

Chapitre

4

Résistance au feu des bétons

4.1 - Comportement aux températures élevées

4.2 - Conductivité thermique

**4.3 - Évolution des résistances du béton
et de l'acier en fonction de la température**

Les risques liés aux incendies ne sont pas les mêmes d'un pays à l'autre. Aux États-Unis, par exemple, le feu tue tous les ans près de 6 000 personnes, soit un peu plus de 2,4 pour 100 000 habitants, alors qu'en France ce taux est de l'ordre de 1 pour 100 000. Impliquées dans le suivi des risques, les compagnies d'assurances imputent cet écart à la différence entre les modes constructifs dans les deux pays. Les États-Unis ont, en effet, une tradition de construction légère principalement en bois et en acier, alors qu'en France la majeure partie du patrimoine est construite « en lourd » et, plus particulièrement depuis la Seconde Guerre mondiale, en béton.

Si l'on suit le développement d'un incendie, on comprend comment matériaux et techniques de construction participent directement à la propagation et à l'alimentation du feu. Une cause extérieure accidentelle est pratiquement toujours à l'origine d'un incendie : court-circuit électrique, cigarette mal éteinte, fonctionnement défectueux d'un appareil ménager, etc. Le feu couve et l'incendie n'entre, en fait, dans son premier état, dit « de démarrage », que si des matières combustibles se trouvent à proximité, tissus, papier, mobilier, etc., mais également certains matériaux de construction. Pour que le feu se développe, il faut dans le même temps un apport suffisant d'oxygène : l'oxygène contenu dans le local, mais aussi celui fourni par les ventilations et les ouvertures⁽¹⁾.

Au cours de l'incendie, la température atteint fréquemment 1 000 °C en surface des éléments de la construction. Les matériaux doivent donc être incombustibles pour ne pas alimenter l'incendie en s'enflammant. Par ailleurs, l'aptitude des structures et des éléments de construction à conserver leur rôle principal durant l'incendie et à s'opposer à l'extension du feu est caractérisée par :

- leur résistance au feu ; ils peuvent être stables au feu (SF), coupe-feu (CF) ou pare-flamme (PF) pour des temps déterminés (de 1/4 h à 6 heures) ;
- leur réaction au feu, classée de MO à M4⁽²⁾.

1. Le mode de propagation du feu est décrit plus haut dans le chapitre « Sécurité incendie ».
2. Voir le classement des matériaux au chapitre « Sécurité incendie ».

4.1 - Comportement aux températures élevées

Le tableau ci-dessous indique que plusieurs phénomènes physico-chimiques se succèdent lorsque la température du béton évolue de 100 à 1 000 °C et plus. Ils correspondent à des modifications sensibles de la pâte cimentaire et des granulats à partir de 500 °C, modifications qui se traduisent par un affaiblissement des qualités du béton (résistance mécanique, modules de déformation, etc.). L'expérience montre pourtant que la résistance au feu des structures en béton est couramment assurée alors que le béton situé dans une ambiance à plus de 1 000 °C devrait subir des transformations rédhibitoires. Que se passe-t-il donc concrètement ?

Jusqu'à 100 °C	simple dilatation
De 100 à 150 °C	évaporation de l'eau des pores
À partir de 150/180 °C	l'eau d'hydratation de (OH) ₂ Ca est libérée, la pâte de ciment se contracte
De 400 à 500 °C	l'hydroxyde de calcium se décompose en CaO et H ₂ O La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage
De 570 à 700 °C	le quartz a devient quartz b (573 °C)
De 700 à 800 °C	le CSH devient b CSH
À partir de 800 °C	le calcaire se décompose (en granulats, par exemple) et devient CO ₂ Ca · OCa + CO ₂
De 1 150 à 1 200 °C	le calcaire se décompose (en granulats, par exemple)
À partir de 1 300/1 400 °C	le béton est en masse fondue

Si une altération de l'ouvrage est visible en surface, on constate qu'elle ne se retrouve pas dans son épaisseur. De fait, la température dans la masse est très inférieure à la température de surface ; elle ne s'élève ni instantanément ni de façon homogène dans les éléments en béton. Celui-ci présente, en effet, une inertie à la propagation du flux de chaleur dans sa masse et la température ne s'y élève que lentement. On se sert de cette qualité pour l'isolation thermique des bâtiments. De plus, l'expérience individuelle permet une compréhension intuitive du phénomène : en été, après une journée d'exposition au soleil, on remarque que la surface extérieure d'un mur en béton est chaude au toucher alors que l'ambiance à l'intérieur de la pièce est restée fraîche si l'on a pris soin de l'occulter. Le flux de chaleur reçu par la face extérieure du mur ne l'a pas traversé intégralement. Cela résulte de la conductivité thermique du matériau.

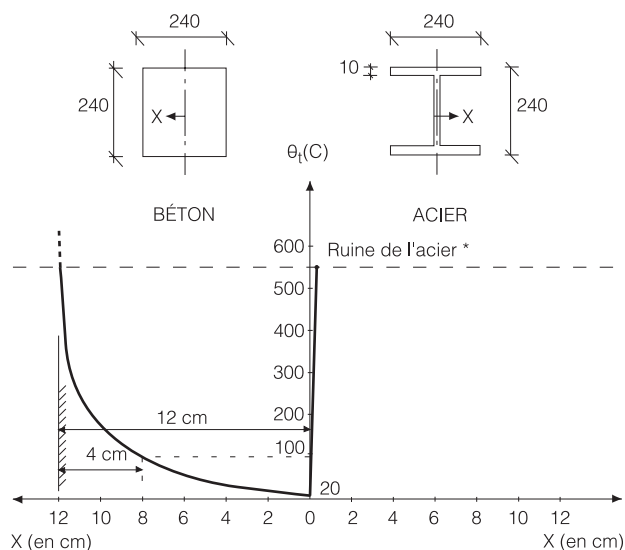
4.2 - Conductivité thermique

Avec une valeur moyenne de 1,5 W/mK, la conductivité thermique l d'un béton courant, ou son aptitude à transmettre les flux de chaleur, est faible. L'essai, décrit ci-après, illustre le phénomène suivant : un poteau en béton et un poteau en acier de 240 x 240 mm sont soumis à un feu ISO (feu de référence pour les essais). On constate que :

- presque instantanément, les différentes parties du profilé acier, peu épaisses et très conductrices de la chaleur, sont portées à 550 °C, température de ruine de l'acier, qui ne présente plus alors de caractéristiques mécaniques significatives ;
- après quinze minutes, la surface du poteau en béton atteint cette même température de 550 °C mais « à cœur », la température est d'environ 20 °C et à 4 cm de la surface, zone où l'on trouve les armatures, elle n'atteint pas 100 °C. Le poteau en béton et ses armatures présentent donc des caractéristiques mécaniques non affectées par l'exposition au feu.

Les armatures du béton armé et du béton précontraint ont un rôle déterminant dans la tenue des ouvrages : elles assurent prioritairement, et presque toujours seules, la résistance à l'état ultime des parties sollicitées en traction-flexion. C'est donc leur comportement aux températures atteintes pendant un incendie qui détermine la tenue de l'ouvrage.

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.

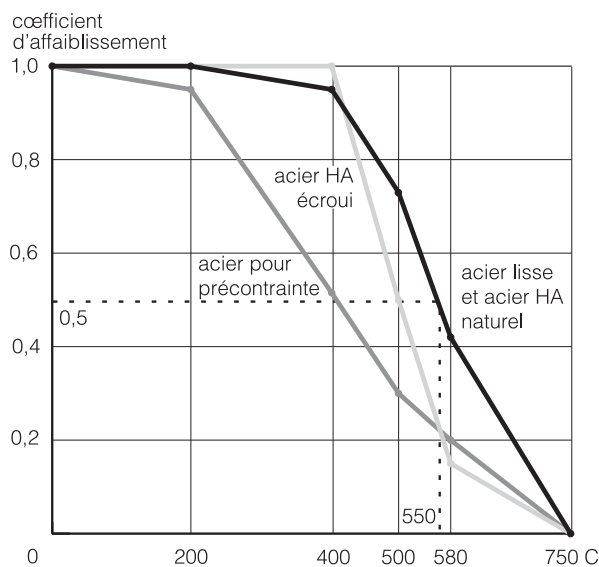
* L'acier a perdu plus de 50 % de sa résistance.

4.3 - Évolution des résistances du béton et de l'acier en fonction de la température

Les évolutions et les altérations du béton en cas de hausse de température, décrites dans le tableau « Comportement du béton en fonction de son échauffement » (voir page précédente), se traduisent entre autres par un affaiblissement de la résistance à la compression du matériau. La résistance reste constante jusqu'à 250 °C puis décroît pour ne plus représenter à 600 °C que 45 % de ce qu'elle était à 20 °C ; elle devient nulle à 1000 °C.

La courbe ci-dessous présente les résultats d'essais montrant cette décroissance pratiquement linéaire de la résistance d'un béton courant à partir de 250 °C. Le fuseau autour de la courbe moyenne exprime principalement les différences de valeurs obtenues suivant la nature des granulats. Les bétons de granulats siliceux se situent en partie basse du fuseau alors que les bétons de granulats calcaires, résistant mieux à la température, en occupent la partie haute.

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

Température θ (°C)	0	200	400	500	580	750
Acier lisse et acier HA naturel	1	1	0,95	0,73	0,42	0
Acier HA écroui	1	1	1	0,50	0,15	0
Acier pour précontrainte	1	0,95	0,515	0,30	0,20	0

(Valeurs retenues par les règles françaises FB.)

Conditions à respecter pour les dalles, les poteaux et les poutres afin d'assurer une résistance au feu donnée (extrait de la norme P 92-701)

Degré de résistance au feu					
1/2 h	1 h	1 h 30	2 h	3 h	4 h

① Dalle		Épaisseur minimale	h + e (en cm)	6	7	9	11	15	17,5
		Sans aciers sur appuis							
		$\frac{M_w + M_e}{2M_0} = 0$	u (en cm)	1	2	3	4	6	8
<p>On opère par interpolation linéaire pour u et $\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$ en fonction de la valeur de $\frac{M_w + M_0}{2M_0}$</p>		$\frac{M_w + M_e}{2M_0} = 0$	$\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$	0	0	0	0	0	0
		Avec aciers sur appuis avec consoles							
		$\frac{M_w + M_e}{2M_0} \geq 0,5$	u (en cm)	1	1,5	2	2,5	3,5	4,5
		$\frac{M_w + M_e}{2M_0} \geq 0,5$	$\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$	0,25	0,3	0,4	20,5	0,55	0,6

② Poteau		a	b	• carré • rectangulaire	a minimum (en cm)	carré	15	20	24	30	36	45
				• carré • rectangulaire	a minimum (en cm)	carré : une face exposée au feu	10	12	14	16	20	26
		interpolation sur l'aire si $1 < \frac{b}{a} < 5$		b = Sa		rectangulaire	10	12	14	16	20	26

③ Poutres												
Épaisseur minimale (h ₂ + e) cm	Entraxe des poutrelles au plus égal à 2,5 m						5	6	8	10	14	16,5
	Entraxe des poutrelles supérieur à 2,5 m						6	7	9	11	15	17,5
	Poutres croisées avec un espacement maximal de 2,5 m dans chaque sens						4	5	7	9	13	15,5
$\frac{M_w + M_e}{2M_0} = 0$	Poutres rectangulaires b minimal en cm						12	16	20	24	32	40
	Poutres à talon b minimal en cm						16	20	24	32	40	50
	b ₀ minimal en cm						8	10	12	14	16	18
	h ₀ minimal en cm						5	8	12	20	32	50
	Nombre minimal de lits inférieurs avec b minimal et avec un nombre minimal de barres par lit de :						2	2	2	3	3	4
$\frac{M_w + M_e}{2M_0} \geq 0,5$	u (en cm) avec b supérieur à la plus grande des 2 valeurs 1 m ou 1,5 h ₁ et avec 10 barres par lit						2,5	4	5,5	6,5	8,0	9,0
	$\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$						2	2	2	4	4	5
	u (en cm) avec b supérieur à la plus grande des deux valeurs 1 m ou 1,5 h ₁ et avec 10 barres par lit						1	2	3	4	5	6
	$\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$						0	0	0	0	0	0
	Poutres rectangulaires b minimal en cm						8	11	14	17	23	29
Poutres à talon b minimal en cm						12	16	20	24	32	40	
b ₀ minimal en cm						8	10	12	14	16	18	
h ₀ minimal en cm						5	8	12	20	32	50	
Nombre minimal de lits inférieurs avec b minimal et avec un nombre minimal de barres de lit de :						2	2	2	3	3	4	
u (en cm) avec b supérieur à la plus grande des deux valeurs 1 m ou 1,5 h ₁ et avec 10 barres par lit						2,5	2,5	3,3	4,0	5,2	9,0	
$\frac{l_{sw} + l_{se}}{l}$						2	2	2	3	3	4	
u _i (en cm)						1	1,5	2	2	3	4,5	
$f_{ci} \leq 0,03 f_{ci}$ ou béton précontraint classes I et II si tout en cadres						0,25	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60	
0,03 f _{ci} ≤ f _u ≤ 0,1 f _{ci} si 40 % au moins en étriers ou épingles						1,5	2	néant	2,5	3	3	4,5
0,1 f _{ci} ≤ f _u ≤ 0,15 f _{ci} il faut au moins 40 % en étriers et épingles						1,5	2	néant	2,5	3	3	3,5

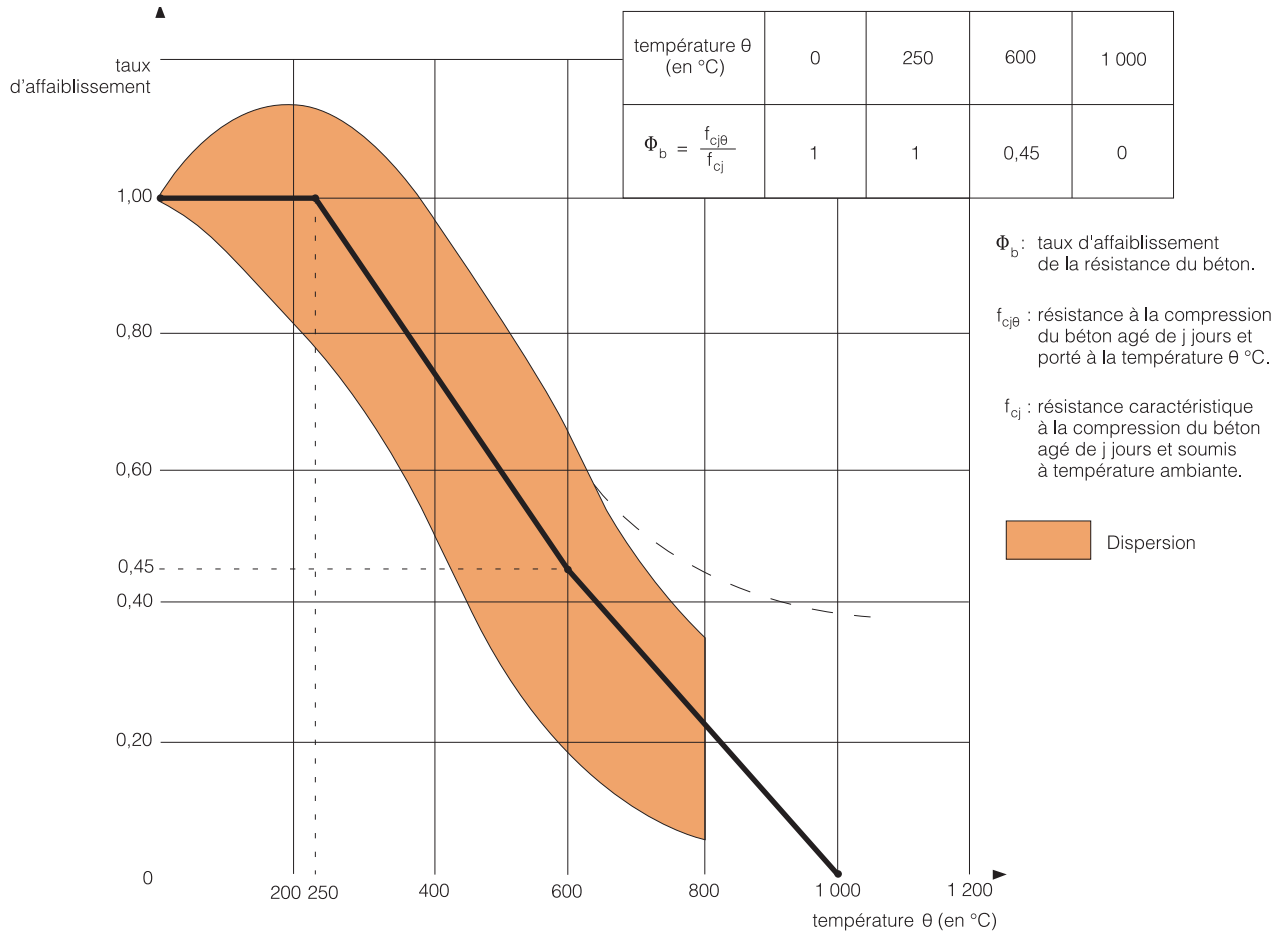
h : épaisseur de la dalle (en cm).

e : épaisseur de la chape et de son revêtement (en cm).

M₀ : moment isostatique sous les charges permanentes et les charges variables.

M_w et M_e : moments de flexion équilibrés par les aciers sur appuis de longueur libre à l'intérieur de la travée considérée l_{sw} et l_{se}. À défaut de prescriptions différentes dans les documents particuliers du marché, ces moments sont plafonnés à la valeur du moment provoqué par les seules charges permanentes, dans le cas où il s'agit de moments de continuité isostatique (console).

Évolution de la résistance à la compression d'un béton courant en fonction de la température (norme P 92-701)



Pour l'acier, on retiendra, d'après les données de la norme P 92-701 « Règles de calcul. Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton (changement de statut du DTU, règle de calcul FB 1987) », que sa résistance à la température décroît à partir de 150 à 200 °C selon les nuances pour devenir nulle à 750 °C. Le tableau ci-dessus donne ces résistances à la température en pourcentages de leur résistance à froid pour trois nuances d'aciers courants. On constate que les aciers pour précontrainte ayant subi un traitement thermique lors de leur fabrication sont plus sensibles à la chaleur que les nuances utilisées pour le béton armé.

En conséquence, il est nécessaire de concevoir l'ouvrage et ses éléments de façon que la température atteinte par les armatures lors d'un incendie reste modérée (de 150 à 200 °C) et conserve à l'acier une résistance suffisante pour maintenir la stabilité pendant le temps requis. De même, il est nécessaire que la section de béton non altérée soit suffisante pour absorber les contraintes développées à l'état ultime de rupture. On adapte alors

l'épaisseur de béton d'enrobage des aciers et l'épaisseur des pièces, en tenant compte de la géométrie des éléments soumis au feu, du principe d'armature et de la nuance d'acier.

La norme P 92-701 définit les conditions à respecter dans ces domaines pour assurer une résistance au feu donnée. Le tableau ci-dessus fournit une synthèse de ces conditions. Par exemple, pour assurer une résistance au feu de deux heures, le recouvrement varie de 2,5 à 4 cm et de 2 à 4 cm, respectivement pour une dalle et pour une poutre en béton armé. Il est de 3 cm pour une poutre en béton précontraint. Pour un même degré de résistance au feu, l'épaisseur minimale des dalles est de 11 cm, celle des poutres rectangulaires de 24 cm. Comme le béton soumis à température va s'échauffer, sa dilatation doit être prise en compte dans la conception des ouvrages et éléments d'ouvrage qui subiront la déformation correspondante. Avec un coefficient de dilatation moyen du béton de 1.10^{-5} , la dilatation d'un ouvrage est de l'ordre de 0,5 % à 500 °C.