

# Rencontres Ouvrages d'Art 2018

## Guide « Résistance à l'incendie des ponts routiers »

**Cerema ITM**

*J-M. Lacombe*

*J. Berthelley*

**Cerema Méd.**

*P. Caulet*

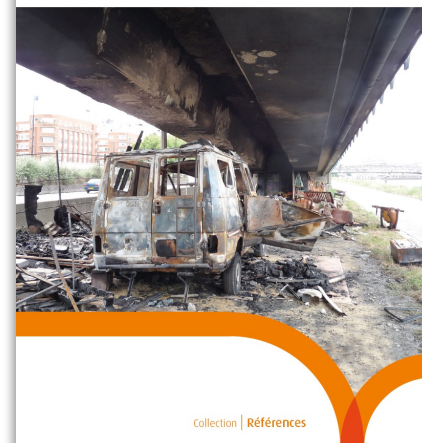
*A. Hekimian*

**DRIEA**

*P. Peyrac*



Résistance à l'incendie  
des ponts routiers



**IFSTTAR**

## Le contexte

Pas d'exigence réglementaire pour les ponts  
(seulement pour les bâtiments & tunnels) **mais**  
préoccupation des MOA, MOE et exploitants :

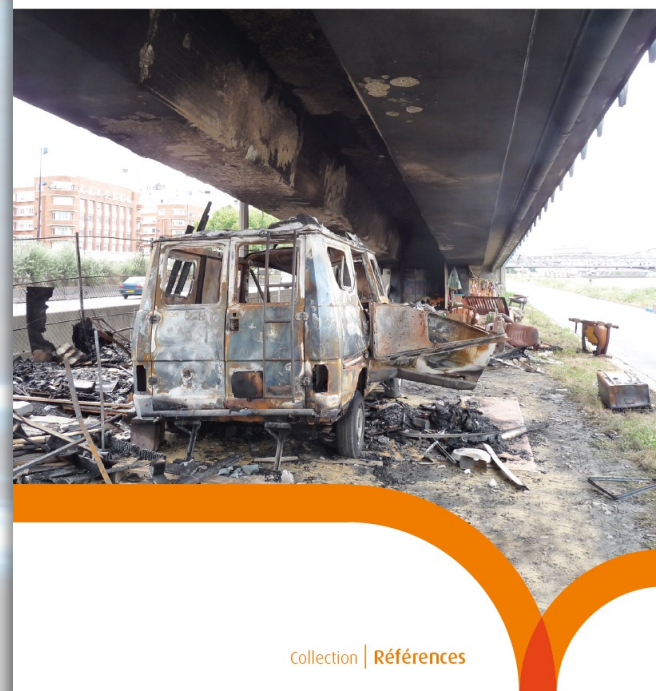
- **Aléas croissants** liés aux accidents  
(augmentation du trafic), occupations humaines  
ou campements provisoires...
- Peu de risque pour la sécurité des personnes mais  
**enjeux sociaux-économiques importants** :
  - Préserver les ouvrages
  - Rétablir rapidement la circulation après un incendie

# Les objectifs du guide

- dans le cadre de la conception, **exposer des méthodes d'évaluation du transfert d'énergie et du comportement au feu des structures ;**
- dans le cadre d'une évaluation après incendie, donner des **indications quant à la conduite à tenir dans l'urgence** et **proposer des méthodes d'évaluations structurales** (investigations & recalculs) d'un ouvrage incendié ;
- **présenter une méthode d'analyse simplifiée** du risque «incendie» pouvant aider le maître d'ouvrage et évoquer les **dispositions envisageables pour diminuer ce risque**

# Le sommaire

- Préambule
- Introduction
- Chap. 1 – Modélisation et effets de l'incendie
- Chap. 2 – Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie
- Chap. 3 – Gestion d'un ouvrage incendié
- Chap. 4 – Gestion d'un patrimoine vis-à-vis du « risque incendie »
- Annexes





# Modélisation et effets de l'incendie

Détermination des effets thermiques de l'incendie complexe, traitée en 3 étapes :

- **Modélisation de l'incendie**
- **Transfert de chaleur à la structure**
- **Répartition des températures dans la structure**

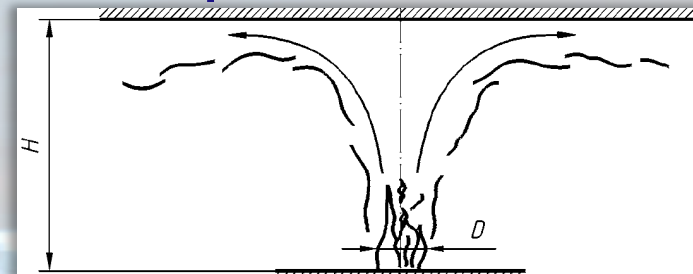
Elle précède le calcul mécanique qui peut être découplé (*le champ de  $T^\circ$  est peu dépendant de l'état de contraintes ; l'inverse est faux !*)

# Modélisation et effets de l'incendie

## *1 – Modélisation de l'incendie*

Plusieurs méthodes possibles :

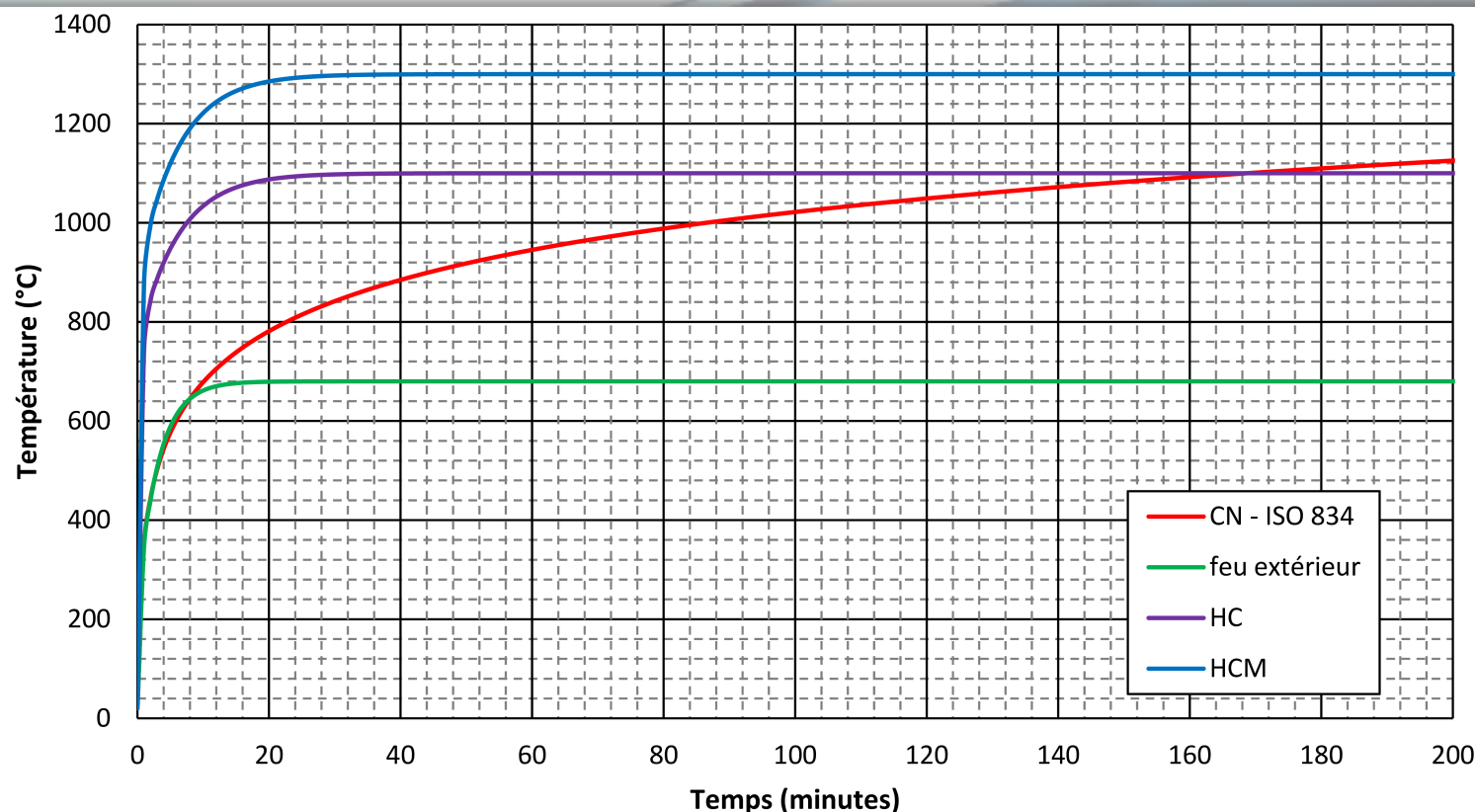
- **Courbes nominales de feu** (ISO 834, HC, ...)
- **Modèle EC1 de feu isolé basé sur la puissance :**
  - Données : Surface de flamme, puissance, (hauteur du plafond)
  - Restriction  $D < 10\text{m}$  ;  $Q < 50\text{MW}$
- **Modèles numériques de dynamique des fluides (CFD) :** détermination de  $T^\circ$  en tout point en fonction du temps !  
*Définition de scénarios => utilisation très rare*



# Modélisation et effets de l'incendie

## *1 – Modélisation de l'incendie*

Courbes nominales  $T^\circ$ /temps (cf. EC1-1-2)



# Modélisation et effets de l'incendie

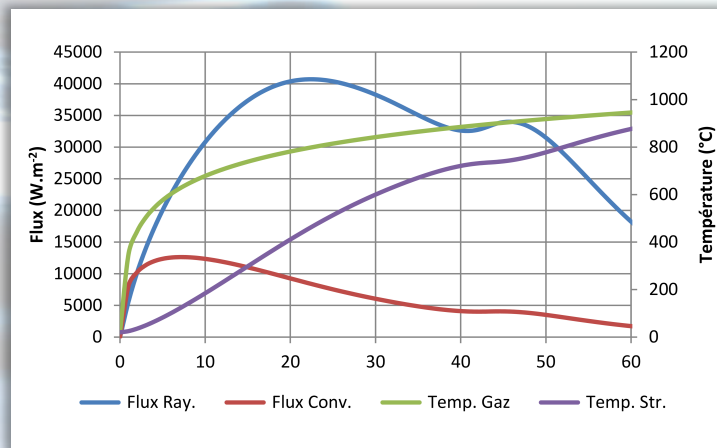
## *2 – Transfert de la chaleur à la structure*

2 phénomènes physiques :

- **Convection** :  $\phi_{convection} = \alpha_c (T_{gaz} - T_{structure})$
- **Rayonnement** :  $\phi_{rayonnement} = \varepsilon_m \varepsilon_f F \sigma (T_{gaz}^4 - T_{structure}^4)$

permettent de déterminer les échanges de chaleur avec la structure (à partir de sa  $T^\circ$  en surface).

Le rayonnement contribue majoritairement aux échanges de chaleur.





# Modélisation et effets de l'incendie

## *3 – Effets thermiques dans la structure*

L'élévation de température au sein de la structure dépend de la chaleur spécifique  $C_p$  et de la conductivité  $\lambda$  :

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{ grad}(T)) = 0$$

- **OA Béton** : mauvaise conductivité  
=> élévation de  $T^\circ$  n'a lieu que sur les premiers cm à proximité des parements exposés
- **OA Métal** : très bonne conductivité  
=>  $T^\circ$  quasi uniforme dans l'épaisseur des tôles

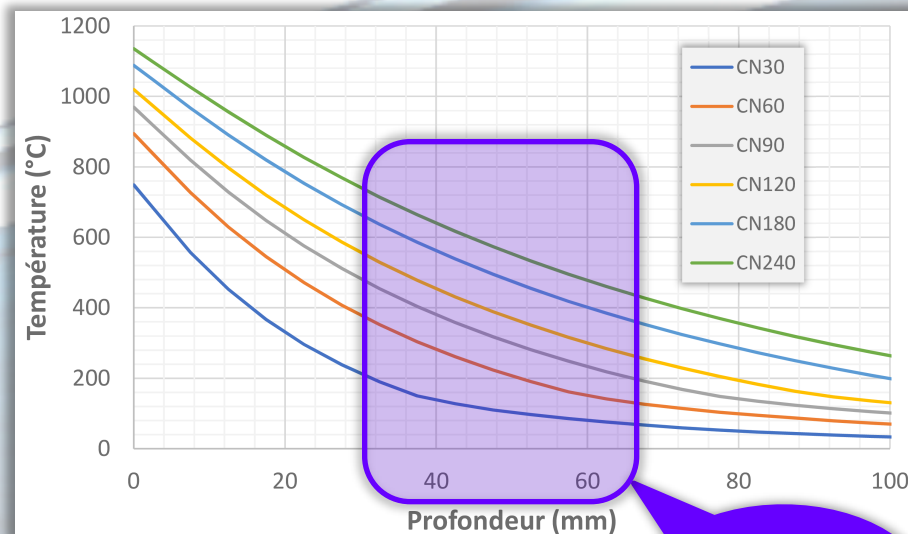
# Modélisation et effets de l'incendie

## 3 – Effets thermiques dans la structure

Exemples : Feu ISO-834

**Dalle béton exposée  
sur une face =>**

*$T^\circ$  (profondeur) à  
différents instants*



**<= Tôle en acier  
exposée sur ses 2 faces :**

*$T^\circ$  (temps) pour différentes  
épaisseurs (facteurs de massivité)*

# Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie

L'incendie a essentiellement 2 effets :

- **Dégradation des propriétés mécaniques :**

- Diminution de la limite élastique, de la résistance à la rupture et du module élastique, mais augmentation de la limite de déformation



- Ecaillage du béton

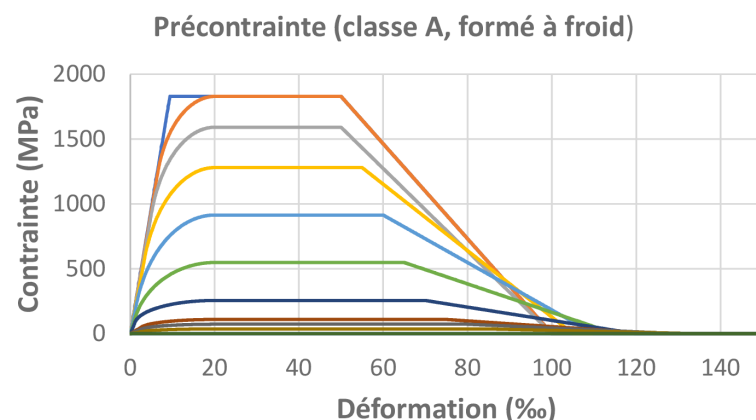
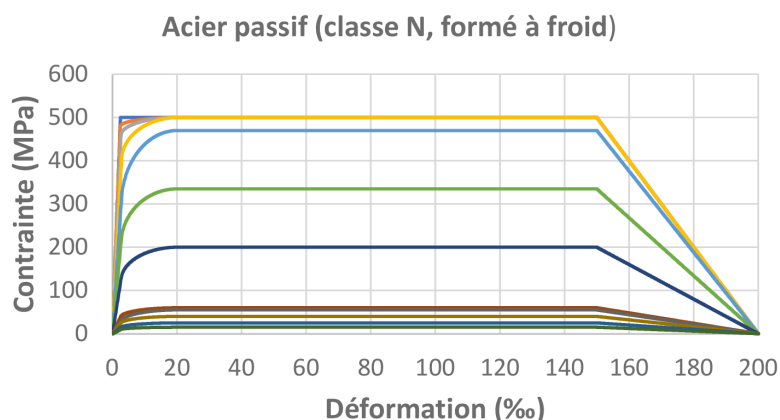
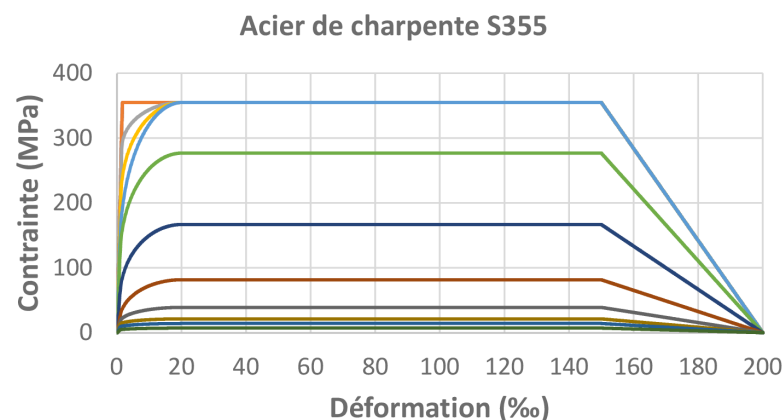
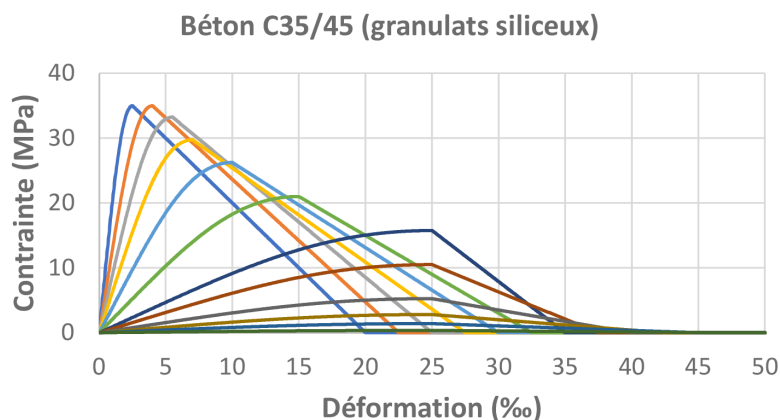


- **Création d'efforts dans les structures hyperstatiques :**

- Redistribution d'efforts possible par plastification (« rotules plastiques ») sous réserve de ductilité

# Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie

## *Comportement des matériaux (cf. EC)*



— 20 — 100 — 200 — 300 — 400 — 500 — 600 — 700 — 800 — 900 — 1000 — 1100



# Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie

## *Comportement des matériaux : Béton*

### **Ecaillage** du béton

*= Détachement progressif et continu de très petits morceaux*



- Jusqu'à plusieurs cm, voire dizaines de cm
- Plutôt avec des montées en T° rapides (feu HC) ou des bétons peu poreux (cas des BHP)
- Difficilement prévisible => *réaliser des essais (phénomène toutefois limité pour les bétons classiques sous feu ISO-834)*

# Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie

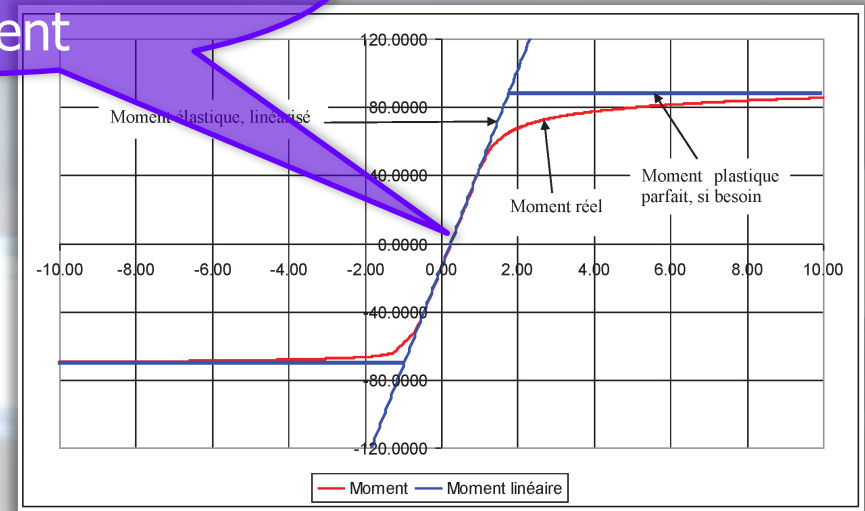
## *Comportement des sections*

Détermination les **lois « moment-courbure »** par intégration des contraintes des différents matériaux.

**ST1**

$M(\gamma_{th})=0$   
 $\Rightarrow$  Gradient thermique équivalent



La prochaine version de **ST1** (fin d'année) intégrera la possibilité de réaliser des calculs au feu.



*Exemple de loi « moment-courbure »  
réelle (et linéarisée)*

# Résistance d'un ouvrage pendant l'incendie

## *Comportement de la structure*

- **Sollicitations** = ELU accidentel avec :
  - (ou sans) les déformations thermiques (cas du feu localisé) pour les structures hyperstatiques
  - 50 % de la valeur fréquente des charges d'exploitation
- **Modélisation** : élastique, élasto-plastique limitée, analyse plastique complète, analyse plastique complète volumique
- **Vérifications** : *cf. EC matériaux*
  - Résistance des sections ; et (si struct. hyperstatique) :
  - Ductilité des matériaux (rotation des rotules, classes S.)
  - Pour les OA métal :  instabilités élastiques 

# Gestion d'un ouvrage incendié

## *Aspects juridiques*

### **Préjudice subi => Indemnisation du MOA ?**

=> *Phases d'auscultation, de surveillance, réparation*

- Mise en sécurité de l'ouvrage : *obligation du gest.*
- Recherche de responsabilités :  
*incendie volontaire / incendie accidentel*
- Préservation des droits : *réalisation de constats, rapport des pompiers et des forces de l'ordre, mesures d'urgence sans délai mais intervention ultérieure avec accord des parties adverses, communication...*
- Niveau et étendue de la réparation :  
*remise « en l'état » et non remise « en état »*





# Gestion d'un ouvrage incendié

## *Phénomènes physiques en jeu*

### ● OA Métal :

*Evaluer les déformations,  $T^{\circ}$  max atteinte à partir de l'état des peintures, vitesse de refroidissement ?*

- $T > 700^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  impact sur la résilience
- $T > 1000^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  impact sur la limite élastique et la limite à la rupture
-   $T > 580^{\circ}\text{C}$  (???) pour des aciers thermomécaniques 

### ● OA Béton Armé :

*Aciers passifs : impact si  $T > 450^{\circ}\text{C}$  (formé à froid)*

*ou  $600^{\circ}\text{C}$  (laminé à chaud)*

*$\Rightarrow$  Ok si durée de l'incendie  $< 1$  h et enrobage  $> 3$  cm*

  $\Rightarrow$  durabilité : le béton chauffé devient poreux

# Gestion d'un ouvrage incendié

## *Phénomènes physiques en jeu*

### ● OA Béton Précontraint :

- Préc. extérieure (exposée au feu)

*Vulnérabilité élevée*

*Risque de rupture vers 300 °C*

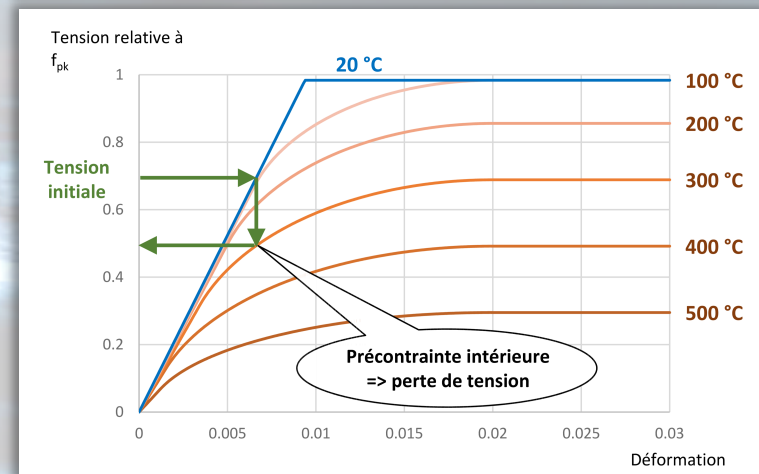
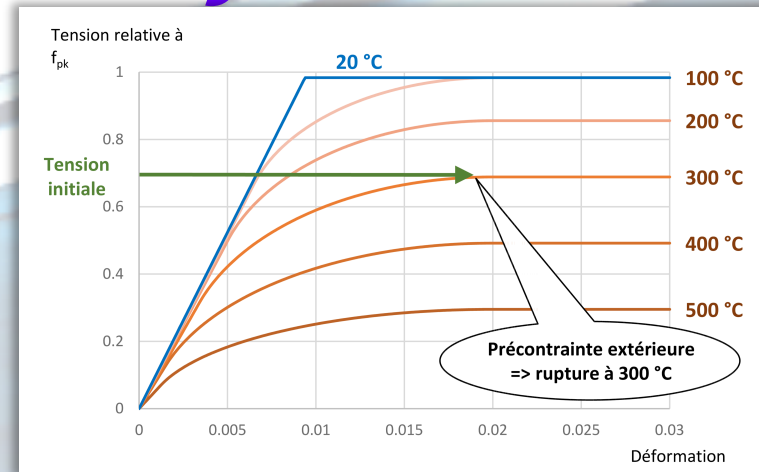
*=> état gaine ? (fusion à 130 °C)*

- Précontrainte intérieure

*Vulnérabilité moyenne*

*Tant qu'il n'y a pas rupture, les efforts sont repris par les câbles voisins*

*=> on estime la perte de tension en fonction de  $T^{\circ}$  max*



# Gestion d'un ouvrage incendié

## *La démarche à suivre après un incendie*

- Mesure à prendre immédiatement :

- Coupure de la circulation
- Organiser une visite exceptionnelle avant remise en circulation avec ou sans restriction (décision à prendre rapidement par le gestionnaire)
- Quantifier l'intensité de l'incendie, estimer l'étendue des désordres...
- Doute sur la capacité portante => réaliser des épreuves de chargement

- Evaluation de la portance après incendie

Un programme d'investigations est établi pouvant comprendre :

- **Inspection Détaillée Exceptionnelle** => étendue des désordres
- **Auscultations** en vue de qualifier l'état de la structure et/ou des matériaux (le guide détaille les principales auscultations envisageables)
- **Etude par le calcul** (des indications sur l'état des matériaux après refroidissement à T° sont fournies)



# Gestion d'un ouvrage incendié

## *Exemples développés dans le guide*



*Incendie sous un pont dalle en BP à deux nervures*



*Incendie sous un VIPP*



*Incendie sous un pont dalle en béton armé*



*Incendie sur et sous une dalle orthotrope*



*Incendie sur et dans un caisson BP à préc. extér.*



*Incendie sous un ouvrage mixte acier-béton*



# Gestion d'un patrimoine

## *Analyse du « risque incendie »*

*Cf. guide « Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art »*

$$\text{RISQUE} = \text{ALEA} \times \text{VULNERABILITE} \times \text{CONSEQUENCE (ou ENJEU)}$$

**Il faut distinguer les risques d'incendie sur & sous ouvrage**

**Aléa** = « Incendie » : trafic PL, TMD, conditions accidentogènes (carrefour, bretelle...), occupation sous ouvrage et hauteur libre (*cas de l'incendie sous ouvrage*)...

**Vulnérabilité** = « Comportement au feu de l'ouvrage »  
évalué « à dire d'expert » pour chaque type d'OA : selon matériau et position de la structure porteuse (sur/sous chaussée)

*=> pour un OA existant, à moduler suivant son état réel*




Pont dont l'intérieur est accessible = **Risque élevé**



# Gestion d'un patrimoine

## *Diminution du risque OA neuf/existant*

- 1 – Réduire l'aléa :   
- 2 – Réduire la vulnérabilité
  - Améliorer le comportement (OA neuf) : assurer la redondance, privilégier les solutions hyperstatiques avec redistributions, surdimensionner, ...
    - OA Béton : augmenter l'enrobage, recourir à un béton fibré...
    - OA Métal : utiliser des tôles épaisses mais moins large (F. massivité)
  - Protéger (OA neuf / existant)
    - OA Béton : mortier projeté ou plaques de protection (cf. tunnels)
    - OA Métal : flocage, peintures intumescentes (compatible avec OA ?)
- 3 – Réduire les conséquences (fermeture de voies)

# Merci de votre participation



Parution : juin 2018

Bonne  
lecture !

