
**Essais de résistance au feu —
Lignes directrices sur la conception
statistique des feux de structures**

*Fire resistance tests — Guidelines for computational structural fire
design*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 15657:2013](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013)

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-
895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013)



iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 15657:2013

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2013

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Publié en Suisse

Sommaire

Page

Avant-propos	iv
Introduction	v
1 Domaine d'application	1
2 Principes fondamentaux	1
2.1 Principaux objectifs de la conception de la sécurité incendie	1
2.2 Critères de performances	2
3 Processus de conception	5
3.1 Modèle feu.....	5
3.2 Modèle de transfert thermique.....	6
3.3 Modèle structural	7
3.4 Modèles combinés.....	7
3.5 Propriétés des matériaux.....	9
4 Modèles feu	13
4.1 Feux normalisés (nominiaux).....	14
4.2 Feux naturels	15
4.3 Simulation numérique de feux naturels	Modèles
de zones.....	18
4.4 Flux de chaleur reçu par la structure.....	20
5 Modèles de transferts thermiques pour les calculs des températures	22
5.1 Température uniforme.....	23
5.2 Échauffement non uniforme.....	31
5.3 Équivalent temps.....	35
6 Calcul des structures	39
6.1 Propriétés mécaniques.....	39
6.2 Propriétés thermophysiques.....	56
6.3 Propriétés thermiques des matériaux de protection contre les feux de structures	74
6.4 Méthodes de calcul du comportement aux feux de structures.....	75
Annexe A (informative) Codes nationaux d'ingénierie de sécurité incendie pour le calcul de structures	81
Bibliographie	82

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/CEI, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/CEI, Partie 2, www.iso.org/directives

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou sur la liste ISO des déclarations de brevets reçues, www.iso.org/patents

Les éventuelles appellations commerciales utilisées dans le présent document sont données pour information à l'intention des utilisateurs et ne constituent pas une approbation ou une recommandation.

Le comité chargé de l'élaboration du présent document est l'ISO/TC 92, *Sécurité au feu*, sous-comité SC 2, *Endiguement du feu*.

[ISO/TR 15657:2013](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013>

Introduction

Au cours des dernières années, la communauté scientifique a réalisé des avancées significatives dans la compréhension du comportement au des structures de bâtiments; on assiste à une activité accrue pour l'élaboration de modèles de calcul capables de décrire et de prédire bon nombre d'aspects différents de l'ingénierie de la sécurité incendie.

Ces recherches ont abouti à l'élaboration de codes de conception pour permettre à des ingénieurs de réaliser ce type d'analyse pouvant être appliquée pour se conformer à des exigences prescriptives spécifiées dans des réglementations nationales de construction, ou pour développer des stratégies de sécurité incendie basées sur les performances et impliquant souvent des analyses informatiques complexes.

En particulier, des méthodes d'analyse et des modèles de calcul ont été développés dans les domaines suivants:

- réaction au feu des matériaux;
- croissance du feu dans un compartiment;
- feu de compartiment complètement développé;
- propagation du feu entre bâtiments;
- comportement au feu des éléments porteurs et de séparation et des structures de bâtiments;
- remplissage des enceintes par la fumée et déplacement de la fumée dans les voies d'évacuation et les bâtiments à niveaux multiples;
- l'interaction entre sprinklers et feu, y compris l'interaction entre sprinklers et évacuation des fumées;
- processus d'évacuation; et [ISO/TR 15657:2013](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-11e1b0312345/iso-tr-15657-2013)
- approche systèmes pour la sécurité incendie globale d'un bâtiment, dans sa forme la plus générale, y compris les modèles de développement d'un feu interagissant avec les modèles de réponses humaines.

Les progrès réalisés dans la recherche sur la sécurité incendie ont conduit à des évolutions conséquentes dans le domaine des codes, des spécifications et des recommandations concernant l'ingénierie de sécurité incendie. Certaines tendances caractéristiques de ces évolutions sont énumérées ci-dessous:

- relation améliorée entre essais normalisés et scénarios d'incendies réels;
- utilisation accrue des principes de l'ingénierie de la sécurité incendie pour satisfaire aux exigences fonctionnelles et aux critères basés sur les performances;
- développement de nouvelles méthodes d'essai qui sont, autant que possible, indépendantes des matériaux et liées à des phénomènes et propriétés bien définis;
- application accrue de la conception analytique basée sur la fiabilité;
- usage étendu d'évaluations intégrées; et
- introduction de systèmes d'analyse orientée buts de la protection active et passive totale d'un bâtiment.

L'une des tendances connaissant l'évolution la plus rapide se rapporte à la conception de l'ingénierie contre les feux de structures porteuses et de séparation. Une détermination analytique de la résistance au feu des éléments de structure est en train d'être acceptée de façon plus étendue par les autorités compétentes dans de nombreux pays, comme une alternative aux approches basées sur les spécifications internationales fondées sur les résultats de l'essai normalisé de résistance au feu et à la classification associée.

Une contribution significative à l'analyse des structures de bâtiments en cas d'incendie a été apportée par le développement des Eurocodes structuraux permettant aux ingénieurs techniciens de suivre des procédures de conception approuvées pour l'application dans des états-membres individuels.

Vers le milieu des années 1990, ces codes qui couvraient les «Actions du feu et matériaux de structure individuels (structures en béton, structures en acier, structures mixtes acier et béton, structure en bois, ouvrages en maçonnerie, structures en aluminium)» ont été publiés en tant que prénormes européennes (ENV). Ces codes avaient le statut de «projet pour le développement» et avaient été complétés par des documents d'application nationale (NAD), qui ont permis à des états-membres d'attribuer certains facteurs à un grand nombre de calculs et de variables d'entrée à des fins d'alignement avec l'expérience au niveau national.

Au cours des cinq dernières années, des progrès considérables ont été accomplis pour convertir ces prénormes en codes européens de conception destinés à être appliqués dans les états-membres de la Communauté européenne. Les codes sont à présent divisés en deux parties distinctes:

- **une partie normative**, à laquelle les états-membres sont tenus de se conformer;
- **une partie informative**, habituellement constituée d'une série d'annexes dont l'acceptation est faite de manière volontaire par des états-membres individuels.

En plus, il existe encore une disposition pour appliquer les paramètres individuels déterminés au niveau national (NDP) afin d'assurer un alignement plus étroit avec l'expérience au niveau national. Les interactions entre les Eurocodes sont résumées à la Figure 1.

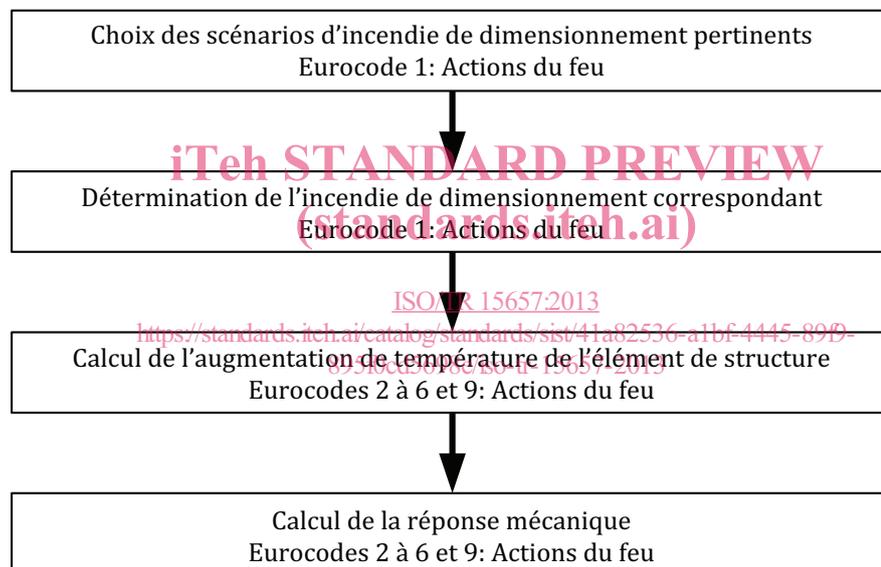


Figure 1 — Interaction entre les Eurocodes structuraux

Les modèles de conception d'ingénierie contre les feux de structures ont été examinés dans la Référence [1] et peuvent être essentiellement présentés sous la forme simple de trois étapes de conception succinctes illustrées à la Figure 2:

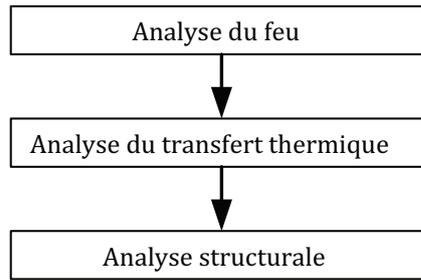


Figure 2 — Trois étapes du calcul du comportement au feu

Le présent Rapport technique examine chacune des étapes ci-dessus sous trois titres distincts. Dans chaque cas, des méthodes appliquées au niveau international pour une conception de l'ingénierie contre les feux de structures sont abordées.

Pour les modèles feu ou les actions thermiques, le rapport aborde les points suivants:

Essais au four:

- selon l'ISO 834: les courbes de combustion de cellulose, de combustion d'hydrocarbure, d'un feu externe et d'un feu couvant.
- courbes d'échauffement d'un feu de tunnel selon le RWS (Pays-Bas) et la courbe nationale française.

Feux naturels:

- feux monozones ou feux paramétriques, dans la mesure où ils peuvent être utilisés de façon normalisée pour des essais normalisés caractéristiques liés à l'occupation. Cela inclut également des relations équivalentes en temps pour quantifier des feux réels au cours d'une période équivalente d'échauffement lors de l'essai de la norme ISO 834.

Pour les modèles de transfert thermique, le rapport étudie les points suivants:

- Transfert thermique pour une distribution uniforme de la température
- Distribution non uniforme de la température pour
 - une dimension
 - deux dimensions
 - trois dimensions.

Pour les modèles structuraux, le rapport aborde les points suivants:

- Analyse d'un élément unique
 - Analyse d'ensemble de cadres secondaires (cadres secondaires et ensemble d'éléments)
 - Analyse structurale globale dans laquelle a lieu une redistribution des charges.

Le rapport étudie également des **modèles mixtes** pour l'analyse thermique et structurale ainsi que les performances du verre, des plastiques et des résines de structure.

Lors de l'étude de modèles structuraux, des propriétés thermophysiques et mécaniques sont présentées pour chaque matériau porteur. Bien qu'elles soient, pour la plupart, destinées à être utilisées dans le calcul de la réponse thermique dans des conditions normalisées d'échauffement au four, les mêmes propriétés seront toujours appropriées pour les feux naturels.

ISO/TR 15657:2013(F)

Le présent Rapport technique fait partie d'une série de Rapports techniques qui fournit des lignes directrices sur les aspects importants des méthodes de calcul de la résistance au feu des structures. Les documents y relatifs comprennent:

- ISO/TR 15655, *Résistance au feu — Essais des propriétés thermophysiques et mécaniques des matériaux aux températures élevées pour la conception de l'ingénierie contre l'incendie*,
- ISO/TR 15656, *Résistance au feu — Lignes directrices pour évaluer l'aptitude des modèles mathématiques à simuler le comportement des feux de structures*, et
- ISO/TR 15658, *Essais de résistance au feu — Lignes directrices pour la conception et la conduite d'essais et de simulations à large échelle non basés sur les fours*.

D'autres documents, produits dans le cadre de l'ISO/TC 92/SC 2, fournissent des données et des informations sur la détermination de la résistance au feu. Ces documents comprennent notamment:

- ISO 834 (toutes les parties), *Essais de résistance au feu — Éléments de construction*,
- ISO/TR 12470, *Essais de résistance au feu — Recommandations pour l'application et l'extrapolation des résultats*,
- ISO/TR 12471, *Conception de calcul des feux de structures — État des travaux des modèles de calcul et d'essais au feu pour la détermination des données de base requises et des besoins du développement ultérieur*, et
- ISO/TR 10158:1991¹⁾, *Principes et analyse servant de base aux méthodes de calcul portant sur la résistance au feu des éléments structuraux*.

ITeH STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 15657:2013](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013>

1) Annulée.

Essais de résistance au feu — Lignes directrices sur la conception statistique des feux de structures

1 Domaine d'application

Le présent Rapport technique donne un aperçu général des progrès réalisés pour comprendre la manière dont structures réagissent au feu. Ce thème est traité en termes de transfert thermique aux éléments de structure principalement à partir de variations de feux (de four) nominaux en ce qui concerne la température élevée, les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux structuraux et de manière dont les informations sont utilisées dans l'analyse d'éléments de structure pour l'état limite du feu. Pour l'examen des scénarios d'incendie, le rapport s'intéresse principalement aux courbes d'échauffement normalisées, mais il inclut la base des courbes caractéristiques qui pourront à l'avenir être adoptée d'une manière normalisée. Une référence est à l'équivalent temps en tant que méthodologie reconnue utilisée pour relier un feu naturel ou caractéristique à une période équivalente d'échauffement dans l'essai au four de l'ISO 834.

Le présent Rapport technique est le résultat de l'élaboration des Eurocodes structuraux destinés à être appliqués par les États membres au sein de la Communauté européenne. Ces codes permettent aux ingénieurs techniciens de suivre des procédures de conception approuvées pour l'application dans des États membres, indépendamment du fait qu'il s'agisse ou non de projets de construction à l'intérieur ou à l'extérieur de leurs propres frontières nationales.

Les codes structuraux actuellement en vigueur au Royaume-Uni et les Eurocodes sont énumérés dans l'[Annexe A](#).

ISO/TR 15657:2013

2 Principes fondamentaux

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-695f0cd5698e/iso-tr-15657-2013>

2.1 Principaux objectifs de la conception de la sécurité incendie

Les principaux objectifs de la conception de la sécurité incendie sont les suivants:

- Sécurité des personnes: exigences réglementaires pour les occupants, les sapeurs-pompiers et les services de sauvetage;
- Protection des biens: exigences réglementaires, communautaires, économiques et concernant les assurances;
- Protection de l'environnement: exigences réglementaires, sociétales, économiques et concernant les assurances;
- Patrimoine: exigences réglementaires et sociétales.

Afin de limiter l'impact des risques d'incendie, les niveaux acceptés sont reflétés dans les codes nationaux de sécurité incendie qui sont généralement exprimés en termes d'exigences et de recommandations. Ces codes préconisent la maîtrise du risque d'allumage, de croissance du feu et d'embrasement généralisé ainsi que de leurs conséquences; ils englobent également les stratégies suivantes:

- a) la réduction du risque d'apparition d'un début de feu;
- b) la maîtrise du feu (chaleur, flammes, fumée et gaz toxiques) à un stade précoce;
- c) la prévision d'une évacuation en toute sécurité des personnes (et éventuellement de biens), ou des lieux de refuge sûrs;

- d) la prévention de la propagation du feu (chaleur, flammes, fumée et gaz toxiques) au-delà d'une certaine zone (compartimentation);
- e) la mise en place de conditions d'intervention sûres et efficaces pour les sapeurs pompiers et les services de sauvetage;
- f) la prévention d'une ruine prématurée de la structure ou la limitation de dommages structuraux par rapport au rétablissement;
- g) la limitation, autant que possible, de l'interruption des activités et des pertes financières;
- h) la limitation, autant que possible, de l'impact sur l'environnement.

La conception de sécurité contre les feux de structures concerne directement les stratégies impliquant les aliéas c) à h) car ceux-ci entrent en jeu si le feu n'est pas maîtrisé dès le début de son développement.

Il convient que le niveau prévu de sécurité contre les feux de structures soit pris en compte en fonction:

- du risque d'apparition d'un départ de feu, qui est considéré comme une situation accidentelle;
- du développement du feu à travers:
 - la géométrie du compartiment;
 - la ventilation;
 - la charge calorifique.
- de la réduction du risque par prise de dispositions au niveau des structures:
 - la conception d'ingénierie;
 - le choix des matériaux;
 - la protection passive.
- la réduction du risque par la mise en œuvre de compartiments ou d'endiguements empêchant la propagation du feu au-delà de la zone délimitée, pendant une durée spécifique. Pour certains bâtiments, un plancher complet peut être considéré comme un seul compartiment.
- la réduction du risque par la mise en œuvre de moyens de protection active (détection, alarme, sprinklers, désenfumage, sapeurs-pompiers).

ITeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 15657:2013
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/41a82536-a1bf-4445-89f9-895f0cd5698e/iso-tr-15657-2013>

2.2 Critères de performances

Le niveau de sécurité contre les feux de structures peut être évalué par des critères de performances en fonction de la stratégie choisie.

Pour les structures porteuses, ces critères sont les suivants:

- la fonction portante pendant toute la durée de l'incendie ou une partie de celle-ci (état limite ultime);
- la limite de l'étendue de la déformation (flèche, déplacement, contraction, allongement) en ce qui concerne l'intégrité des éléments de séparation ou, pour le matériau de protection contre le feu, la capacité de rester fixé à la structure porteuse (état limite de déformation);
- la limite des dommages structuraux (limite des déformations globales et d'autres effets tels que l'écaillage, la corrosion, la carbonisation, se produisant durant les phases d'échauffement et de refroidissement) afin de permettre la réparation du bâtiment après l'incendie (état-limite d'aptitude au service ou à la réutilisation).

Pour les éléments de séparation, ces critères comprennent:

- la limite concernant l'augmentation de température de la surface non exposée (moyenne: + 140 °C, maximale: + 180 °C);
- la limite concernant la fuite de gaz chauds à travers des espaces créés dans l'élément (mouvement de calibre d'ouverture, tampon de coton);
- la limite concernant le rayonnement thermique provenant de la face non exposée (pour les voies d'évacuation, 3 kW/m²).

La peau humaine ne peut supporter un certain niveau de flux de chaleur que pendant un certain temps. Plus le niveau de flux de chaleur incident est élevé et plus le temps d'exposition supportable est court. Certaines valeurs critiques types sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 — Exemples de tolérance humaine et de dommages physiologiques après exposition (à température ambiante) à divers niveaux de flux de chaleur rayonnant incident provenant d'un émetteur distant

Flux de chaleur rayonnant incident kW/m ²	Effet physiologique
1,0	Valeur maximale pour un seuil de tolérance indéterminé
4,0 à 5,0	Valeur suffisante pour provoquer une sensation de douleur chez des personnes, si celles-ci ne peuvent pas se mettre à l'abri dans un délai de 20 s. Apparition probable de cloques sur la peau (brûlures du second degré); Taux de mortalité de 0 %.
10,0	Douleur insupportable au bout de 12 s.
12,5 à 15,0	Taux de mortalité de 1 % en 1 min; première brûlures au bout de 10 s.
25,0	Taux de mortalité de 100 % en 1 min; lésions graves au bout de 10 s.
35 à 37,5	Taux de mortalité de 100 % en 1 min; taux de mortalité de 1 % en 10 s.
41,8	Nécrose de la peau à 0,05 mm de profondeur au bout de 2 s.

Des informations plus détaillées sont données dans la publication «Risk-Informed, Performance Based Industrial Fire Protection» (ISBN 1 -882194-09-8).

D'autres critères peuvent être fondés sur la capacité du flux de chaleur incident à provoquer l'allumage sur différents types de matériaux, comme indiqué dans le Tableau 2.

Tableau 2 — Flux de chaleur rayonnant incident provenant d'un émetteur distant pour l'allumage après 10 min d'exposition à température ambiante

Matériau	Flux de chaleur rayonnant incident kW/m ²
Polystyrène	18
Polyméthacrylate de méthyle	18
Polyéthylène	20
Polypropylène	20
Papier	20
Polychlorure de vinyle	21
Nylon	29
Bois	32

Les critères peuvent également dépendre de l'aptitude de certains types de produits à supporter des températures spécifiques, comme indiqué dans le Tableau 3. Ces valeurs sont uniquement données à titre indicatif.

Tableau 3 — Effet de la température sur les matériaux choisis

Matériaux	Exemples types	Conditions d'endommagement	Température approximative °C
Polystyrène	Récipients alimentaires à paroi fine, mousse, stores, poignées, crochets de rideaux, boîtiers radio	Affaissement Ramollissement Fusion et écoulement	120 120 à 140 150 à 180
Polyéthylène	Sachets, films, bouteilles, seaux, tuyaux	Déformation avec réduction de volume Ramollissement et fusion	120 120 à 140
Polyméthacrylate de méthyle	Poignées, couvercles, lucarnes, «vitrage»	Ramollissement Cloquage	130 à 200 250
PVC	Câbles, tuyaux, revêtements, profilés, poignées, articles ménagers, jouets, bouteilles	Dégradations Dégagement de fumée Coloration brune Carbonisation	100 150 200 400 à 500
Cellulose	Bois, papier, coton	Coloration foncée	200 à 300
Surface peinte - enduit résineux ou peinture à l'huile	-	Détérioration Destruction	100 250
Verre de silicate sodocalcique, recuit	Vitre de fenêtre, portes et vitrage interne	Fissuration due à des gradients thermiques entraînant un décrochage Point de ramollissement Point de fusion	Gradient thermique, en général 160 °C 720 °C 1010 °C
Verre armé	Vitre de fenêtre, portes et vitrage interne	Fissuration comme pour le verre recuit, mais l'armature en fils métalliques maintient les éléments en place	
Verre de silicate sodocalcique, trempé	Vitrage résistant aux chocs	Possibilité de défaillance catalectique soudaine due à un choc thermique important Si l'intégrité est maintenue, on observe un ramollissement comme indiqué plus haut	Gradient thermique situé en général entre 150 °C et 280 °C (voir note)
Verre de silicate sodocalcique, feuilleté	Vitrage de protection et de sécurité, avec intercalaire en polyvinyle de butyral (PVB)	Fissuration des couches de verre qui se comportent comme indiqué plus haut Début de dégradation de la couche organique intercalaire, conduisant à un dégagement de fumée puis à une inflammation	À partir de 180 °C environ Accélération du phénomène à partir de 300 °C environ
Les températures critiques peuvent dépendre de la vitesse d'échauffement. En particulier, les produits en verre dépendent également de l'effet de l'eau ainsi que de l'état de l'encadrement et du verre.			

3 Processus de conception

Afin d'évaluer les performances d'une structure ou d'une partie de celle-ci, l'évaluation doit se dérouler en trois étapes:

Étape 1: Analyse des actions/exposition thermiques – modèle feu

Étape 2: Analyse de la vitesse d'échauffement et des températures atteintes par les composants de structure – modèle de transfert thermique

Étape 3: Analyse des performances mécaniques/capacité portante des éléments – modèle structural

Ces étapes sont décrites comme suit:

3.1 Modèle feu

L'exposition thermique (feu de dimensionnement) est généralement décrite par une relation température-temps, mais elle peut être également décrite par une condition rayonnante incidente dépendante du temps, qui pourrait être simulée par une relation température-temps. Le modèle feu peut donc être un feu (de four) nominal ou un feu simulant un scénario réel, voire un feu expérimental.

La première étape du feu (c'est-à-dire la phase avant embrasement généralisé) est généralement considérée comme l'étape la plus critique pour la vie humaine car c'est au cours de cette étape que sont produits les fumées et les gaz toxiques. Dans le passé, les études sur la résistance aux feux de structures ne prêtaient pas attention à cette phase car, malgré leur criticité pour les êtres humains, les températures atteintes étaient généralement trop faibles pour affecter sérieusement le comportement mécanique d'une structure. Cependant, compte tenu de l'utilisation de plus en plus courante de l'aluminium, des plastiques structuraux et des résines dans des situations où leur tenue au feu peut être critique, il convient de ne pas ignorer les feux avant embrasement généralisé. L'aluminium et/ou les alliages perdent pratiquement toutes leurs propriétés de résistance mécanique à environ 400 °C. Les plastiques structuraux peuvent se carboniser d'une manière très similaire au bois à des températures inférieures à 300 °C.

A l'avenir, il est prévu que les feux avant embrasement généralisé puissent être simulés par un essai au four d'une manière normalisée ou en tant que flux de chaleur rayonnant incident en fonction du temps.

Cependant, lorsqu'un feu se déclare, il n'est pas évident qu'il atteigne un niveau de gravité susceptible de mettre en danger une structure porteuse. Il est nécessaire de prendre en compte une vaste gamme de facteurs tels que des systèmes de détection, des systèmes d'extinction automatique, des interventions de sapeurs-pompiers, etc. (en général par le biais d'une approche probabiliste) afin d'assurer une évaluation plus représentative des conditions d'exposition au feu et de la réaction au feu résultante de la structure.

Le feu de dimensionnement, utilisé pour évaluer la résistance au feu d'un ou plusieurs éléments de structure, peut être basé sur:

- Un feu nominal exprimé par une relation température-temps bien définie. Il s'agit en général d'un essai au four normalisé ayant servi à l'établissement des réglementations nationales, bien qu'il soit principalement utilisé pour classer les produits et les systèmes plutôt que pour refléter la réalité.
- Un feu naturel, basé sur une simple formule ou sur un ensemble de courbes température-temps, en tenant compte des principaux paramètres qui influencent la réponse temps-température dans le compartiment. On parle souvent de modèles feux monozones ou de feux paramétriques qu'il convient d'utiliser dans des géométries de compartiments simples facilement définies.
- Un feu déterminé au moyen de calculs numériques complexes, tels que des modèles multi-zones ou la mécanique des fluides numérique. Ce type d'analyse avancée convient pour les compartiments de très grandes dimensions, les compartiments à géométries complexes et éventuellement les plafonds irréguliers.

Pour une revue plus complète des scénarios de feux de dimensionnement et des feux de dimensionnement, il convient de se reporter à l'ISO/TS 16733.

3.2 Modèle de transfert thermique

L'analyse du transfert thermique a pour objet de déterminer l'augmentation et la distribution de température dans les éléments de structure. Les modèles thermiques sont fondés sur les principes et hypothèses reconnus de la théorie du transfert thermique. Ils peuvent présenter divers niveaux de sophistication selon les hypothèses et les besoins. La complexité des modèles est variable; ils peuvent simplement servir à déterminer une distribution uniforme de la température ou à déterminer des distributions plus complexes de la température dans lesquelles les gradients thermiques peuvent être calculés selon une, deux ou trois directions.

La formulation des problèmes de conduction thermique à l'état transitoire est différente de celle des cas de conduction thermique en régime permanent car les problèmes transitoires impliquent un terme supplémentaire représentant la variation dans le temps du contenu énergétique du milieu. Ce terme supplémentaire apparaît comme une dérivée première de la température par rapport au temps dans l'équation différentielle, et comme une variation du contenu énergétique interne pendant un intervalle de temps Δt , dans la formulation du bilan énergétique. Les nœuds et les éléments de volume dans les problèmes transitoires sont sélectionnés comme dans le cas permanent. Pour des raisons de commodité, on suppose que l'ensemble du transfert thermique se situe dans l'élément.

Le bilan énergétique sur un élément de volume pendant un intervalle de temps Δt peut être exprimé comme suit:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Transfert thermique dans} \\ \text{l'élément de volume de} \\ \text{tous côtés pendant un} \\ \text{intervalle de temps } \Delta t. \\ \sum \dot{Q} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Chaleur générée dans} \\ \text{l'élément de volume} \\ \text{durant un intervalle} \\ \text{de temps } \Delta t. \\ G \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Variation du contenu} \\ \text{énergétique de} \\ \text{l'élément de volume} \\ \text{durant } \Delta t. \\ \Delta E / \Delta t \end{array} \right)$$

ou

$$\sum \dot{Q} + G_{\text{élément}} = \Delta E_{\text{élément}} / \Delta t$$

Le taux de transfert thermique \dot{Q} se compose normalement de termes de conduction pour les nœuds intérieurs, mais il peut impliquer un flux de chaleur (convection et rayonnement) pour les nœuds limites. La somme de \dot{Q} est égale à zéro, sauf aux limites.

Pour les matériaux contenant de l'humidité libre, il convient de prendre en compte l'effet de migration de l'humidité à travers le système afin de fournir une représentation précise de la distribution thermique en fonction du temps. Ce point peut être traité dans le cadre de l'analyse thermique en introduisant le transfert de masse dans le modèle. Lorsque cette approche est utilisée, des informations complémentaires peuvent être fournies dans le domaine de la pression en raison de la formation de vapeur et également pour donner des détails utiles sur les matériaux soumis au phénomène d'écaillage.

3.3 Modèle structural

L'analyse/modèle structural(e), qui est très largement utilisé(e), dépend de la forme structurale étudiée et peut être généralement décrit(e) comme indiqué ci-dessous et illustré à la Figure 3:

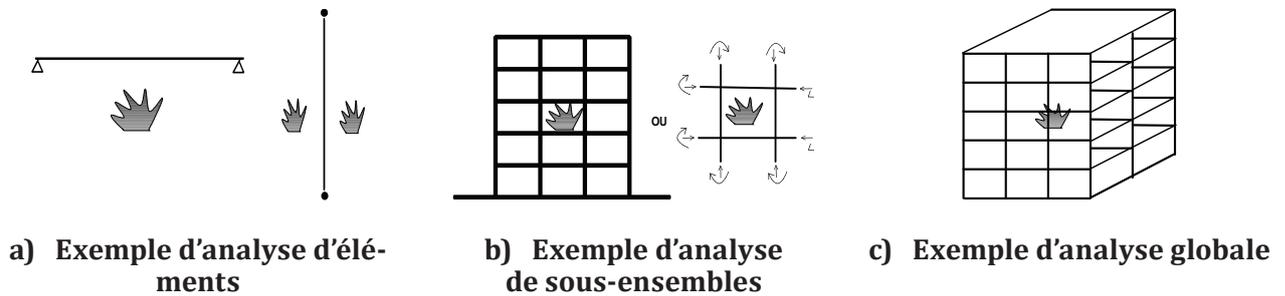


Figure 3 — Exemples de types d'analyses

L'analyse d'éléments uniques (par exemple poutres, piliers, planchers, parois) est habituellement utilisée pour vérifier la conformité aux exigences d'un essai normalisé de résistance au feu, bien qu'elle puisse être utilisée dans de cadre de scénarios de feux réels. Les conditions d'assujettissement au niveau des supports qui prévalent au début d'un essai (instant $t = 0$) restent en général inchangées pendant toute la période d'exposition au feu. Seuls doivent être pris en compte les effets de la déformation thermique résultant des gradients de température créés au travers de la section. Habituellement, les effets de la dilatation thermique ne sont pas pris en compte.

Analyse de sous-ensembles (cadres secondaires et ensemble d'éléments). Les conditions fixées au début d'un essai varieront lors de l'échauffement. En particulier, les forces générées par la dilatation ou la contraction (lors du refroidissement) sont prises en compte ainsi que le transfert de charges vers d'autres parties de la structure lorsqu'un ou plusieurs éléments ont perdu leur capacité portante. Toutefois, les effets d'assujettissement par rapport au reste du cadre, notamment en ce qui concerne les effets de la dilatation et de la ruine locale, ne sont pris en compte que dans une moindre mesure. L'analyse des sous-ensembles peut être effectuée aussi bien dans des scénarios de feu nominal que dans des scénarios de feu réel.

Analyse structurale globale (de l'ensemble de la structure dans laquelle un incendie s'est déclaré). Cette analyse prend en compte les conditions de transfert thermique, les modes de défaillance pertinents, les propriétés des matériaux dépendantes de la température, la rigidité et, le cas échéant, les effets de la dilatation thermique. On considère généralement que la répartition des charges reste inchangée pendant toute la période d'exposition au feu. En général, une analyse globale est effectuée dans des conditions d'échauffement dues à un feu naturel, mais il est également possible que cette analyse soit réalisée dans des conditions d'échauffement au four, bien que les effets de la phase de refroidissement sur la réponse de la structure ne soient normalement pas pris en compte.

3.4 Modèles combinés

L'utilisation des modèles pour le feu, le transfert thermique et l'analyse structurale doit être envisagée selon le niveau de sophistication requis. Le fait d'effectuer une analyse exacte de transfert thermique présente peu d'intérêt si, lorsqu'on arrive à l'analyse structurale, on adopte une approche très grossière, à moins que l'on puisse démontrer qu'un modèle grossier est assez précis pour obtenir les résultats requis.

Il existe certaines combinaisons d'analyse thermique et d'analyse structurale qui ne peuvent servir qu'à des fins de calcul (voir Figure 4).