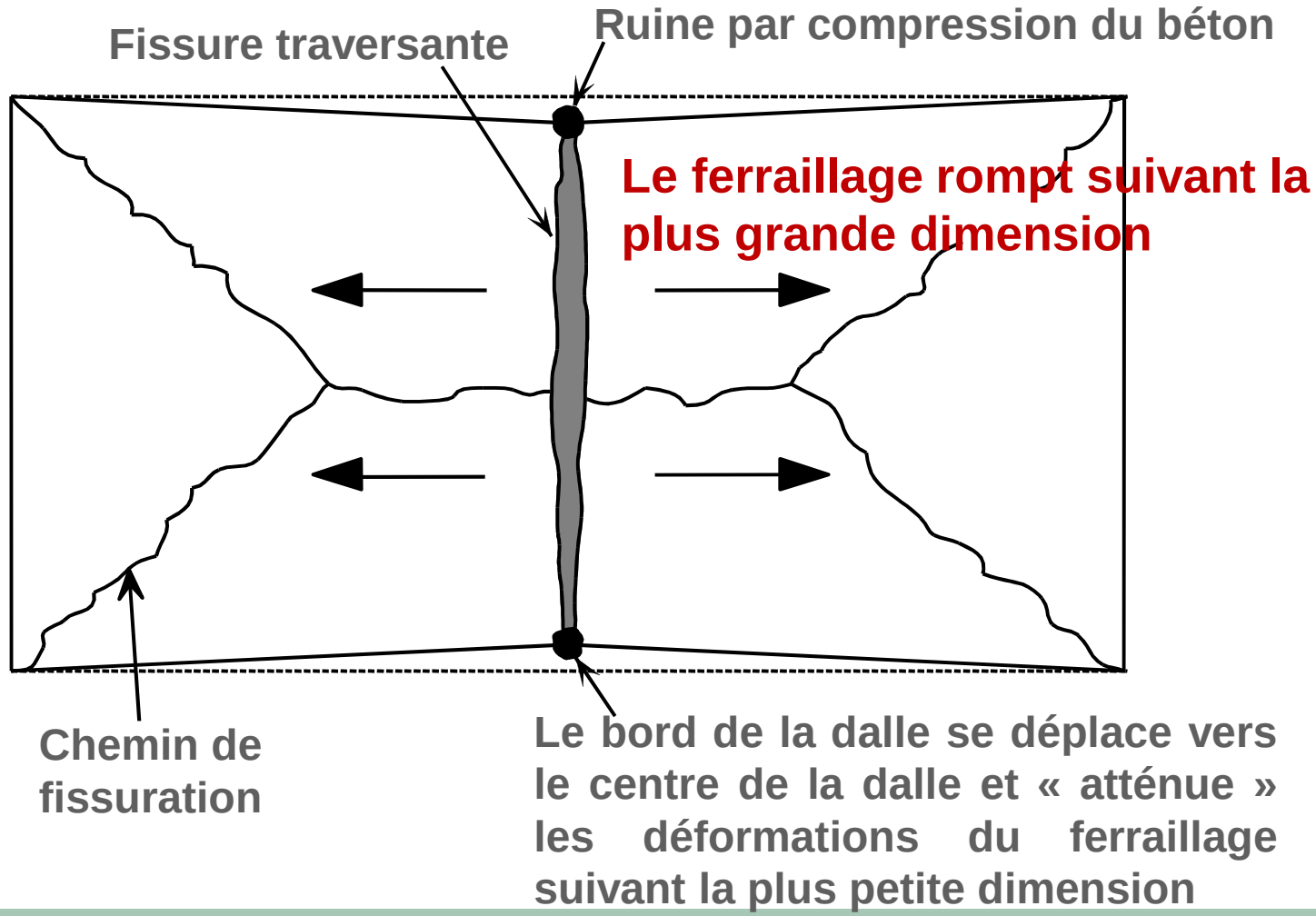
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

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)



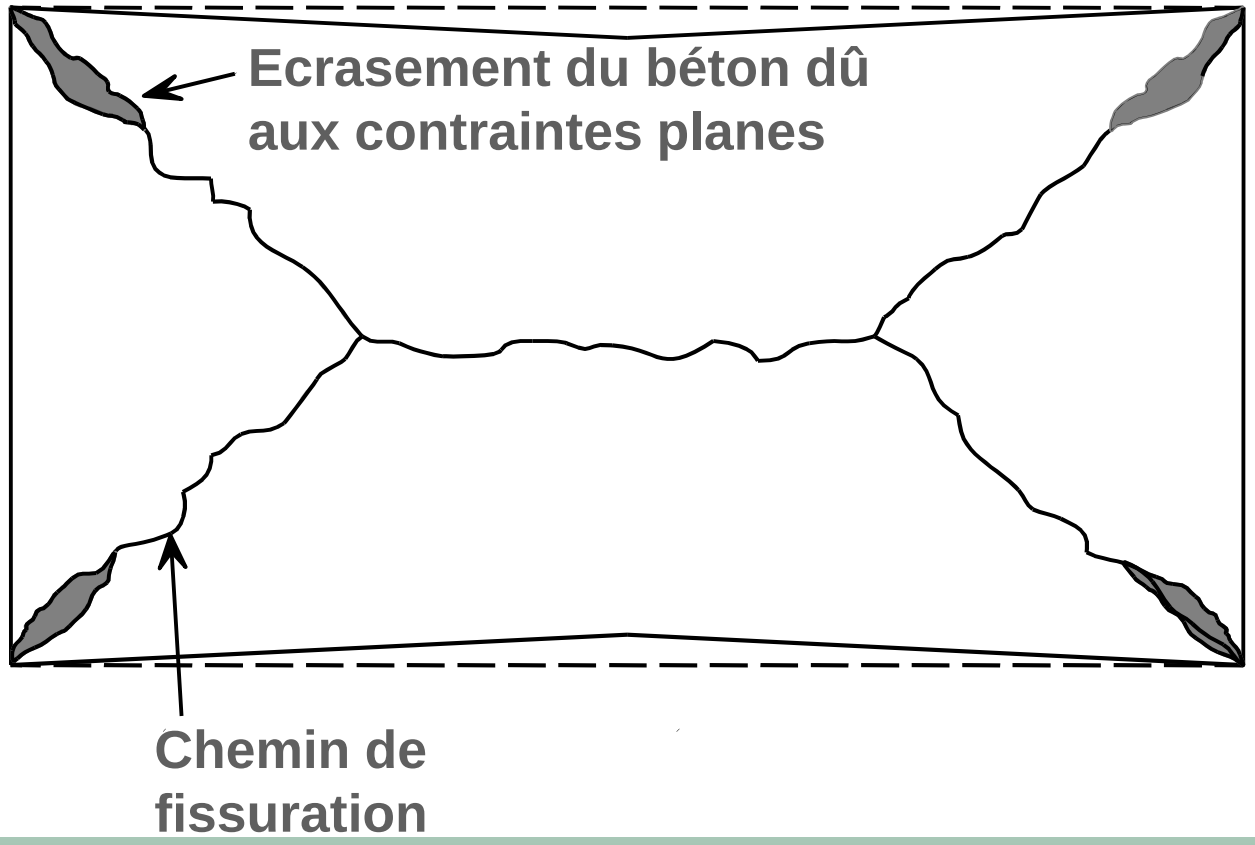
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20 °C

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** (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

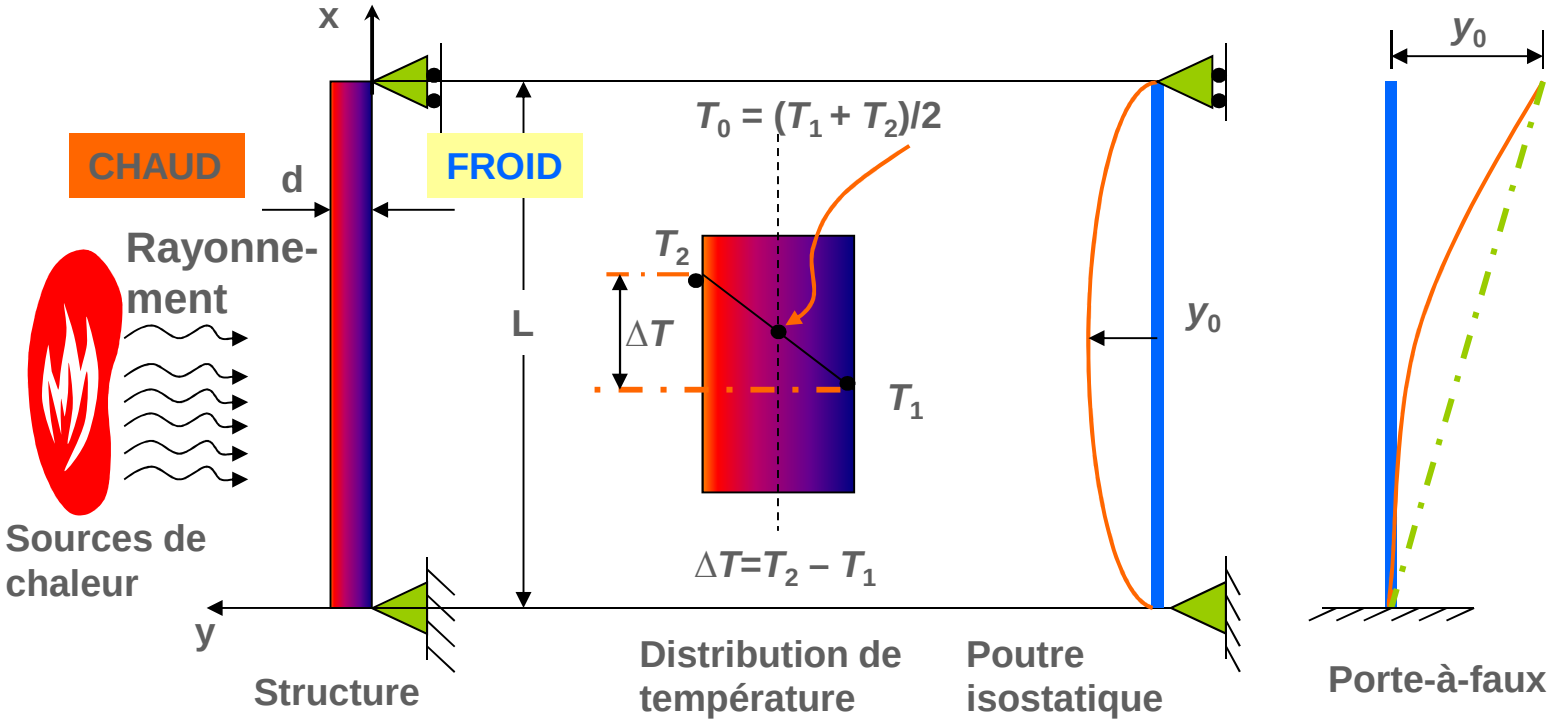
- **Modèle de dalle à température élevée (1)**
  - **Sur la base du même modèle qu'à température normale**
  - **Prise en compte des effets de la température sur les propriétés des matériaux.**

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 $\Delta T/d$

Effet bilame d'une dalle en béton

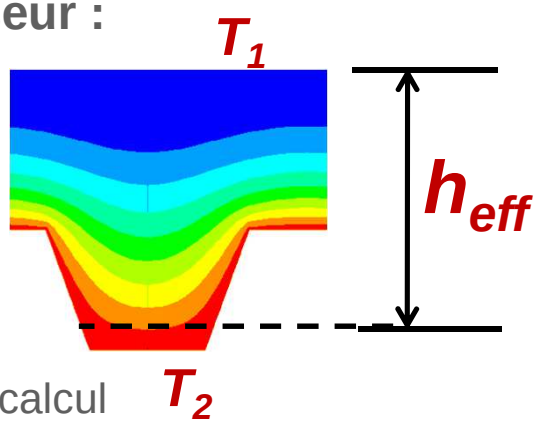
- **Dalle sur 4 appuis**
  - **Dénominateur empirique considérant :**
    - Un gradient de température non linéaire
    - Un matériau (béton) non élastique
    - Un matériau dont les propriétés mécaniques se dégradent avec l'augmentation de la température
      - **Le béton LC se dégradant moins vite que le béton NC, le dénominateur appliqué au béton LC est inférieur à celui appliqué au béton NC**

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 :**

$$w_\theta = \frac{\alpha (T_2 - T_1) \ell^2}{\frac{1}{9,2} h_{eff}}$$

où :



h_{eff} 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

$\alpha_{LC} = 0,8 \times 10^{-5}\ K^{-1}$

Pour du béton normal, une valeur sécuritaire est prise

$\alpha_{NC} = 1,2 \times 10^{-5}\ K^{-1} < 1,8 \times 10^{-5}\ K^{-1}$ (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)

- **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

- **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 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

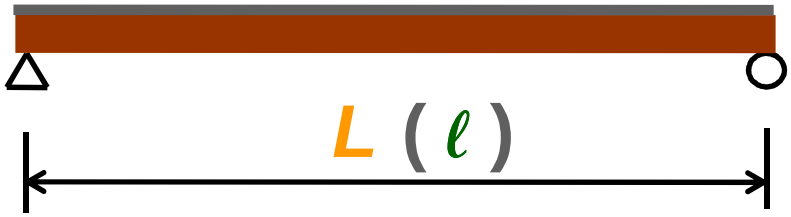
Méthode de calcul simplifiée à température élevée

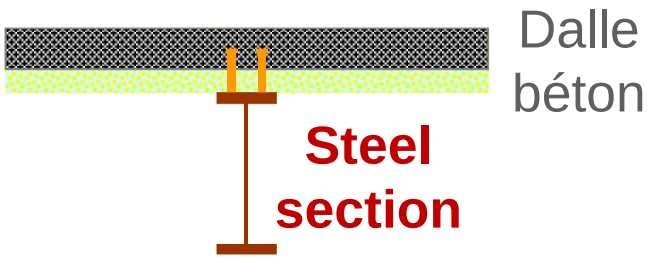
Comportement mécanique des planchers mixtes

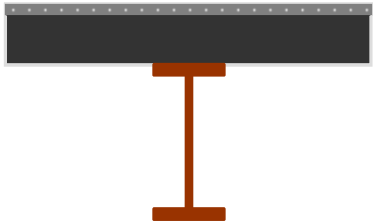
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

Méthode de calcul simplifiée des planchers mixtes à températures élevées

- **Contribution des solives non-protégées à température élevée selon la partie feu de l'Eurocde 4**

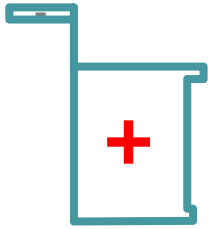




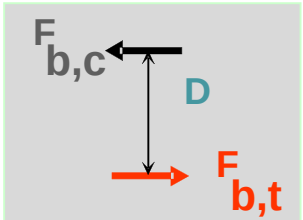


Solive mixte non-proétée

Distibution de température



Distribution de contrainte

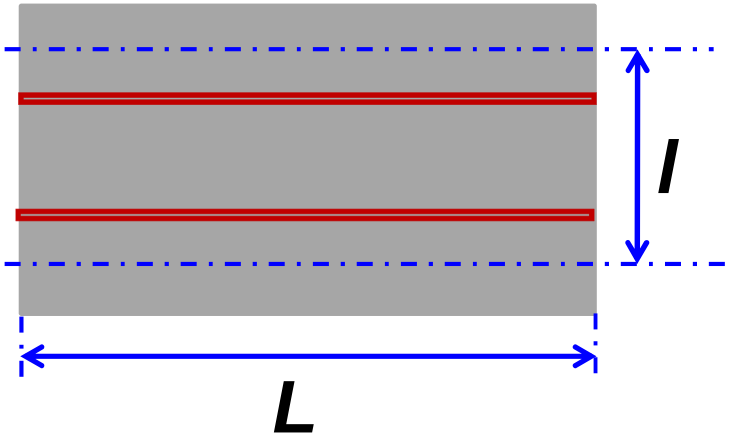


Moment résistant

$$M_{fi,Rd} = F_t \times D$$

- **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

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

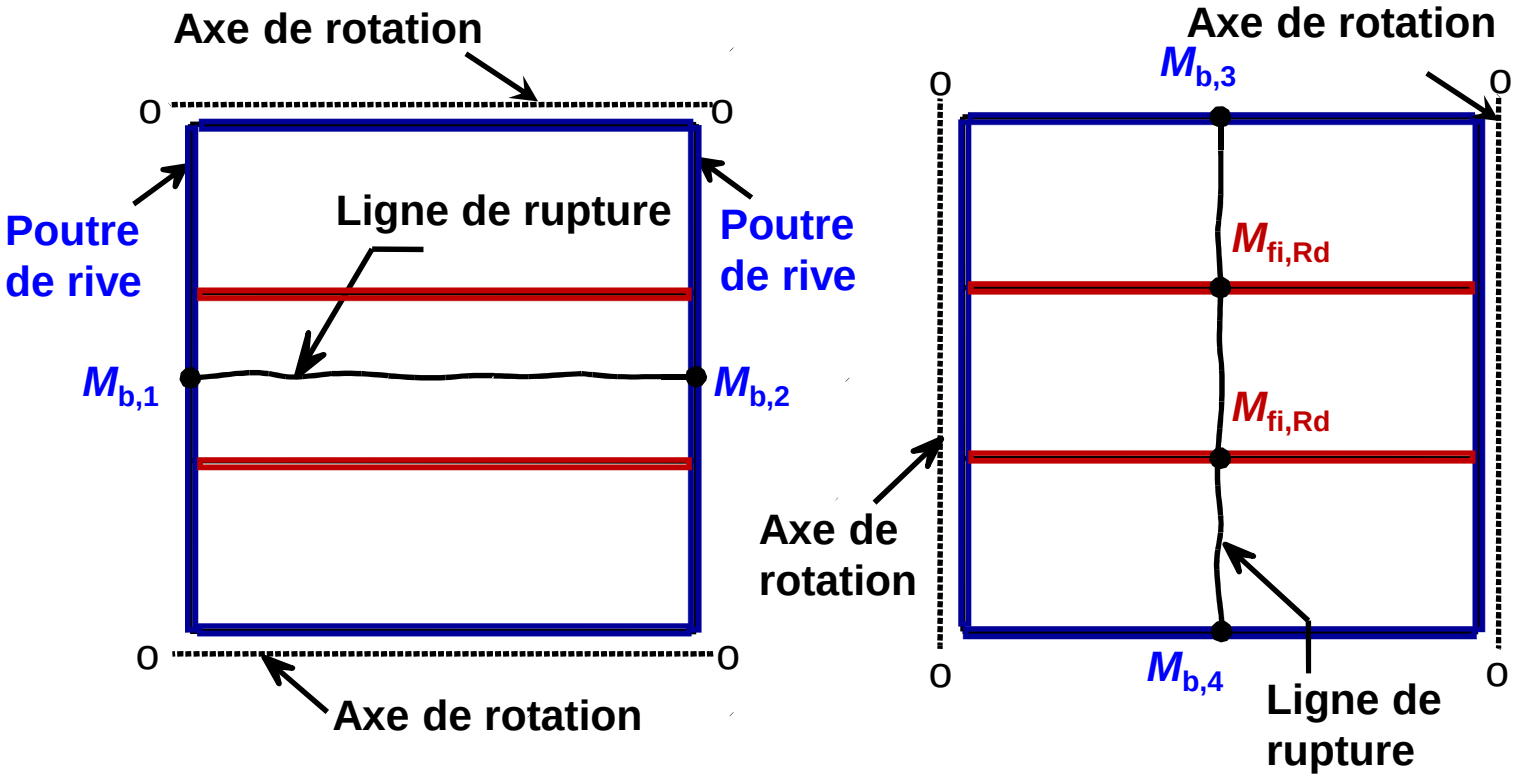
- **Calcul de température de la dalle mixte**
  - **Approche simplifiée pour calcul manuel**
    - Valeurs tabulées
  - **Modèle de calcul avancé**
    - Méthode des différences finies en mode bidimensionnel
    - Propriétés thermiques selon l'Eurocode 4 partie 1-2 pour l'acier et le béton et son Annexe Nationale française
    - L'effet d'ombre est pris en compte pour les dalles mixtes

Méthode de calcul simplifée à température élevée

- **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

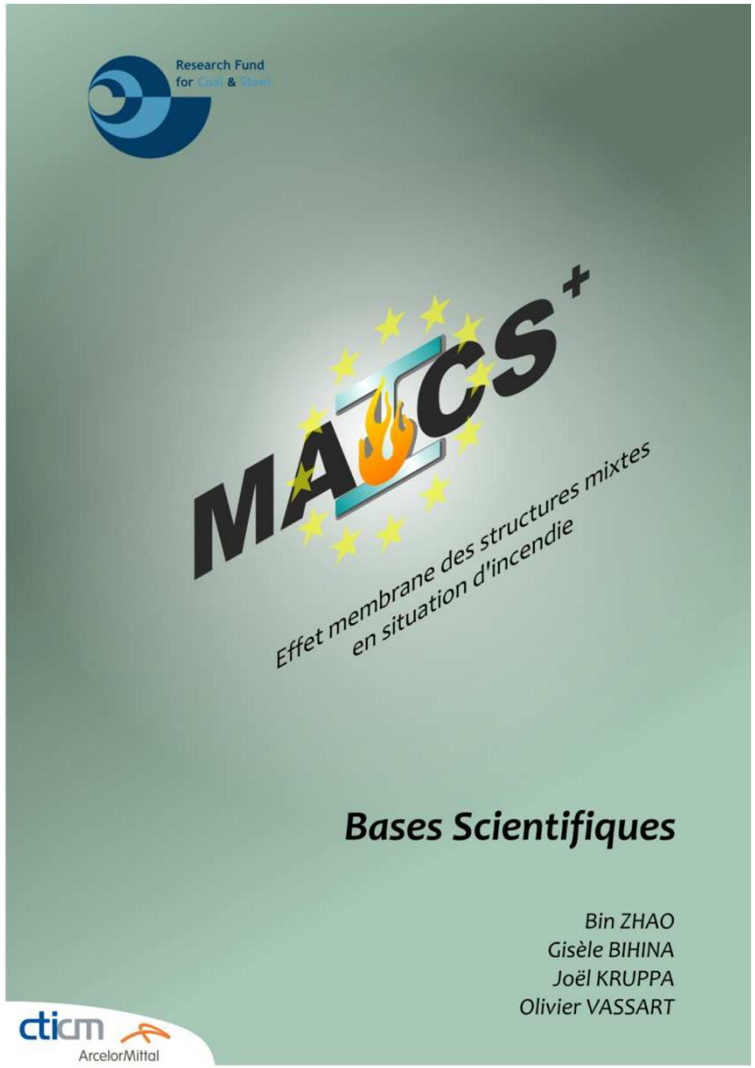
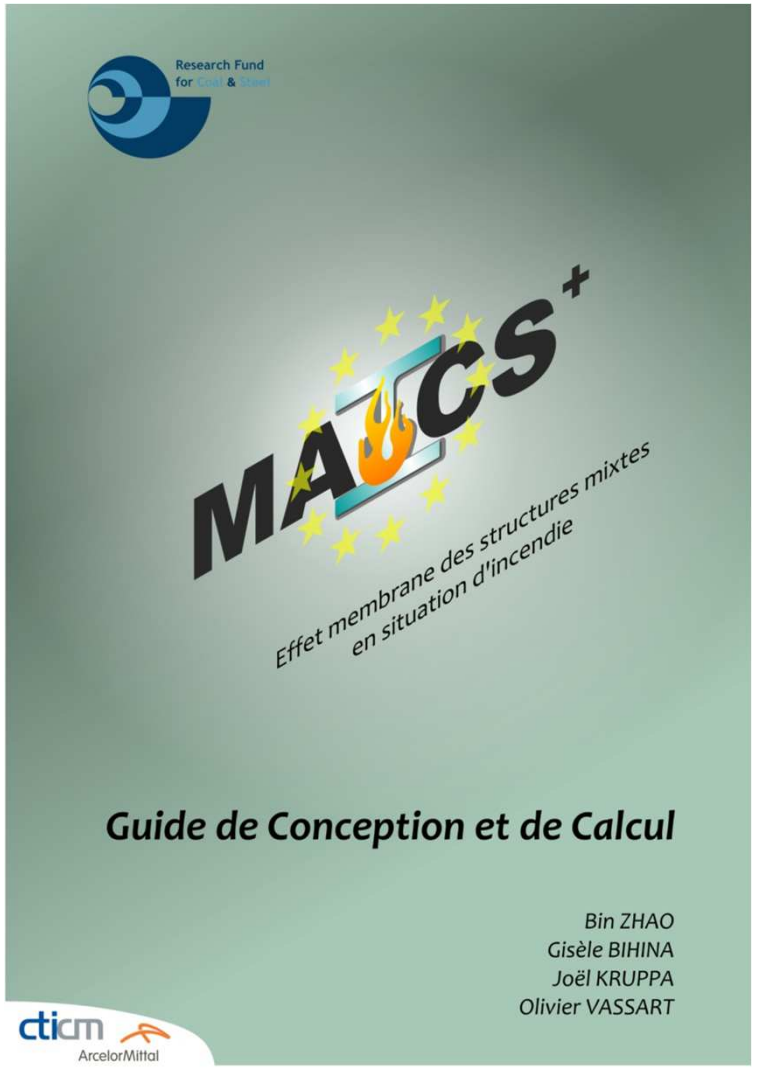
Méthode de calcul simplifiée des dalles en béton armé à 20°C

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