

# RÉSISTANCE AU FEU DES OUVRAGES EN BÉTON

Laurent Molez

Maître de Conférences

Laurent.Molez@insa-rennes.fr

Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, France  
Université Laval, Québec, Canada

Université Laval, Québec, 7 avril 2017



UNIVERSITÉ  
LAVAL

**INSA**

INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
RENNES

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Incendie de Londres



(Artiste inconnu, wikipedia)

- 2 au 5 septembre 1666
- 13200 maisons détruites
- Seul moyen pour combattre le feu : coupe-feu par démolition
- A pour conséquence que Louis XIV, en France, rend obligatoire la protection intérieur et extérieur par du plâtre des immeubles de Paris

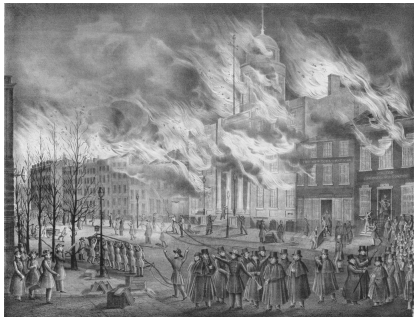
# Incendie de Rennes



(CRDP, Rennes)

- 23 au 29 décembre 1720
- 40% de la ville détruits
- Les maisons sont pillées par les soldats venus combattre le feu !
- L'urbanisme de ville est complètement modernisé : rues droites et parallèles

# Incendie de New York



(Bibliothèque du Congrès)

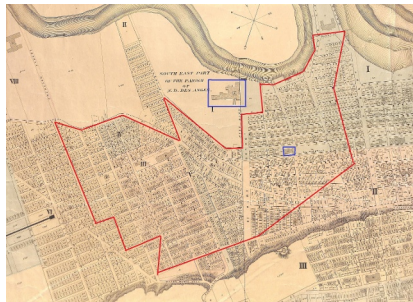
- 16 au 17 décembre 1835
- 10 à 25% de la ville détruits
- Il fait  $-27^{\circ}\text{C}$ , l'eau gèle dans les tuyaux et les pompes des pompiers
- L'une des conséquences est le développement de la construction métallique, notamment la fonte moulée (cast-iron)

# Incendie de Québec



(Archives de Montréal)

- 14 octobre 1866
- 3000 bâtiments détruits
- Quartiers Saint-Sauveur et Saint-Roch
- L'une des conséquences est l'élargissement du boulevard Langelier pour créer un coupe-feu entre les deux quartiers



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 **Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
    - Le bois
    - Le plâtre
    - Les métaux
    - La maçonnerie
    - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Classification des matériaux

Les matériaux de construction sont généralement classifiés selon leur :

**Réaction au feu** : participation au développement d'un feu, selon son caractère plus ou moins combustible

**Résistance au feu** : capacité du matériau à continuer de remplir sa fonction sous l'action de l'incendie

AUTRES PRODUITS QUE SOLS				SOLS		
CLASSES SELON NF EN 13501-1			EXIGENCE	CLASSES SELON NF EN 13501-1		EXIGENCE
A1	-	-	Incombustible	A1 <sub>f</sub>	-	Incombustible
A2	s1	d0	M0	A2 <sub>f</sub>	s1	M0
A2	s2	d0	M1	B <sub>f</sub>	s1	M3
	s3	d1			s2	
B	s1	d0	M2	C <sub>f</sub>	s2	M4
	s2	d1				
	s3					
C	s1	d0	M3 M4 (non gouttant)	B <sub>f</sub>	s1	M4
	s2	d1				
	s3					
Toutes classes autres que E-d2 et F			M4	s : fumées ; d : débris enflammés. Les classes admissibles sont définies par une combinaison de niveaux de performance lorsqu'il est fait appel à classification(s) supplémentaire(s)		

(NF EN 13501-1, 2013)

Au Canada, on retrouve les mêmes notions (Code National du bâtiment - Canada, 1997).

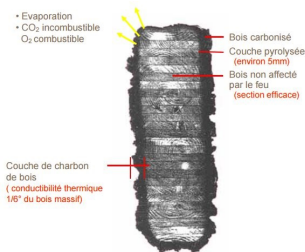


# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 **Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
  - **Le bois**
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Le bois

- Le bois non traité est généralement classé D (M3 ou M4) : **mauvaise réaction au feu**
- Brûle rapidement en surface, forme une couche de charbon (mauvais conducteur thermique) qui isole le cœur de la pièce : **stabilité au feu pas si mauvaise**
- Faible conductivité thermique du bois : **degré pare-flammes moyen**
- Avec traitement (ignifugation, enduits, enrobements, revêtements) possibilité d'obtenir une bonne réaction au feu (A2 ou A1)



(Comité national pour le développement du bois, 2012)



L'ossature acier a perdu son rôle de structure



L'ossature bois conserve son rôle de structure

(Conseil national de recherches Canada)

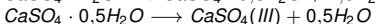
# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 **Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - **Le plâtre**
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

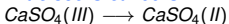
# Le plâtre

- Incombustible : très bonne réaction au feu
- Mauvais conducteur thermique (forte porosité)
- Consomme de la chaleur lors de ses transformations minérales : bon coupe-feu

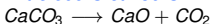
- Entre 80 °C et 200 °C :



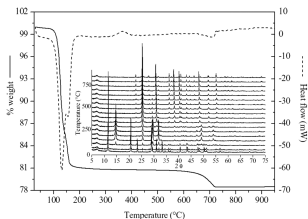
- Entre 350 °C et 400 °C :



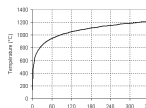
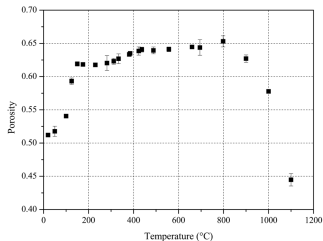
- Entre 600 °C et 750 °C :



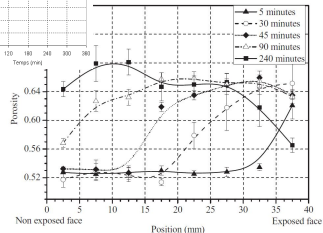
- Au dessus 1180 °C :



(Rojo et coll., 2013)

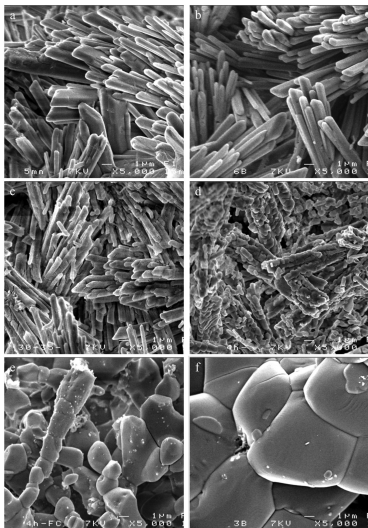


(Rojo et coll., 2013)

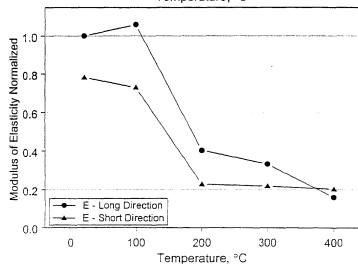
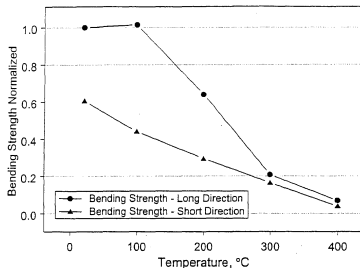


(Rojo et coll., 2013)

# Le plâtre



(a) 20°C, (b) 110°C, (c) 500°C, (d) 800°C, (e) 950°C and (f) 1050°C  
(Rojo et coll., 2013)



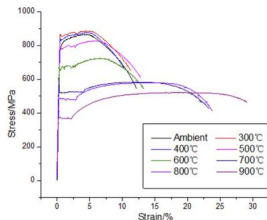
(Cramer et coll., 2003)

# Sommaire

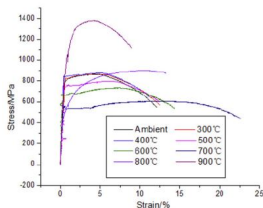
- 1 Introduction
- 2 **Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - **Les métaux**
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Les métaux

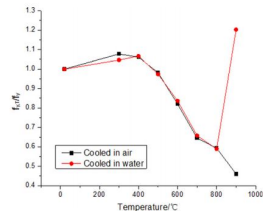
- Incombustible : **très bonne réaction au feu**
- Très bon conducteur thermique : **très mauvais degré coupe-feu**
- Chute importante des propriétés mécaniques : **mauvaise stabilité au feu**



(a) Cooled in air



(b) Cooled in water

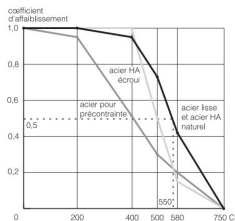


Post-fire mechanical properties of high strength Q690 structural steel (Li et coll., 2017)

# Les métaux

- Comportement à chaud (pendant l'incendie) différent du comportement après refroidissement

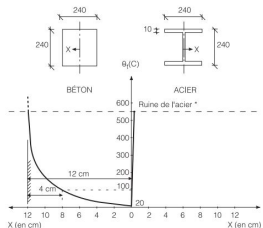
*Affaiblissement de la résistance de trois nuances d'acier en fonction de la température par rapport à leur résistance à froid*



Remarque : tous les aciers ont perdu plus de 50 % de leur résistance à 550 C

(CIMbéton, CT-B94, 2008)

*Élévation de la température en profondeur dans les sections de béton et d'acier*



Profondeur de pénétration de la chaleur dans des sections en acier et en béton (de 240 x 240 mm) soumises à un feu ISO.  
\* L'acier a perdu plus de 50 % de sa résistance.

(CIMbéton, CT-B94, 2008)



(Irish Concrete Federation, 2007)



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie**
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# La maçonnerie

- Pierres taillées, terre cuite, blocs bétons
- Matériaux incombustibles : **très bonne réaction au feu**
- Réactions physico-chimiques qui modifient les propriétés des matériaux
- Instabilités mécaniques : écaillage

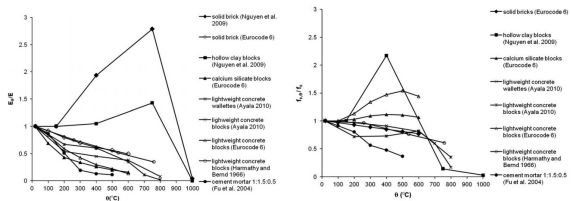


**Fig. 1.** Molino Stucky in Venice before and after the fire accident (A—collapsed wing and B—tower). (2003)

(Russo et Sciarretta, 2013)

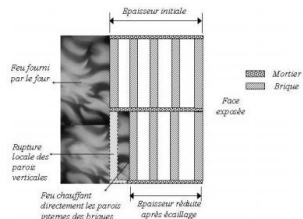
# La maçonnerie

## ● Évolution des propriétés mécaniques



(Russo et Sciarretta, 2013)

## ● Instabilités mécaniques



(Nguyen et Meftah, 2012)

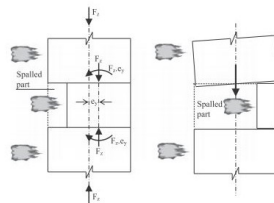


Fig. 11. Spalling-induced failure of load-bearing walls: (left) emerging parasitic bending moment induced by the eccentricity of vertical loading due to spalling, (right) scheme of the failure mode at the final stage of the fire test.

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction**
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton**
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

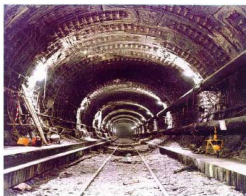
# Le béton

- Matériau incombustible : **bonne réaction au feu**
- Conductivité thermique faible : **bon degré coupe-feu**
- Bon comportement mécanique aux hautes températures : **bonne stabilité au feu**

Unprotected construction material	Fire resistance	Combustibility	Contribution to fire load	Rate of temperature rise across a section	Built-in fire protection	Repairability after fire	Protection for evacuees and fire-fighters
Timber	Low	High	High	Very low	Very low	Nil	Low
Steel	Very low	Nil	Nil	Very high	Low	Low	Low
Concrete	High	Nil	Nil	Low	High	High	High

(Irish Concrete Federation, 2007)

# Le béton



Tunnel sous la Manche, 1996 et 2008



Tunnel du Mont Blanc, 1999



Tunnel du Saint-Gothard, Suisse



Viaduc à Falkenberg, Suède, 2005

# Le béton



Tour Windsor, Madrid, Espagne



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton**
  - **Évolution de la matrice cimentaire**
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation



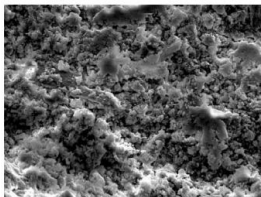
# Évolution de la matrice cimentaire

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton en fonction de la température

Température	Phénomène
Jusqu'à 80 °C	Départ de l'eau libre.
À partir de 80 °C	Une partie de l'eau adsorbée s'échappe du béton. Début de la perte de l'eau de constitution de certains hydrates (notamment l'ettringite). L'eau liée chimiquement commence donc à s'évaporer du béton.
Jusqu'à environ 300 °C	Première étape de déshydratation des silicates de calcium hydratés (C-S-H).
Entre 450 et 550 °C	Décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .
573 °C	Transformation allotropique du quartz $\alpha$ en quartz $\beta$ accompagnée d'un phénomène de dilatation (fissuration des granulats siliceux).
600 - 700 °C	Décomposition des phases C-S-H et formation de $\beta$ -C <sub>2</sub> S. Il s'agit de la deuxième étape de déshydratation des C-S-H qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques (C <sub>2</sub> S).
700 - 900 °C	Le carbonate de calcium se décompose en libérant de la chaux : $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (décomposition des calcaires).
À partir de 1100 - 1200 °C	Formation de wollastonite $\beta$ (CaO.SiO <sub>2</sub> ). Début de la fusion de certains agrégats et de la pâte de ciment. Remplacement au cours de l'échauffement des liaisons hydrauliques par des liaisons céramiques (phénomène de frittage).

(Divet et coll., 2005)

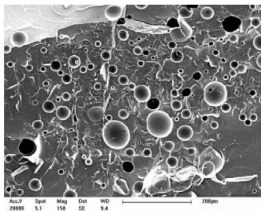
# Évolution de la matrice cimentaire



◀ Figure 1

Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement.

(Image obtenue par microscopie électronique à balayage avec un grossissement de 400).



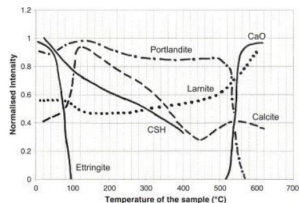
◀ Figure 2

Matrice cimentaire vitreuse présentant une macroporosité très importante. Ce phénomène se produit au-delà de 1000 °C et provient de la fusion puis du refroidissement de la pâte de ciment.

(Image obtenue par microscopie électronique à balayage avec un grossissement de 150).

(Divet et coll., 2005)

## ● Modification des hydrates présents



E/C=0,45 ; CEM I avec une importante teneur en alcalins

(Castellote et coll., 2004)

# Évolution de la matrice cimentaire

- Ces transformations minéralogiques s'accompagnent :
  - d'une perte de masse

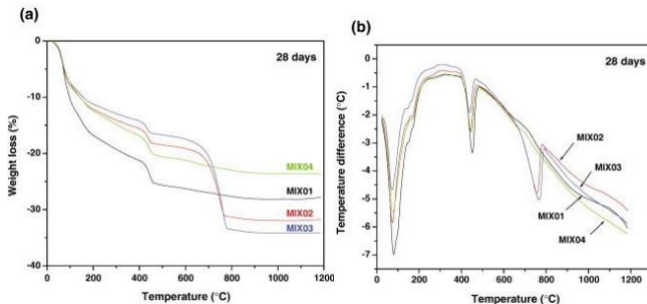


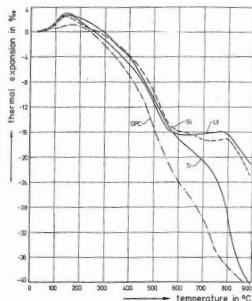
Figure 1-4. Analyses ATD (a) et ATG (b) de quatre pâtes de ciment [Ye 2007]

(Ye et coll., 2007)

# Évolution de la matrice cimentaire

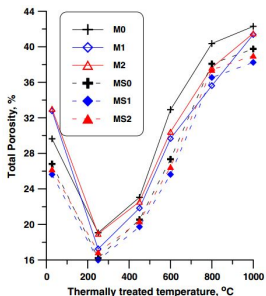
- Ces transformations minéralogiques s'accompagnent :

- de variations dimensionnelles



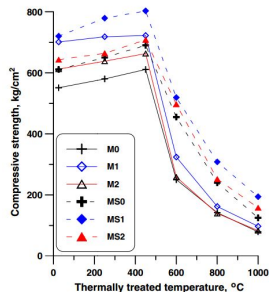
OPC : ciment Portland ; Lt : ciment avec cendres volantes ; Tr : ciment au laitier ; Si : ciment avec fumée de silice  
(Diederichs et coll., 1989)

- d'une variation de la porosité



MO : ciment Portland ; M1 et M2 : ciments avec nano- $Al_2O_3$   
(Heikal et coll., 2015)

- d'une perte de résistance

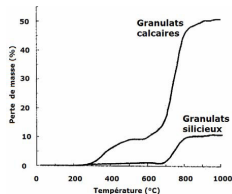


MS1 et MS2 : ciments avec nano- $Al_2O_3$  et superplastifiant  
(Heikal et coll., 2015)

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 **Comportement au feu du béton**
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - **Évolution des granulats**
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Évolution des granulats



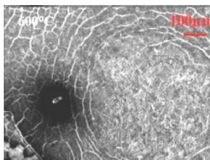
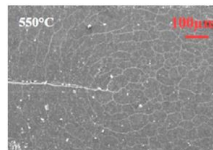
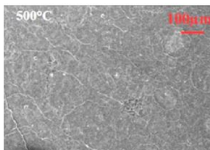
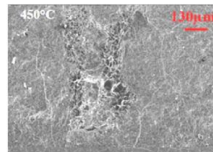
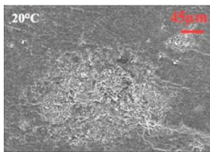
(Harmathy et Allen, 1973)

Aggregats type	Temperature (°C)							
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Serpentine	[Pattern: Diagonal lines]							
Thames gravel	[Pattern: Horizontal lines]							
Quartz	[Pattern: Vertical lines]							
Siliceous limestone	[Pattern: Diagonal lines]							
Dolomitic limestone	[Pattern: Diagonal lines]							
Calcareous limestone	[Pattern: Diagonal lines]							
Basalt	[Pattern: Diagonal lines]							
Lightweight aggregate	[Pattern: Diagonal lines]							
Anorthosite	[Pattern: Diagonal lines]							
Fibrock	[Pattern: Diagonal lines]							
Refractory aggregate	[Pattern: Diagonal lines]							

[Pattern: Diagonal lines]	Stable	[Pattern: Vertical lines]	Phase change	[Pattern: Horizontal lines]	Decarbonation	[Pattern: Diagonal lines]	Large expansion
[Pattern: Diagonal lines]	Contraction	[Pattern: Diagonal lines]	Dehydration	[Pattern: Diagonal lines]	Degassing		

(Khoury et coll., 2007)

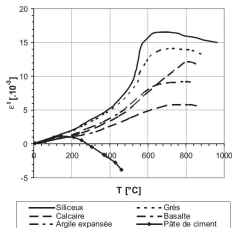


Les observations au MEB sont effectuées sur des granulats de silex saturés chauffés à 450, 500, 550 et 600 °C. Les microfissures sont observées à 450 °C et les réseaux de microfissures forment des mosaïques à 500 °C. Des microfissures tangentes à une zone intacte (inclusion) sont observées à 600 °C. Cela montre une dilatation différentielle entre la matrice et l'inclusion. Le peu de différence entre l'état de fissuration (réseaux identiques) à 550 °C et 600 °C montre le peu d'influence de la transformation  $\alpha$ - $\beta$  du quartz.

(Xing et coll., 2015)

# Évolution des granulats

- Incompatibilité des déformations des granulats et de la pâte de ciment



(Plasta, 1984)

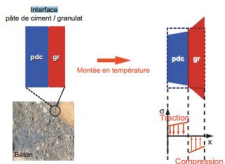
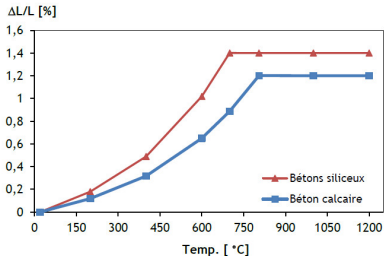


FIG. 1.24: Mécanisme de dégradation à haute température lié aux incompatibilités de déformations à l'interface pâte de ciment/granulats.

(De Sa, 2007)

- Dilatation thermiques des bétons



(NF EN 1992-1-2, 2004)

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 **Comportement au feu du béton**
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - **Évolution des propriétés physiques des bétons**
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation



# Évolution des propriétés physiques des bétons

- Perte de **masse** importante
- Départ de l'eau libre et de l'eau liée
- Décarbonatation

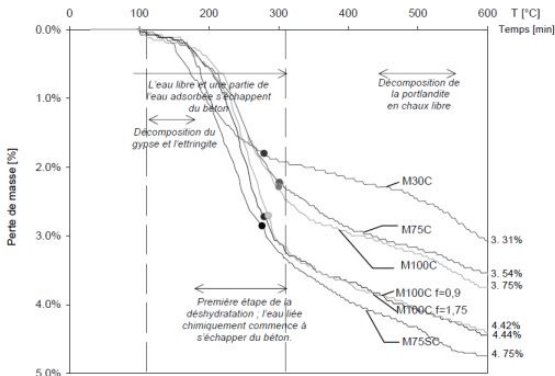
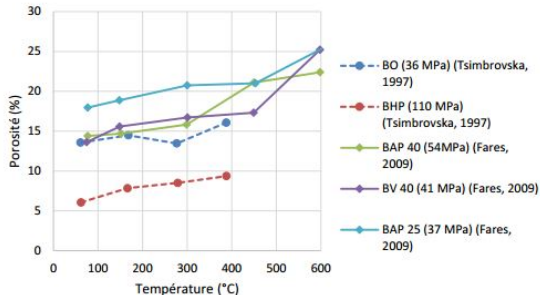


Figure 4 Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C (Hager 2004)

(Hager et Pimienta, 2004)

# Évolution des propriétés physiques des bétons

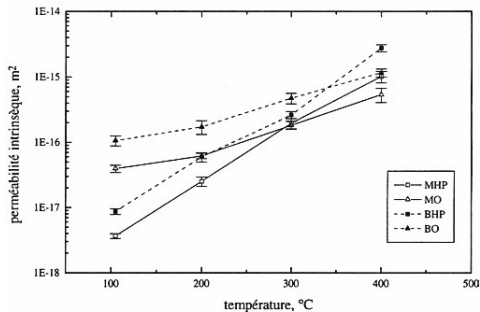
- Augmentation de la **porosité**
- Décomposition des hydrates
- Fissuration à l'interface pâte–granulat
- Influence marquée du type de granulat (instabilité thermique du silex)



(Fares, 2009)

# Évolution des propriétés physiques des bétons

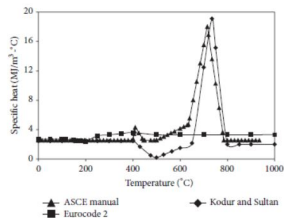
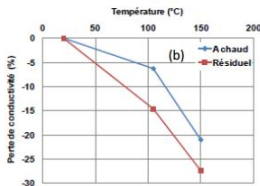
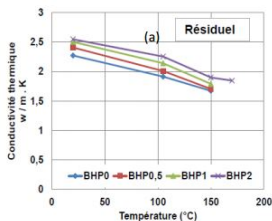
- Augmentation de la **perméabilité**
- Augmentation de la porosité
- Fissuration à l'interface pâte-granulat
- Réseau de fissures interconnectées



(Tsimbrovska, 1997)

# Évolution des propriétés physiques des bétons

- Modification des **propriétés thermiques**
- Diminution de la conductivité thermique
- Chaleur spécifique relativement constante sauf entre 600°C et 800°C : chaleur latente de changement d'état (décarbonatation, transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$ ...)



(Haniche, 2011)

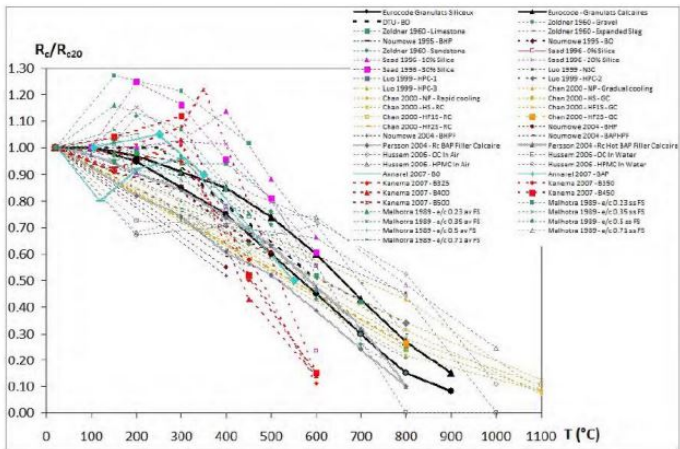
(Kodur, 2014)

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton**
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons**
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Évolution des propriétés mécaniques des bétons

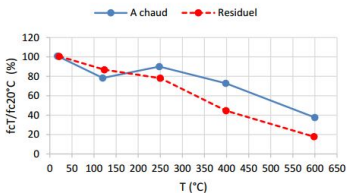
- Diminution des résistances en **compression** avec l'augmentation de la température



(Fares, 2009)

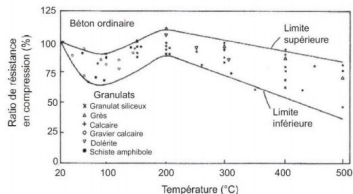
# Évolution des propriétés mécaniques des bétons

- Les mesures résiduelles effectuées après refroidissement sous-estiment les résistances en compression à chaud



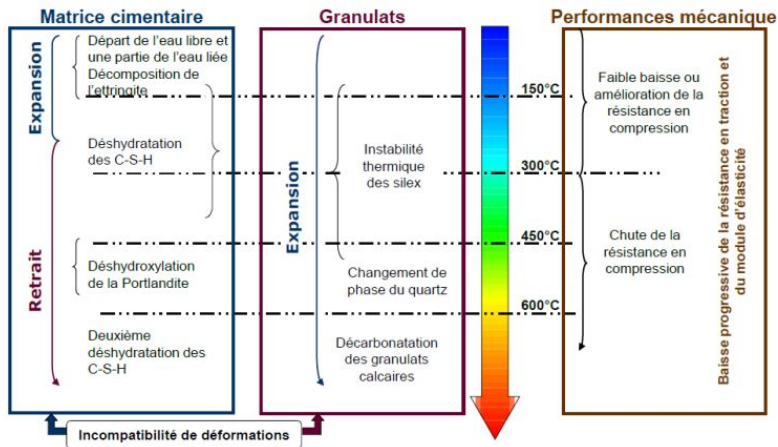
(Hager et Pimienta, 2004)

- La nature des granulats influence fortement les résistances en compression à hautes températures



(Bazant et Kaplan, 1997)

# Évolution des propriétés mécaniques des bétons



(Pliya, 2010)

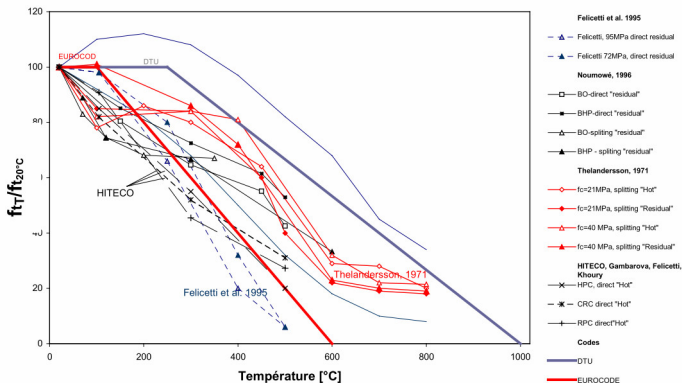




# Évolution des propriétés mécaniques des bétons

- Diminution des résistances en **traction** avec l'augmentation de la température

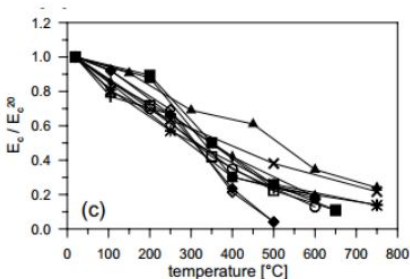
- Forte influence de l'interface pâte-granulat
- Influence du E/C
- Faible influence de la résistance des granulats



(Pimienta, 1999)

# Évolution des propriétés mécaniques des bétons

- Diminution du module d'élasticité avec l'augmentation de la température
- Micro-fissuration dans la matrice cimentaire et à l'interface pâte-granulat
- Faible influence du E/C (BO et BHP)
- Faible influence de la nature des granulats



(Bamonte et Felicetti, 2007)

Projet "CONT" Felicetti & Gamberova 98	BHP 1	◇
	BHP 2	◆
Felicetti et al. 02	BO 1 et BO 2 et BO 3	+
	BO Granulat 1 et 2	×
	BHP Granulat 1 et 2	*
HITECO II Felicetti et al. 03	BTHP	†
Bamonte et al. 06	BO 1	□
	BO 2	■
Persson 04	BAP 1	○
	BAP 2	●
	BAP 3	△
	BAP 4	▲

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton**
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement**
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

# Phénomène d'écaillage et d'éclatement

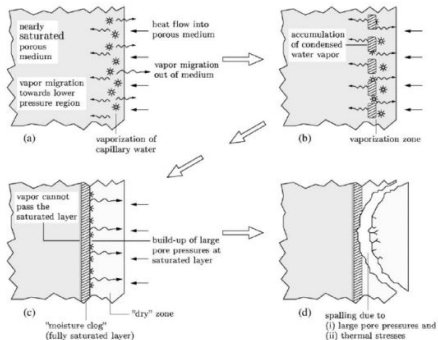
En plus des dégradations des propriétés physiques et mécaniques, on observe des instabilités thermiques qui peuvent conduire à une forte dégradation de la surface du béton :

- **Éclatement de granulats (aggregate spalling)** : éclatement superficiel, causé par la dilatation thermique des granulats proches de la surface.
- **Éclatement de surface (surface spalling)** : éclatement discoïdal violent, probablement causé par la migration d'eau.
- **Éclatement d'angle (corner spalling)** : écaillage non-violent des angles, probablement causé par la migration d'eau, ainsi que par les contraintes thermiques.
- **Écaillage explosif (explosive spalling)** : écaillage très violent, caractérisé par le détachement de grands morceaux de béton (jusqu'à 1m<sup>2</sup> environ) du parement exposé au feu.

# Phénomène d'écaillage et d'éclatement

Deux principales théories expliquent ces phénomènes :

- Hypothèse thermo-hydrique

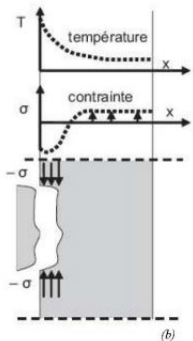


(Zeiml et coll., 2006)

# Phénomène d'écaillage et d'éclatement

Deux principales théories expliquent ces phénomènes :

- Hypothèse thermo-hydrrique
- Hypothèse thermo-mécanique



(Bazant, 1997)

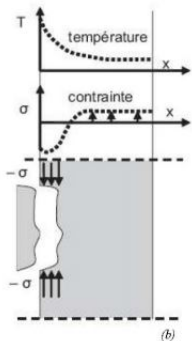


(Anderberg, 1997)

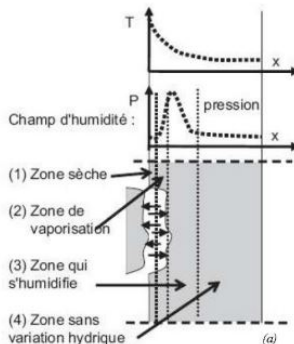
# Phénomène d'écaillage et d'éclatement

Deux principales théories expliquent ces phénomènes :

- Hypothèse thermo-hydrrique
- Hypothèse thermo-mécanique



(Bazant, 1997)



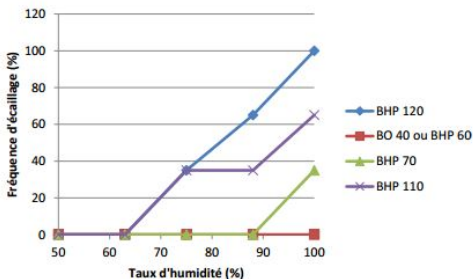
(Anderberg, 1997)



# Phénomène d'écaillage et d'éclatement

Ces phénomènes d'écaillage et d'éclatement sont influencés par :

- la nature des granulats
- le E/C
- le taux d'humidité
- la vitesse de chauffe
- la taille et la forme de la pièce étudiée
- le chargement mécanique



(Chan et coll., 1999)

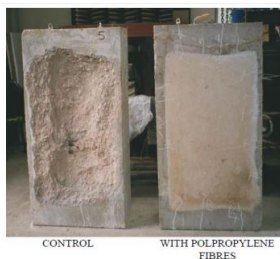
# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton**
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - **Effet de l'ajout de fibre**
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - Réparation

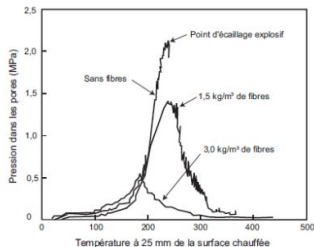
# Effet de l'ajout de fibre

Les fibres de **polypropylène** sont généralement utilisées pour limiter l'écaillage :

- les fibres fondent à partir de 120°C
- création d'une porosité supplémentaire
- limitation des pressions de fluide / vapeur



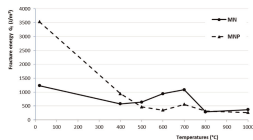
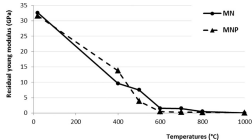
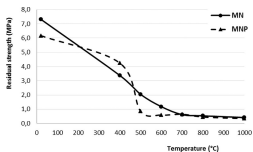
(Jansson et Boström, 2008)



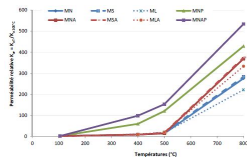
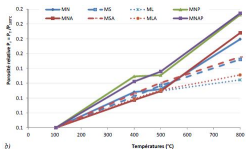
(Phan, 2007)

# Effet de l'ajout de fibre

Les fibres de **polypropylène** permettent de conserver, voire d'améliorer les propriétés mécaniques jusqu'à des températures d'environ 500 °C



(Ezziane et coll., 2015)

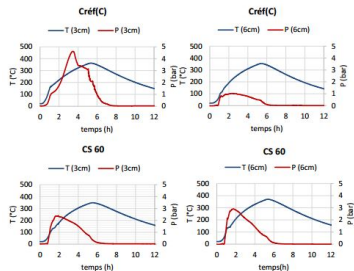


(Ezziane, 2012)

# Effet de l'ajout de fibre

Les fibres **métalliques** sont généralement utilisées pour augmenter la ténacité, mais n'ont pas d'effet sur l'écaillage :

- les phénomènes explosifs libèrent trop d'énergie
- les fibres en surfaces peuvent initier l'écaillage
- on observe dans certains cas une augmentation de l'écaillage



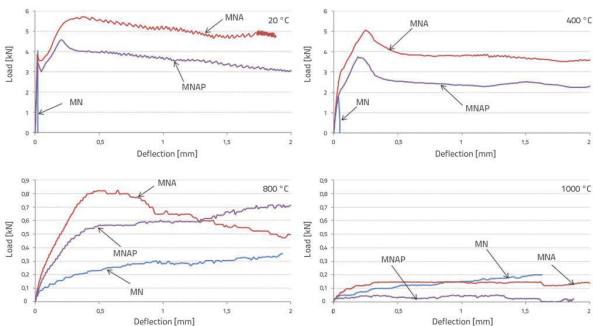
(Yermak, 2015)

# Effet de l'ajout de fibre

Ajout d'un cocktail de fibres (**métalliques** et **polypropylène**) afin de gagner en ductilité tout en évitant l'écaillage



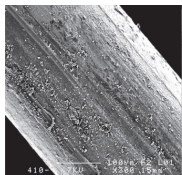
(Yermak, 2015)



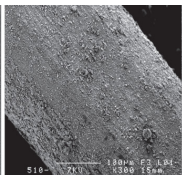
(Ezziane et coll., 2014)

# Effet de l'ajout de fibre

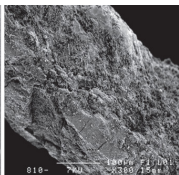
## Corrosion des fibres métalliques à haute température



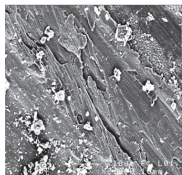
a.) 400 °C (x300)



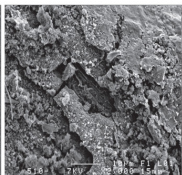
b.) 500 °C (x300)



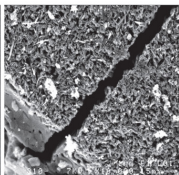
c.) 800 °C (x300)



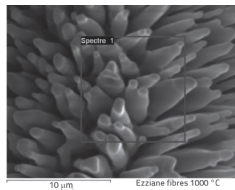
a.) 400 °C (x2000)



b.) 500 °C (x2000)



c.) 800 °C (x2000)

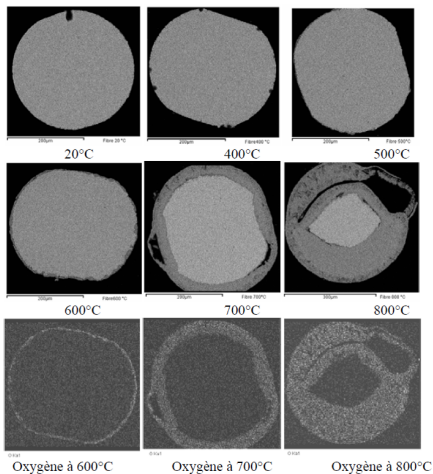


(Ezziane et coll., 2014)

# Effet de l'ajout de fibre

## Corrosion des fibres métalliques à haute température

- Section transversale des fibres chauffées sans matrice cimentaire
  - formation d'une « peau » moins dense en atome lourd
  - cette « peau » est de plus en plus épaisse quand la température augmente
  - la peau se désolidarise du cœur
- Cartographie de l'atome d'oxygène
  - Oxydation de la surface et propagation en profondeur



(Ezziane et coll., 2014)



# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - **Résistance au feu des structures**
  - Diagnostic
  - Réparation

# Résistance au feu des structures

Le but recherché est la stabilité au feu afin :

- d'évacuer les usagers
- permettre l'intervention des pompiers en sécurité
- éviter la propagation du feu

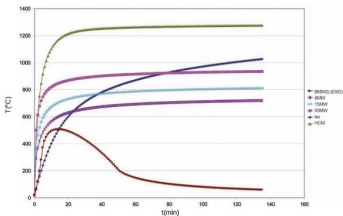
Objectifs de sécurité et comportement au feu :

- Stabilité au feu
- Absence de ruine en chaîne
- Non-effondrement vers l'extérieur
- Compartimentage (murs coupe-feu)

# Résistance au feu des structures

## Méthodologie de calcul :

- calcul thermique permettant d'évaluer le champ de température au sein de la structure
  - calcul de la température de l'air
  - propagation de la chaleur dans un solide
- calcul des efforts dans la structure avec la prise en compte des efforts induits par les dilatations thermiques lorsqu'ils sont défavorables
- vérification des sections en prenant en compte le fait que les caractéristiques mécaniques des matériaux varient avec la température



(Centre d'Études des Tunnels, 2005)

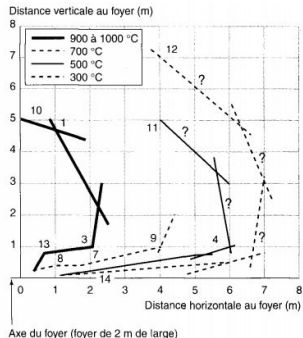


Fig. 2 - Répartition spatiale des températures maximales dans l'air induites par l'incendie d'un poids lourd.

(Trouillet et Brunet-Buschiazzo, 1997)

# Sommaire

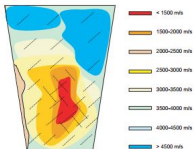
- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - **Diagnostic**
  - Réparation

# Diagnostic

## ● Inspection de l'ouvrage (Divet et coll., 2005)

- ① Dépôt de suies
  - ② Zone de coloration
  - ③ Écaillage relative
  - ④ Fissures
  - ⑤ Zones de béton sans cohésion ou/et désolidarisé du cœur
  - ⑥ Zones d'armatures apparentes
  - ⑦ Perte totale de béton
  - ⑧ Déformation rémanentes
- Essai de dureté de surface au scléromètre
  - Auscultation sonique

Figure 21  
Profil des dégradations : cartographie so-velles.



### Signification des couleurs :

Les parties de couleur jaune correspondent aux zones noircies sans dégradation visuelle importante et pour lesquelles l'évaluation est réalisée seulement en fonction des niveaux de température ambiante. Les zones de couleur plus sombre de noir au bleu, ainsi que les couleurs roses, sont des zones qui s'alignent du foyer et qui retrouvent progressivement une vitesse sonique conforme à celle du béton sain pour lesquelles aucun traitement spécifique n'est envisagé (pointés un échantillon éventuel ou une protection du surface). Les parties présentant des couleurs les plus foncées (bleu-noir) sont plus ou moins affectées par l'élévation de température et présentent des vitesses élevées.

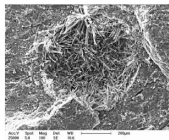
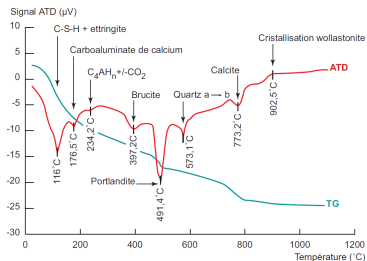
Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie

Classe de désordres	0	1	2	3	4
Vue en élévation d'une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	Aucun. État de référence de béton sain	Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faiencage)	Écaillage superficiel (0 à 10 mm) (figures 1 et 2). Fissures nettes et orientées (> 0,5 mm)	Disparition du béton d'enrobage. (fig. 3). Les armatures sont visibles. Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques. Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion (figure 4)

# Diagnostic

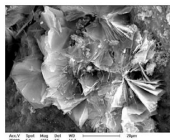
## ● Essais de laboratoire

- Prélèvement de carottes
- Simulation de l'incendie par échauffement du béton en laboratoire
- Caractérisation du béton par profil sonique
- Détermination du profil de module d'élasticité par la méthode de fréquence de résonance
- Estimation des températures atteintes par microscopie électronique à balayage
- Estimation des températures atteintes par analyses thermiques
- Estimation des températures atteintes par diffractométrie des rayons X



▲ Figure 41

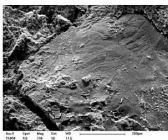
Cristaux d'ettringite aciculaires dans une matrice. L'ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) commence à perdre son eau de constitution à partir de 80°C et devient amorphe pour des températures supérieures à 100°C. La présence d'ettringite atténue donc que le matériau n'a pas subi une élévation de température au-delà de 100°C, sauf si un aspect d'eau n'est produit après l'incendie ayant permis alors une réhydratation. (Fracture fraîche, technique des électrons secondaires, grossissement × 100).



▲ Figure 42

Recristallisation sous forme de « roses de sable » de la portlandite  $Ca(OH)_2$  transformée en chaux vive  $CaO$  lors de l'incendie. Phénomène observé pour des températures voisines de 800°C.

(Fracture fraîche, technique des électrons secondaires, grossissement × 1220).



▲ Figure 44

Fractures transgranulaires d'un grain de quartz ( $SiO_2$ ). Ceci correspond à la transformation allotropique du quartz α en quartz β qui se produit autour de 573°C. Cette transformation est liée à des répercussions importantes sur les propriétés physico-chimiques du quartz et induit en particulier une dilatation (0,8 % en volume).

(Fracture fraîche, technique des électrons secondaires, grossissement × 150).

# Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Comportement au feu de différents matériaux de construction
  - Classification des matériaux
  - Le bois
  - Le plâtre
  - Les métaux
  - La maçonnerie
  - Le béton
- 3 Comportement au feu du béton
  - Évolution de la matrice cimentaire
  - Évolution des granulats
  - Évolution des propriétés physiques des bétons
  - Évolution des propriétés mécaniques des bétons
  - Phénomène d'écaillage et d'éclatement
  - Effet de l'ajout de fibre
- 4 Comportement au feu des structures en béton
  - Résistance au feu des structures
  - Diagnostic
  - **Réparation**

# Réparation



(Irish Concrete Federation, 2007)



# Références I

- ACI 216.1-97 (1997).  
Standard method for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies – chapter 2 : Concrete.
- Anderberg, Y. (1997).  
Spalling phenomena of hpc and oc.  
*In International workshop on fire performance of high-strength concrete. Gaithersberg, USA.*
- Bamonte, P. et R. Felicetti (2007).  
On the tensile behavior of thermally-damaged concrete.  
*In Proceedings of the 6th International conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure.*
- Bazant, Z. P. (1997).  
Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete.  
*In International workshop on fire performance of high-strength concrete. Gaithersburg, USA.*
- Bazant, Z. P. et M. F. Kaplan (1997).  
*Concrete at high temperatures : material properties and mathematical models.*  
Longman Group Limited.
- Castellote, M., C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, et J. Campo (2004).  
Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating as studied by neutron diffraction.  
*Cement and Concrete research 34*, 1633–1644.
- Centre d'Études des Tunnels (2005).  
*Comportement au feu des tunnels routiers – Guide méthodologique.*  
CETU : centre d'études des tunnels.
- Chan, Y. N., G. F. Peng, et M. Anson (1999).  
Fire behavior of high-performance concrete made with silica concrete fume at various moisture contents.  
*ACI Materials Journal 96*, 405–409.

# Références II

- [CIMbéton, CT-B94 \(2008\).](#)  
*Le béton et la sécurité incendie.*  
CIMbéton.
- [Code National du bâtiment - Canada \(1997\).](#)  
La sécurité incendie dans les bâtiments.
- [Comité national pour le développement du bois \(2012\).](#)  
Le matériau bois et ses dérivés.
- [Cramer, S., O. M. Friday, R. H. White, et G. Sriprukiat \(2003, January\).](#)  
Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures.  
*In Proceedings of the Fire and Materials 2003 Conference*, pp. 33–42. San Francisco, California, USA.
- [De Sa, C. \(2007\).](#)  
*Étude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités de déformation.*  
Ph. D. thesis, ENS Cachan.
- [Diederichs, U., U.-M. Jumppanen, et V. Penttala \(1989\).](#)  
Behaviour of high strength concrete at high temperatures.  
Rapport de recherche Report 92, Helsinki University of Technology - Department of Structural Engineering.
- [Divet, L., S. Arnaud, X. Derobert, P. Fasseu, R.-M. Faure, C. Larive, B. Naquin, et G. Oliver \(2005\).](#)  
*Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai des lpc n°62.*  
Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- [Ezziane, M. \(2012\).](#)  
*Formulation et tenue au feu des matériaux cimentaires renforcés de fibres de différentes natures.*  
Ph. D. thesis, INSA Rennes.

## Références III

- Ezziane, M., T. Kadri, L. Molez, R. Jauberthie, et A. Belhacen (2015).  
High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced mortars.  
*Fire Safety Journal* 71, 324–331.
- Ezziane, M., L. Molez, T. Kadri, et R. Jauberthi (2014).  
Properties of fibre mortars after exposure to high temperatures.  
*Gradevinar* 5, 425–431.
- Fares, H. (2009).  
*Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée*.  
Ph. D. thesis, Université de cergy-Pontoise.
- Hager, I. et P. Pimienta (2004).  
Mechanical properties of hpc at high temperature. fib task group 4.3 "fire design of concrete structures".  
Rapport de recherche.
- Haniche, R. (2011).  
*Contribution à l'étude des bétons portés en température / évolution des propriétés de transfert / étude de l'éclatement*.  
Ph. D. thesis, INSA Lyon.
- Harmathy, T. Z. et L. W. Allen (1973).  
Thermal properties of selected masonry unit concretes.  
*Journal Proceedings* 70(2), 132–142.
- Heikal, M., M. I. , et N. Ibrahim (2015).  
Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing  $Al_2O_3$  nano-particles.  
*Construction and Building Materials* 91, 232–242.

## Références IV

- Irish Concrete Federation (2007).  
*Comprehensive fire protection and safety with concrete.*  
The Irish Concrete Federation.
- Jansson, R. et L. Boström (2008).  
Spalling of concrete exposed to fire.  
Rapport de recherche SP Report 2008 :52, SP Technical Research Institute of Sweden.
- Khoury, G. A., Y. Anderberg, K. Both, J. Fellinger, N. P. Høj, et C. Majorana (2007).  
*Fire design of concrete structures – - materials, structures and modelling.*  
Fédération de l'Industrie du Béton.
- Kodur, V. (2014).  
Properties of concrete at elevated temperature.  
*ISRN Civil Engineering.*
- Li, G.-Q., H. Lyu, et C. Zhang (2017).  
Post-fire mechanical properties of high strength Q690 structural steel.  
*Journal of Constructional Steel Research 132*, 108–116.
- NF EN 13501-1 (2013).  
Classement au feu des produits et éléments de construction - partie 1 : classement à partir des données d'essais de réaction au feu.
- NF EN 1992-1-2 (2004).  
Calcul des structures en béton - partie 1-2 : règles générales - calcul du comportement au feu.
- Nguyen, T.-D. et F. Meftah (2012).  
Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. part 1 : Experimental analysis.  
*Fire Safety Journal 52*, 55–64.

# Références V

- Phan, L. T. (2007).  
Spalling and mechanical properties of high strength concrete at high temperature.  
*In Proceeding of CONSEC' 07*. Tours, France.
- Pimienta, P. (1999).  
Évolution des caractéristiques des bhp soumis à des températures élevées (tranche 1), résistances en compression et modules d'élasticité.  
Rapport de recherche, BHP2000.
- Plasta, J. (1984).  
Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste.  
*Matériaux et Construction* 17(6), 415–420.
- Pliya, P. (2010).  
*Contribution des fibres de polypropylène et Métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*.  
Ph. D. thesis, Université de Cergy Pontoise.
- Rojo, A., Y. Mélinge, et O. Guillou (2013).  
Kinetics of internal structure evolution in gypsum board exposed to standard fire.  
*Journal of Fire Sciences* 31(5), 395–409.
- Russo, S. et F. Sciarretta (2013).  
Masonry exposed to high temperatures : Mechanical behaviour and properties - an overview.  
*Fire Safety Journal* 55, 69–86.
- Trouillet, P. et J.-P. Brunet-Buschiazzo (1997, mai-juin).  
Incendies des ouvrages d'art – manifestations, conséquences. cas particulier des ouvrages à précontrainte extérieure.  
*Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 35–48.

# Références VI

- Tsimbrovska, M. (1997).  
*Dégradation des bétons Ã des hautes performances soumis à des température élevées.*  
Ph. D. thesis, Université de Grenoble 1.
- Xing, Z., A.-L. Beaucour, R. Hebert, A. Noumowe, et B. Ledesert (2015).  
Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature.  
*Construction and Building Materials* 95, 18–28.
- Ye, G., X. Lui, G. D. Schutter, L. Taerwe, et P. Vandeveldel (2007).  
Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature.  
*Cement and concrete research* 37, 978–987.
- Yermak, N. (2015).  
*Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres.*  
Ph. D. thesis, Université de Cergy-Pontoise.
- Zeiml, M., D. Leithner, R. Lackner, et H. Mang (2006).  
How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete ?  
*Cement and Concrete Research* 36, 929–942.