EVALUATION DE LA CAPACITE PORTANTE D’UNE STRUCTURE EN BETON

AYANT SUBI UN INCENDIE

*Jean-Marc Franssen*

Jm.franssen@ulg.ac.be

Vous êtes appelé comme expert sur un bâtiment en béton qui a subi un incendie.

Première difficulté : bien comprendre la mission qui vous est confiée. Les missions peuvent être diverses.

1. La structure en béton répondait-elle aux normes en vigueur au moment où elle a été construite ?
   1. A-t-elle été conçue conformément aux normes ?
   2. A-t’elle été réalisée conformément aux plans d’exécution ?
2. La structure en béton répond-elle aux normes en vigueur actuellement ?
3. Le caractère fonctionnel de la structure en béton a-t-il été mis à mal par l’incendie ?
4. La structure constitue-t-elle un danger tel qu’il faut la démolir immédiatement ?

La mission a.1 pose la question de la responsabilité du concepteur. Celui qui pose la question veut savoir si les dégâts causés à la structure ne sont pas dus à une conception trop légère. Pour y répondre, il faut se procurer les plans d’exécution, les normes de l’époque de la construction (charges, coefficients de sécurité) et vérifier la capacité portante de la structure qui a été conçue. En principe, on devrait se limiter à l’utilisation des moyens de calculs qui étaient connus à l’époque (pas d’éléments finis par exemple). Il s’agit donc d’un travail qui ne prend pas en compte l’effet de l’incendie mais qui trouve son origine dans le fait qu’un incendie s’est déclaré.

La mission a.2 pose la même question, mais tend à mettre en cause la responsabilité de l’entrepreneur. Pour y répondre, il faut se procurer les plans d’exécution et voir sur place s’ils ont été respectés. On effectuera des mesures de préférence dans les zones qui ont été le moins affectées par l’incendie, puisqu’on veut évaluer la situation avant incendie. On mettra donc en œuvre les méthodes classiques utilisées pour le structures non incendiées : mesure de dimensions (entre-axes d’éléments, dimensions d’éléments, enrobages des armatures, nombre et diamètres des armatures, pliages pour ancrages –surtout pour les étriers -, longueurs d’appuis des hourdis, etc), mesure de propriétés des matériaux (prélèvement de carottes de béton, de barres d’armature, etc.

La mission b nous conduit à prendre en compte en compte les dégradations produites par l’incendie. Elle peut être posée par une autorité quelconque qui doit donner une autorisation avant remise en service.

La mission c est très différente. Elle conditionne en général l’intervention, ou non, de l’assurance incendie. En effet, si la structure était insuffisante avant l’incendie (question a ou b), mais qu’elle n’a pas été dégradée par celui-ci, il n’est pas question que l’assureur paye une mise à niveau de la structure. A l’inverse, si la structure était surabondante, pour quelque raison que ce soit, et que cette « réserve » a disparu du fait de l’incendie, l’assureur devra payer une remise en état, même si la capacité portante de la structure est encore suffisante au regard des normes actuelles. Pour cette mission, les effets de l’incendie sont seuls à prendre en compte.

La mission d est assez semblable à la mission b, mais on est ici plus dans l’urgence. On veut savoir s’il y a un danger immédiat, pour les services de secours, pour les bâtiments voisins. On mettra en œuvre les même techniques que pour la mission b, mais en prenant en compte une situation de faible durée. Parfois, l’urgence est telle que l’ingénieur n’a que son bon sens et son jugement pour prendre une décision qui peut être lourde de conséquences.

Dans ces notes, nous n’envisagerons pas la mission a, car elle n’est pas spécifique à l’incendie. La mission d est un peu semblable à la mission b, car il s’agit d’évaluer la capacité portante résiduelle après l’incendie, avec la différence que le niveau de performance requis est différent.

Il est essentiel de se rendre sur place pour évaluer la situation. Il faut refuser toute mission qui ne permettrait pas une visite des lieux, sauf à assurer un service de prestataire de service dont les limites sont clairement définies.

Pour la visite des lieux, il y a lieu de prévoir des vêtements chauds (selon la saison), car l’incendie a probablement fait éclater des vitres et peut-être même la toiture n’est-elle plus en place. Il faut aussi prévoir que les vêtements vont probablement être salis lors de la visite et que, de toute façon, ils risquent fort de prendre une odeur de brûlé qui nécessitera leur nettoyage. Il convient de porter des chaussures à semelle renforcée, voire des chaussures de sécurité, car on est susceptible de marcher sur les débris les plus divers, même s’ils ne proviennent pas nécessairement de la structure. Le port d’un casque de protection peut être utile. Une bonne lampe de poche est presque toujours nécessaire car il est très probable que le système d’éclairage soit détruit. Les modèles récents qui possèdent plusieurs diodes blanches sont très pratiques car ils dispensent une bonne intensité pour un encombrement réduit et, de plus, la lumière blanche qu’ils émettent met particulièrement bien en lumière les fissures qui se détachent très bien par rapport à la surface qui a été noircie par la suie. Pour inspecter tout ce qui est en hauteur, il faut disposer d’un moyen de levage (disponible seulement en environnement industriel), d’une échelle (permet l’inspection des murs et des colonnes), ou d’une échelle double pour inspecter les dalles de plafonds ou les structures portantes qui ne se trouvent pas près d’un élément vertical.

Juste après le sinistre, l’aspect d’un bâtiment incendié est souvent très impressionnant, par l’amoncellement des débris les plus divers, l’odeur, la couleur noire qu’ont prise toutes les surfaces à cause des dépôts de suie, les vitrages brisés (par l’incendie ou par les services de secours), parfois les dégâts des eaux. Il ne faut pas se laisser impressionner par tous ces aspects car ils n’ont pas nécessairement de conséquence sur la capacité portante de la structure. En fait, les débris nous cachent plutôt la structure qu’ils ne donnent d’indication sur son état. Une évaluation de la structure n’est possible que lorsque les débris ont été évacués. L’état des lieux juste après le sinistre est cependant intéressant car il donne des indications sur la sévérité de l’incendie qui s’est déroule (voir ci-dessous).

L’expert est rarement requis lorsque les dégâts sont très importants car, dans ce cas, il est évident que la structure ne peut plus être utilisée.

Le cas opposé peut cependant se produire ; les dégâts sont inexistants ou quasi nuls mais le propriétaire n’est pas rassuré quand à la stabilité de son bâtiment et il faut pouvoir démontrer la capacité portante (mission b). Il arrive aussi que le propriétaire aimerait que l’assurance remette en état une situation insatisfaisante mais qui n’a pas été créée par l’incendie (mission c). De manière générale, un propriétaire n’est pas très attentif à l’état de la structure de son bâtiment mais, après qu’un incendie se soit produit, il en inspecte les moindres recoins et découvre multitude de petites fissures, de petits éclatements, des flèches dans les poutres et les dalles qui, il en est persuadé, n’existaient pas avant le sinistre. Ce qu’on peut tenir pour certain, sauf à mettre sa bonne foi en doute, c’est qu’il ne les avait jamais remarqués.

Le plus souvent, il faut donner un avis dans des cas intermédiaires ; il y a des dégâts apparents mais on ne sait pas quelles sont leurs conséquences sur la capacité portante.

Tout au long de sa mission, l’expert devra établir une balance entre le coût de ses travaux et des analyses, études et examens qu’il pourrait prescrire d’une part, et la valeur du bien expertisé ou, plutôt, la valeur marginale de la partie de bâtiment sur laquelle porte son intervention. Dès que le coût des études menace de dépasser ou même simplement d’approcher la valeur de ce qui pourrait éventuellement être conservé, il faut en avertir les parties et proposer le remplacement (si c’est techniquement possible).

La stratégie à suivre pour se forger une opinion et rendre un avis peut prendre l’une des deux formes suivantes :

**Première stratégie** : basée uniquement sur l’état des lieux après le sinistre.

On observe l’état de la structure tel qu’il est après le sinistre, sans se préoccuper de ce qu’a pu être le sinistre, et on juge de la capacité portante d’un objet tel qu’il se présente

**Deuxième stratégie** : basée sur la reconstruction du sinistre.

On essaie de reconstruire le sinistre pour en tirer des informations supplémentaires.

On décrira ici les lignes essentielles de la deuxième stratégie car elle contient tous les éléments de la première. Il faut ainsi :

1. Rassembler des informations sur le bâtiment et son contenu tels qu’ils étaient le jour de l’incendie.
2. Rassembler des informations disponibles sur le déroulement de l’incendie.
3. Observer les dégâts occasionnés au contenu (voire à certains éléments structurels).
4. Essayer de reconstruire l’histoire de l’incendie, sa durée, les températures qui ont pu se développer.
5. En tirer les températures qui ont pu se développer dans les éléments structurels.
6. Observer et mesurer les propriétés de la structure après l’incendie.
7. Faire un calcul de la capacité portante avant incendie et/ou après l’incendie.
8. Vérifier si les résultats obtenus en 7 sont cohérents par rapports aux observations faites en 6.

**Rassembler des informations sur le bâtiment et son contenu au jour de l’incendie**

Il faut essayer de savoir quelle était la charge au feu présente dans le compartiment incendié, en quantité et en nature. Est-ce que les combustibles étaient plutôt de type cellulosique, auquel cas leur chaleur de combustion étaient environ de 14 MJ/kg, ou bien plutôt du type hydrocarboné, avec une chaleur de combustion qui peut aller jusqu’à 45 MJ/kg pour de l’essence. La quantité de matière combustible joue aussi un rôle. Si c’est une voiture qui a brûlé, il existe des courbes qui donnent l’évolution de la puissance dégagée au cours de l’incendie, avec une énergie totale dégagée qui est de l’ordre de 6.9 GW. Pour des sources plus limitées (un divan, un appareil de télévision), on trouve des courbes de puissance dégagée dans la littérature, par exemple le SFPE Handbook [A], ou le site du National Institute for Standards and Technology (NIST) aux Etats-Unis. Il peut aussi être utile de se renseigner sur la présence et la nature d’éventuelles cloisons qui peuvent avoir disparu. Cloisons à base de plaques de bois ou de plaques de plâtres ?

**Rassembler des informations** disponibles **sur le déroulement de l’incendie**

Il existe peu d’informations disponibles fiables à ce propos. On peut considérer comme certaines l’heure à laquelle les services de secours ont reçu l’alarme, celle à laquelle ils sont arrivés sur les lieux et celle où ils ont considérés que l’incendie était maitrisé. On peut essayer de connaître le temps qui s’est écoulé entre la découverte de l’incendie et l’appel aux services de secours. Il faut pour cela rencontrer la personne qui a découvert le sinistre. En interrogeant cette personne, il faut être prudent sur la « qualité » des informations reçues. Le temps s’écoule en effet très lentement lorsqu’on attend les services de secours alors qu’il passe très vite tant qu’on est dans l’action. Le fait que des flammes et/ou de la fumée sortaient par telle ou telle ouverte, voire par la toiture, est probablement qualitativement correct. On peut aussi essayer de savoir quelles portes ou fenêtres étaient ouvertes, si elles ont été fermées par le premier intervenant ou pas. Par contre, il est pratiquement impossible d’obtenir des informations quantitatives. Même un incendie très limité peut, selon la nature du combustible, produire des quantités de fumée très importantes et très impressionnantes qui donneront des déclarations comme « Feu d’enfer », « véritable fournaise »etc. Le bruit que peut produire l’incendie n’est pas moins impressionnant et peut conduire inconsciemment à une perception exagérée de la sévérité du sinistre.

Les services d’incendie donneront peut-être des informations plus fiables sur certains points, notamment la production de fumée et/ou de flammes à leur arrivée, mais surtout le fait que telle ouverture dans une fenêtre a été pratiquée par leurs soins lors de l’intervention ou pas. Ils indiqueront s’ils ont pu pénétrer dans le compartiment en feu ou pas. Il ne faut cependant pas accorder une confiance aveugle sur leur perception qualitative du niveau des températures atteintes dans le local. Il est par contre essentiel de recueillir leur témoignage direct. Les témoignages indirects sont à rejeter.

**Observer les dégâts occasionnés au contenu (voire à certains éléments structurels).**

La combustion ou la non combustion de divers éléments formés de matériaux différents dans le compartiment nous renseigne sur le niveau des températures atteintes dans le local. A partir d’une liste de comportements qui servent de marqueur (voir en annexe), on peut ainsi avoir une bonne idée du niveau des températures maximales atteintes. C’est pour comparer le comportement du contenu à cette liste de marqueurs qu’il faut avoir accès au local avant que les débris ne soient évacués et qu’il ne soit remis en état. Si on n’a pas pu effectuer de visite avant la remise en état, il faut essayer de se procurer des photographies prises sur place après le sinistre et, d’ordinaire, il n’en manque pas.

Il peut arriver qu’on observe les traces d’une stratification en deux zones, avec une zone supérieure dans laquelle les dépôts de sui sont nombreux et où les matériaux sont plus endommagés et une zone inférieure beaucoup plus propre et où les matériaux sont quasiment intacts. Cela montre qu’il n’y a pas eu d’embrasement généralisé (pas de *flash-over*), phénomène qui se produit pour des températures de la zone chaude voisines de 500°C. Cela indique aussi que la quantité de fumée produite par le foyer a pu être évacuée par les ouvertures ; elle n’a jamais été suffisante pour remplir complètement le compartiment de fumée.

Si la suie recouvre toutes les surfaces du compartiment y compris en partie inférieure, cela ne signifie pas pour autant nécessairement qu’il y a eu embrasement généralisé, mais simplement que les ouvertures n’étaient pas suffisantes pour évacuer la fumée. Pour juger de l’embrasement généralisé, il faut observer l’état du contenu à la lumière de la liste des marqueurs.

Si des éléments en bois ont subi une carbonisation, cela indique presque certainement une température d’au moins 200 à 300°C. La profondeur de la carbonisation donne des indications sur la durée de l’incendie. On compte une vitesse de carbonisation de l’ordre de 0.6 à 0.7 mm par minute, à partir du moment où elle a commencé, qui n’est pas nécessairement le moment du début de l’incendie.

On peut avoir une idée du niveau des températures à partir du comportement d’éléments structurels simples et dont le comportement est facilement calculable. Ce serait le cas, par exemple, d’une poutre isostatique en acier dont la charge et la limite élastique du matériau seraient connues. On peut cependant se demander si on ne commet pas un sophisme en tenant le raisonnement qui veut que la structure n’a pas été endommagée puisque les températures n’ont pas été très élevées, mais qu’on a juger du niveau des températures à partir des observations faites sur des éléments de structure.

**Reconstruire l’histoire de l’incendie, sa durée, ses températures**

L’exercice consiste à modéliser le compartiment, avec ses parois et avec ses ouvertures, celles-ci ayant éventuellement varié au cours de l’incendie, tout en faisant varier par essais et erreurs la courbe de dégagement de puissance (*Rate of Heat Release*) jusqu’à obtenir une histoire des températures et de la position de la zone chaude qui s’accorde avec les observations. On pourra par exemple utiliser à cet effet le logiciel OZone que l’on peut télécharger gratuitement sur le site du département ArGEnCo de l’Université de Liège.

Si on ne dispose d’aucun marqueur sur le niveau des températures, l’observation d’une zone chaude est très précieuse car, la production de fumée étant liée à la production d’énergie, le fait de retrouver une source qui respecte le niveau de l’interface entre la zone chaude et la zone froide garantit aussi d’une certaine manière que cette source est correcte en terme de puissance dégagée. Il faut pour cela que les informations sur les ouvertures soient correctes.

**Calculer les températures dans les éléments structurels**

Comme la distribution des températures dans les éléments en béton n’est pas uniforme, il est pratiquement nécessaire d’avoir recours à un logiciel de type éléments finis ou différences finies. Le logiciel SAFIR développé à l’Université de Liège peut convenir, mais il en existe d’autres.

**Observer et mesurer les propriétés de la structure après l’incendie.**

La première propriété à mesurer est la configuration géométrique, c’est-à-dire l’état déformé de la structure. En fait, on commence souvent par là car un état de déformation excessif peut justifier à lui seul la démolition de la structure, dans la mesure où il est pratiquement impossible de redresser des éléments en béton déformés. Les instruments sont ;

La règle en aluminium (pour la planéité).

Le niveau d’eau de grande longueur (pour l’horizontalité ou la verticalité)

Le pointeur laser. Ce dernier est très utile pour la mesure des flèches, car il permet de tirer une ligne droite visuelle d’un appui à l’autre d’une poutre ou d’une dalle. La mesure peut se faire par le dessus (plus facile) ou par le dessous. Il est préférable d’avoir un aide pour cette opération. Il est suffisant de mesurer les flèches avec une précision de l’ordre du millimètre.

Le fil à plomb pour mesurer les hors plomb.

En cas de flèche ou de hors plomb dont la valeur n’est pas satisfaisante par rapport aux normes, la difficulté consiste à savoir si cette situation a été créée par l’incendie ou si elle était préexistante.

On cherche aussi des indications sur les propriétés des matériaux.

En ce qui concerne la résistance à la compression du béton, il existe toute une série de méthodes plus ou moins sophistiquées, depuis les mesures de vitesse de passage des ultrasons (prises d’une face à l’autre d’une paroi, ou prises à partir de deux points sur la même face), jusqu’au marteau à sonder. Il faut garder à l’esprit le fait que les propriétés du béton varient fortement suivant la profondeur et que les mesures qui intègrent le comportement sur l’épaisseur ne donnent qu’une indication moyenne. Il en est ainsi de l’essai de compression sur carottes prélevées ou de l’essai in situ réalisé au scléromètre. Pour avoir une idée de la variation suivant l’épaisseur, on peut avoir recours à des essais mécaniques simples mais indirects, comme la mesure de l’énergie de forage en fonction de la profondeur ou la profondeur d’enfoncement de clous tirés en fonction de l’épaisseur de béton préalablement enlevée. Les résultats de ces deux derniers essais sont cependant fortement dépendant du fait que la mesure est faite sur un granulat ou sur de la pâte de ciment. Il faut donc les répéter un grand nombre de fois. De toute façon, quel que soit l’essai réalisé, il est bien difficile d’en déduire de manière certaine une valeur de résistance à la compression. C’est pourquoi on essaiera surtout de procéder par comparaisons entre, d’une part, des zones dont on sait qu’elles n’ont pas été affectées et, d’autres part, les zones à propos desquelles on se pose des questions. Un essai comme celui du scléromètre est ainsi assez révélateur car il est facile à effectuer, non destructif, et intègre non seulement une dégradation de la résistance du matériau, mais aussi une possible fissuration interne.

La résistance des armatures en acier ne peut guère être déterminée que par essai en laboratoire sur échantillons prélevés in situ (attention à ne pas déforcer la structure). Ici aussi, la comparaison avec des échantillons vierges peut être très utile.

**Faire un calcul de la capacité portante avant incendie et/ou après l’incendie**

Toute méthode de calcul est acceptable. Si l’on veut prendre en compte un variation des propriétés du béton en fonction de la distance à la surface exposée, ou si on veut prendre en compte l’effet d’éventuelles déformations géométriques, il est utile de mettre en œuvre un logiciel de calcul non linéaire.

**Vérifier si les résultats obtenus en 7 sont cohérents par rapports aux observations faites en 6**

Si les résultats des calculs effectués donnent des résultats qui ne concordent pas à ce qui a été observé, il faut revoir les hypothèses et recommencer l’ensemble de l’analyse depuis le début.

[A] *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, *fourth edition,* ISBN-13; 978-0-87765-821-4, Natl Fire Protection Ass. ed., Quincy, Massachusetts (2009),

[B]