DIAGNOSTIC D'UN BÉTON DÉGRADÉ PAR INCENDIE

CONTEXTE

Cette procédure traite majoritairement du diagnostic du béton incendié mais aborde également celui des aciers passifs et actifs présents au sein du béton. La recherche des températures atteintes dans le béton est primordiale pour pouvoir évaluer celles auxquelles les aciers ont été exposés de façon à pouvoir estimer leur état de dégradation et la résistance structurale de l'ouvrage après incendie.

L'élévation de la température au sein du béton se traduit par des transformations physico-chimiques et microstructurales pouvant conduire à un changement des propriétés mécaniques et de transfert.

Cette élévation peut conduire également à une modification microstructurale et mécanique des armatures passives et actives présentes dans le béton.

On note entre autres :

- **des effets sur la microstructure** : départ de l'eau libre (80°C), début de la déshydratation des CSH (180-300°C), décomposition de la portlandite (450-550°C), transformation allotropique du quartz (573°C), décarbonatation (700-900°C), etc. Ces transformations se traduisent notamment par une forte augmentation de la porosité du béton. Des gonflements peuvent également se produire lors de la phase de refroidissement, du fait de la réhydratation de certains constituants (CaO ; CaSO4, etc.).
- **une évolution des propriétés mécaniques du béton**, se traduisant habituellement par une chute de la résistance en compression à partir de 200°C du fait de l'apparition d'une microfissuration et de l'augmentation de la porosité. Cet effet est très dépendant de paramètres tels que l'âge du béton, la porosité, la nature minéralogique des granulats, le dosage en ciment, etc.
- **une déformation thermique** due à l'expansion thermique des constituants, au retrait du béton lié à l'évaporation de l'eau libre, aux transformations chimiques et à la détérioration physique des divers constituants.
- **un phénomène d'écaillage du béton**, allant de quelques millimètres à plusieurs centimètres, voire dizaines de centimètres, parfois associé à **des éclatements** d'éléments de structure. Deux phénomènes principaux sont à l'origine de ce type de dégradation : l'apparition d'un gradient thermique entre face exposée et face froide ainsi que les phénomènes d'évaporation/condensation se produisant au sein du réseau poreux.
- **une évolution des propriétés mécaniques des armatures** se traduisant pour des températures modérées par une augmentation possible de la relaxation (cas des armatures actives) et, pour des températures plus élevées, par une dégradation des propriétés mécaniques : diminution du module élastique (accompagnée de pertes de tension pour des armatures actives), de la limite élastique et de la résistance en traction ; y compris après retour à température ambiante.
- **le cas échéant, une rupture d'armatures de précontrainte** : cette rupture est certaine à partir d'une température d'environ 300°C au niveau du câble lui-même et douteuse en dessous, ce qui implique des investigations approfondies sur les ouvrages précontraints.

L'importance de ces dégradations est fonction de paramètres tels que :

- les caractéristiques liées à l'incendie : durée, température atteinte, vitesse de chauffe, circulations d'air, vitesse de refroidissement, modalités d'extinction (poudre ou projection d'eau), etc. ;
- les caractéristiques du matériau : porosité, résistance, saturation en eau, nature physico-chimique des granulats et du ciment, présence de fibres de polypropylène, etc. ;
- les caractéristiques structurelles : géométrie de la pièce, possibilités de diffusion thermique, existence de déformations gênées, etc. ;
- les sollicitations supportées par l'élément concerné ;
- la densité et les caractéristiques des armatures BA et BP mises en œuvre, leur proximité par rapport aux parements atteints, le type de précontrainte (adhérente ou non), etc.

Il convient également de noter qu'un échauffement du béton supérieur à environ 65°C peut générer, même sur du béton mature, une réaction sulfatique interne (RSI).

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

Les interventions sur bétons dégradés par incendie sont en général déclenchées après constat dudit incendie (pompiers, riverains, gendarmerie, etc.). L'identification de la cause des désordres est donc habituellement évidente.

Avant d'appliquer la méthodologie de diagnostic décrite ci-après, une analyse de risques est supposée avoir déjà été faite afin d'évaluer les risques encourus par les personnes et vis-à-vis de la stabilité de la structure. Dans le cas d'un incendie qui a eu lieu, les éléments suivants permettent d'orienter le diagnostic vers ce type de pathologie :

- faïençage ou fissuration localisés ;
- éclatements des bétons peu poreux, délaminage ;
- dépôts de suie ;
- présence de zones décarbonatées (aspect blanc pulvérulent) ;
- apparition du maillage d'armatures ;
- endommagement du caoutchouc des appareils d'appui et des joints de chaussée ;
- etc.

La problématique consiste généralement en une délimitation spatiale des zones affectées et en une quantification de l'épaisseur dégradée, de la résistance du béton et de celle des aciers. Les débris présents après l'incendie et le noircissement de la structure peuvent en effet donner une impression exagérée de la gravité des dégradations. A l'inverse, lorsque la température maximale du foyer n'a pas été élevée mais s'est maintenue longtemps, la profondeur d'endommagement peut être facilement sous-estimée, du fait de l'absence de forte dégradation visible.

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE ET RECUEIL D'INFORMATIONS SUR L'INCENDIE	On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic : – âge de la construction, typologie de l'ouvrage, mode de construction ; – caractéristiques du béton (formulation, résistance en compression, nature et dosage de ciment, rapport E/C, nature et dosage des additions et des adjuvants, type de granulats, présence de fibres de polypropylène, etc.) ; – nature, mode d'élaboration des armatures passives ; – présence et position des armatures passives ainsi que des zones d'ancrage et de recouvrement ; – plans de coffrage, de câblage et de ferraillage ; – présence et position des armatures de précontrainte, type de précontrainte et d'injection ; – fonctionnement de l'ouvrage (déformations thermiques gênées, résistance minimale structurelle des bétons, conditions d'appui vis-à-vis des déformations thermiques) ; – autres dégradations éventuelles sans rapport avec l'incendie liées à des problèmes d'exploitation (écaillage par gel, surcharges, etc.), de conception ou de construction (cure inadaptée, etc.) ; – enduits/revêtements et dispositifs de protection éventuels contre l'incendie ; – réparations antérieures ; – circulation d'air dans les tunnels (interprétation des dépôts de suie, impact sur l'étendue des désordres) ; – rapports d'inspections antérieures ; – informations sur l'incendie : emplacement, durée, température atteinte, nature du combustible, modalités d'extinction, désordres visibles sur des éléments annexes, etc. ; – antécédents d'incendie ; – conditions d'accès aux zones dégradées. Pour quantifier l'intensité de l'incendie, il est nécessaire de recueillir des informations auprès des pompiers, des forces de police ou de gendarmerie et des témoins, notamment sur les caractéristiques de l'incendie : la nature des combustibles (bouteilles de gaz, hydrocarbures, véhicules incendiés, etc.), sa durée, son étendue, la distance de son foyer à la structure, les températures atteintes, les délais d'intervention des pompiers, les modalités d'extinction, etc.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE (PRÉ-DIAGNOSTIC)	Les éléments à relever et à positionner sur le support d'examen sont indiqués dans la liste ci- dessous, par ordre croissant de gravité. 1. dépôts de suies ; 2. zones de coloration, différences de teintes ; 3. écaillage : profondeur moyenne et maximale, étendue relative ; 4. fissures : faciès, orientation, densité, ouvertures moyenne et maximale ; 5. zones de béton sans cohésion ou/et désolidarisé du cœur (repérage au marteau) ; 6. zone d'armatures apparentes : profondeur moyenne et maximale, étendue relative, état des armatures ; 7. perte totale de béton : profondeur moyenne et maximale, présence et état des armatures ; 8. câbles de précontrainte extérieure déformés, voire rompus. Ces relevés sont complétés par des clichés photographiques d'ensemble et de détail. L'attention est attirée sur le fait que les dépôts de suie peuvent masquer une partie des désordres comme, par exemple, les fissures. Un nettoyage des surfaces, après repérage des zones couvertes de suie, est donc fortement recommandé. Un indice de classement des différents faciès de dégradation en terme de gravité est proposé dans le guide « Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie » [1]. Il est impératif d'évaluer le niveau d'endommagement de la structure pour s'assurer de sa stabilité générale et de déterminer la suite à donner au sinistre : fermeture de l'ouvrage, confortement d'urgence, définition d'éventuelles restrictions de circulation, démolition partielle ou totale, réparation ou renforcement, etc. Certaines informations peuvent donner une indication sur la température maximale atteinte et doivent donc être relevées. Il peut s'agir par exemple de : – la nature des combustibles (véhicule, branchages, hydrocarbure, produits chimiques divers, etc.) ;

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE (PRÉ-DIAGNOSTIC)	– la température de fusion ou de combustion des équipements dégradés : aluminium (environ 660°C), pneumatiques, bois, etc. ; – la présence de zones de décarbonatation du béton (aspect blanc, pulvérulent : 700 - 900°C). Il est également conseillé d'analyser le profil en long et l'alignement du dispositif de retenue. L'attention est attirée sur : – le caractère toxique de la combustion de certains produits, et le relargage de produits agressifs pour le béton armé comme les chlorures résultant de la combustion du PVC, nécessité de prendre des précautions particulièrement dans les milieux confinés comme les tunnels ; – les risques de chutes de bétons ou d'équipements dégradés ; – le fait que dans le cas d'ouvrages précontraints, la stabilité de la structure peut être compromise par les dégradations des câbles sans apparition de désordre important ; – le fait que dans le cas de précontrainte extérieure au béton, *a fortiori* si l'injection a été faite au coulis de ciment, la rupture différée de câbles incendiés reste possible et implique de consigner les zones potentiellement concernées par un fouettage des câbles (cf. note n°03 : Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure, Cerema, novembre 2018) [2]. Un examen du dossier d'ouvrage et une visite préliminaire à l'inspection, proprement dite est indispensable pour appréhender les sujétions d'accès et de sécurité
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	**3.1 - Délimitation précise des zones dégradées** Deux méthodes non destructives sont couramment utilisées pour la caractérisation *in situ* de l'étendue des zones dégradées par incendie : la mesure de dureté de surface au scléromètre et l'auscultation sonique. **3.1.1 Détermination de la dureté de surface au scléromètre** Les propriétés mécaniques de surface d'un béton varient lorsque celui-ci est exposé à une température élevée. La mesure de la dureté de surface constitue donc un moyen simple de délimiter les zones dégradées par incendie. Elle présente cependant l'inconvénient de ne caractériser le béton que dans une partie superficielle. La méthode est basée sur l'application de la norme NF EN 12504-2. Les résultats étant très sensibles à la préparation de surface, cette dernière devra être particulièrement soignée pour éviter l'obtention de résultats inexploitables. L'application stricte de cette norme pénalise cependant le diagnostic de grands linéaires en termes de durée. Les essais sont réalisés suivant des lignes s'éloignant du centre des zones visuellement dégradées par l'incendie. Ils doivent aussi se faire sur des zones saines pour obtenir une référence de la dureté de surface avant incendie. Cette méthode n'a pas été conçue pour des bétons dont la résistance en compression dépasse 70 MPa. Elle peut néanmoins être utilisée dans le cadre de mesures comparatives au-delà de cette valeur. **3.1.2 Auscultation sonique** L'auscultation sonique exige un matériel plus sophistiqué et une plus grande expérience dans la pratique de la mesure et dans l'interprétation de ses résultats. Les cadences de mesure sont plus faibles, mais les résultats obtenus sont plus fiables et intéressent une profondeur plus importante de béton. La méthode la plus couramment utilisée pour les diagnostics de bétons dégradés par incendie est la méthode dite « indirecte » (encore appelée méthode de surface), décrite dans la norme NF EN 12504-4. Elle consiste en la réalisation de mesures ponctuelles à partir d'une seule face sur laquelle sont positionnés l'émetteur et le récepteur. Les mesures sont réalisées en zone dégradée, saine et intermédiaire. Elles sont effectuées selon des lignes droites constituées de 5 à 10 points espacés d'une vingtaine de centimètres. L'émetteur est positionné en bout de ligne, le récepteur est déplacé le long de cette ligne de mesure. Les principaux indicateurs intervenant dans l'analyse sont : – la vitesse sonique des ondes de compression dans le béton ; – l'amplitude de l'onde ultrasonore reçue après passage dans le béton et donc son atténuation ; – les coefficients de corrélation obtenus à partir des courbes représentant le temps de parcours et l'amplitude de l'onde en fonction de la distance parcourue ; – l'observation de la forme du signal.

En plus de la cartographie des zones affectées par l'incendie, les informations collectées permettent d'apprécier l'homogénéité des bétons (vides, délaminages, micro-fissuration, zones réputées « saines » mais avec résistances mécaniques anormalement faibles), ce qui peut être utile au diagnostic.

Les vitesses varient de 1 000 m/s pour un béton très affecté à 4 500 m/s et plus pour un béton sain. Dans des zones très ferraillées, les vitesses sont faussées par la présence des aciers. Les atténuations se situent entre 10 et 80 dB/m en fonction de l'endommagement du béton.

3.2 Examen des armatures

L'état des armatures d'une structure en béton peut s'apprécier dans un premier temps à partir des résultats des investigations menées sur le béton. En effet, la détermination des températures maximales atteintes au sein du béton permet d'évaluer à l'aide de différents abaques l'impact de l'incendie sur la résistance ultime et la limite élastique des armatures obtenues après refroidissement. Ces températures maximales atteintes permettent également d'apprécier les pertes de tension des armatures actives et les pertes d'adhérence acier-béton des armatures passives.

L'état des armatures dans l'étendue de la zone affectée par l'incendie peut être estimé à partir de méthodes semi-destructives, ouvertures de fenêtres et observations visuelles ou utilisation de la méthode de l'arbalète pour les armatures de précontrainte.

3.2.1 Cas des armatures passives

Des essais effectués sur des aciers passifs après incendie montrent que les limites élastique et de rupture varient peu et sont presque entièrement retrouvées après refroidissement tant que la température maximale reste inférieure à environ 450 °C pour de l'acier formé à froid et 600 °C pour de l'acier laminé à chaud. Le module quant à lui ne change pas.

Pour des températures plus élevées ou lorsque l'évaluation de la capacité portante résiduelle de l'ouvrage est particulièrement sensible à la résistance des armatures, la réalisation d'essais normalisés (norme NF EN ISO 6892-1) permettant de mesurer les caractéristiques mécaniques usuelles à partir de prélèvement d'armatures passives est alors nécessaire.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

3.2.2 Cas des armatures actives

Les propriétés mécaniques des aciers de précontrainte après refroidissement se détériorent pour des températures maximales atteintes plus faibles (aux alentours de 300 °C) que pour les armatures passives. L'incendie peut avoir des conséquences importantes sur la relaxation des aciers à partir de températures de l'ordre d'une centaine de degrés et selon sa durée. L'examen du coulis d'injection peut, comme pour le béton, renseigner sur les températures atteintes.

Cette dégradation des caractéristiques mécaniques s'accompagne également de pertes de précontrainte résultant principalement de la chute de la limite élastique des armatures et de l'augmentation de la relaxation.

Lorsque l'évaluation de la capacité portante de l'ouvrage est particulièrement sensible à la tension résiduelle des armatures actives intérieures, cette dernière peut être obtenue à partir d'une mesure à l'arbalète (cf. guide technique du LCPC « Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'arbalète ») [3].

Dans le cas de la précontrainte intérieure, la qualité résiduelle de l'injection des câbles doit être évaluée ainsi que les possibilités de ré-ancrage. L'examen de l'état de l'injection renseigne également sur l'intensité de l'incendie au droit des câbles.

Dans le cas de la précontrainte extérieure, l'accession à l'effort d'un câble et son interprétation dans l'évaluation de la capacité portante est un peu plus délicate et se base sur la méthodologie d'évaluation de la tension dans une armature de précontrainte : si la gaine est injectée au coulis, la mesure à l'arbalète est possible. Une approche avec les méthodes vibratoires (méthode des lpc n°35) [4] peut être aussi utilisée pour estimer la tension résiduelle de câbles de précontrainte extérieure présumée dégradée par un incendie.

Rappel : dans le cas de câbles extérieurs injectés au coulis de ciment et potentiellement affectés par l'incendie, des précautions vis-à-vis de la sécurité doivent être prises : voir diagnostic de la précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

3.3.Essais en laboratoire

3.3.1 Détermination de l'état du béton

a) Prélèvements par carottages

Certains essais, destinés à analyser les modifications des propriétés du béton ainsi que les profondeurs de dégradation, ne peuvent être réalisés *in situ*. Il convient alors de prélever des échantillons sur le lieu de l'incendie et de les confier à un laboratoire.

Dans le cas d'un incendie, les essais susceptibles d'être réalisés sont les suivants :

– examens visuels des carottes dès leur prélèvement pour détecter des plans de délaminage ;
– essais mécaniques ;
– détermination de la profondeur dégradée par profil sonique ou par profil au banc gamma ;
– détermination du profil de module d'élasticité avec la profondeur ;
– estimation des températures atteintes dans les bétons à différentes profondeurs.

Certains de ces essais peuvent cependant se révéler inadaptés au béton à étudier. De plus, leur délai d'exécution est en général assez long. La stratégie de leur choix est donc fonction des circonstances et des nécessités particulières à l'établissement du diagnostic et à l'élaboration du projet de réparation.

Les prélèvements doivent être réalisés conformément à la norme NF EN 12504-1 et à la fiche A1-1. D'une manière générale, ils sont répartis sur les différentes parties d'ouvrage et, pour chacun d'eux, dans une zone présumée indemne et dans plusieurs zones endommagées à des degrés divers.

Le carottage ne doit pas porter atteinte à la stabilité ou à la résistance structurelle de l'ouvrage. Une localisation du ferraillage par méthode électromagnétique doit être menée afin d'éviter la présence d'armatures dans les carottes. En cas de présence d'armatures de précontrainte, leur repérage doit être effectué.

Pour les essais mécaniques : le diamètre doit être au moins égal à 3 fois la dimension du plus gros granulat avec un minimum souhaitable de 10 cm. Un élancement de 2 est fortement souhaitable.

Pour les autres essais, les carottes prélevées doivent contenir une épaisseur significative de béton réputé « sain », de manière à pouvoir caractériser sa « variabilité naturelle » et éviter les erreurs d'interprétation liées à la présence d'un béton ayant une mauvaise qualité (problème de fabrication/mise en œuvre) ou une relative hétérogénéité dans ses propriétés (par exemple, cas du béton projeté).

b) Essais mécaniques

Le béton se dégradant à partir de la surface exposée, la méthode habituelle de caractérisation de la résistance mécanique par essai sur carotte prélevée *in situ* est généralement inadaptée car elle donne un résultat trop global non représentatif car obtenu sur un matériau hétérogène (présence de parties saines et dégradées sur une même carotte, avec des épaisseurs variables entre carottes).

Dans le cas de matériaux homogènes (zone saine ou zone dégradée ayant subi un échauffement uniforme), il est possible de réaliser et d'interpréter facilement les résultats d'essais. Les essais doivent alors être conduits conformément à la norme NF EN 12390-3.

Si l'on souhaite utiliser les résultats pour un recalcul de la structure, le nombre de prélèvements et l'interprétation des résultats devront être réalisés en conformité avec la procédure évaluation de la résistance du béton *in situ*.

c) Détermination de l'épaisseur dégradée par profil sonique

La vitesse des ondes de compression évoluant en relation avec le module d'élasticité et la masse volumique du béton, ce paramètre peut être utilisé pour caractériser de manière rapide et simple la profondeur de dégradation à partir de carottes de béton.

L'essai est réalisé sur des carottes de diamètre généralement compris entre 80 et 100 mm, en appliquant la méthode « directe » (émetteur et récepteur de part et d'autre du matériau testé, en vis-à-vis) décrite dans la norme NF EN 12504-4 auscultation sonique des bétons. Les mesures sont réalisées suivant deux diamètres perpendiculaires avec un pas centimétrique. Elles permettent d'obtenir des profils d'évolution du temps de propagation de l'onde en fonction de la profondeur. Les dégradations s'atténuent progressivement depuis la face exposée au feu jusqu'à retrouver le béton sain à une profondeur qui est fonction des caractéristiques de l'incendie et du béton.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

d) Détermination de l'épaisseur dégradée par profil de densité au banc gamma

La transmission des rayons gamma évolue avec la densité du béton traversé par ces rayons. Cet effet peut être utilisé pour caractériser de manière précise la profondeur de dégradation à partir de carottes de béton. L'essai est réalisé sur des carottes de diamètre généralement compris entre 80 et 100 mm. Il permet d'obtenir des profils de densité tous les 5 mm environ

e) Détermination de l'épaisseur dégradée et du module résiduel par fréquence de résonance

Le principe de l'essai repose sur la détermination du module d'élasticité dynamique à partir de la mesure de la fréquence propre de résonance de disques obtenus par sciage en tranches successives de carottes prélevées dans l'ouvrage (Mesure du module d'Young dynamique des bétons). Ces mesures permettent de dresser son profil de module d'élasticité, depuis le parement jusqu'au cœur de la structure.

La phase délicate correspondant aux opérations de sciage doit être réalisée avec beaucoup de soin, de manière à obtenir des disques à faces bien parallèles et aux bords non ébréchés. L'essai est habituellement réalisé sur des carottes ayant un diamètre compris entre 80 et 100 mm. Après pesée et mesures dimensionnelles, les disques sont mis en vibration de manière à pouvoir déterminer leur fréquence propre de résonance. Il est alors possible de déterminer le module d'élasticité dynamique de chaque disque.

f) Détermination de la température atteinte

Généralités

Les constatations *in situ* ne permettent d'obtenir qu'une estimation très grossière de la température atteinte. Seules les techniques d'analyse fines de laboratoire ou de modélisation thermique avancée permettent d'avoir une évaluation raisonnable de la température atteinte au cœur du béton.

Trois méthodes de laboratoire ont fait leurs preuves : la microscopie électronique à balayage, l'analyse thermique et la diffractométrie à rayons X. Leur utilisation requiert la compétence de personnel spécialisé, possédant une bonne expérience de la physico-chimie des bétons et de leur microstructure. L'utilisation d'une seule méthode risquant d'entraîner une vision tronquée ou erronée de la microstructure du béton, il est préférable de les utiliser de manière couplée.

Chaque béton ayant sa propre minéralogie, la comparaison avec un échantillon, provenant d'une zone non soumise à un incendie, est indispensable. Elle donne des informations sur les minéraux présents dans le béton n'ayant pas subi d'échauffement et permet de déterminer les phases minérales disparues ou apparues du fait de l'échauffement.

Un profil de diffusion de la chaleur dans les bétons peut être obtenu en examinant des échantillons prélevés à différents niveaux de profondeur des carottes issues de l'ouvrage.

Microscopie électronique à balayage

Cet essai repose sur l'identification de paliers de températures associés à des modifications texturales (i.e. retrait/dilatation des constituants du béton) ou à des transformations de certaines phases minérales dues par exemple à des recristallisations après un cycle de chauffage suivi d'une éventuelle ré-humidification. Ces modifications se produisant à des températures connues, il est possible d'identifier les températures atteintes dans le béton.

Deux méthodes de préparation des échantillons sont nécessaires :

– des cassures fraîches, obtenues par fracture au marteau, afin de préserver l'apparence et l'agencement des minéraux constitutifs du matériau ;
– des fragments de béton prélevés par sciage, imprégnés de résine puis polis jusqu'au micromètre, de manière à observer la microfissuration du matériau sans générer d'artefact.

Analyse thermique

Cet essai permet d'identifier, voire de quantifier, des phases solides présentes dans le béton après une exposition à un incendie. Il peut s'agir de minéraux initialement contenus dans le béton ou de produits résultant de modifications chimiques et minéralogiques consécutives à une élévation de température. Dans les deux cas, la présence ou l'absence de phases solides donne une indication sur la température atteinte dans le matériau. Il est souhaitable d'associer en parallèle une détermination de la silice soluble du béton afin de connaître précisément son dosage en ciment.

ÉTAPE 3 AUSCULTATION	*Diffractométrie à rayons X* Cet essai permet d'identifier les minéraux cristallisés présents dans le béton. Il peut s'agir de minéraux initialement contenus dans le béton ou de produits résultant de modifications chimiques et minéralogiques consécutives à une élévation de température. La présence ou l'absence de certains minéraux donne alors une information sur la température à laquelle le béton a été soumis. **3.2.2 Détermination de l'état des armatures actives ou passives** Dans le cas de câbles incendiés, des prélèvements de fils peuvent être nécessaires pour pratiquer des essais de laboratoire. La métallographie permet de connaitre l'état microstructural des aciers et de savoir si des changements ou des évolutions de microstructure sont intervenus ou non. Des essais de traction sont utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques résiduelles des armatures. En outre, pour les armatures de précontrainte, il peut être intéressant d'étudier la composition chimique et la dureté.
ÉTAPE 3 ANALYSE STRUCTURALE	Cette étape est pour mémoire et n'est pas développée en détail dans le cadre de cette fiche. Selon l'endommagement de la structure, un recalcul tenant compte des réductions de section de béton et de l'état des armatures (caractéristiques mécaniques résiduelles des armatures passives, perte éventuelle de précontrainte) peut être effectué. Le guide méthodologique « Résistance à l'incendie des ponts routiers » [5] traite de cet aspect.

RÉFÉRENTIEL

1] LCPC (2005). Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai LPC n° 62, 114p.

[2] CEREMA (2018) : Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure, note d'information Ouvrages d'art n°03, 14p.

[3] LCPC (2009). Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'arbalète. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique GTARBA, 23p.

[4] LCPC (1993). Mesure de la tension des câbles par vibration. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai LPC n° 35, 14p.

[5] CEREMA (2018). Résistance à l'incendie des ponts routiers. Collection Références, Guide méthodologique, 156p.

Liste des méthodes d'auscultation

A1-1 : Carottage de béton

A1-2 : Analyse minéralogique du béton

A1–5 : Mesure du Module d'Young dynamique des bétons

A2-1 : Examen métallographique et fractographique

B1-1 : Mesures au scléromètre

B1-2 : Auscultation sonique des bétons

C4-2 : Estimation de la tension des câbles par méthode vibratoire

C4-3 : Mesure de la tension des câbles et armatures de précontrainte au moyen de l'arbalète

Liste des méthodologies de diagnostic

D1-7 : Evaluation de la résistance du béton *in situ*

E2-4 : Diagnostic de la précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures

E2-5 : Évaluation de la tension dans une armature de précontrainte

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre.

Évaluation du niveau de risque (avant intervention)

impact structurel, risques pour les usagers (piétons,etc.),
risque de chutes de matériaux sur la voie franchie, etc.

Étape 1 — Analyse du dossier d'ouvrage

Formule de béton, fonctionnement de l'ouvrage,
emplacement des armatures, présence de précontrainte, désordres antérieurs, etc.

Recueil d'informations sur l'incendie : durée, type de combustible, modalités d'extinction, etc.

Étape 2 — Inspection detaillee

Aspect des parements :

- dépôts de suies,
- zones de colorations/maillages d'armatures,
- écaillage/délaminage/perte de cohésion,
- fissuration,
- etc.

Détermination des classes de désordre

Indicateurs de la température atteinte :

- nature des combustibles,
- état des équipements,
- présence de béton décarbonaté,
- etc.

Étape 3 — Auscultation

1. Délimitation des zones in situ

en surface :

- sclérométrie et/ou
- auscultation sonique

en profondeur :

- profils soniques et/ou
- profils de fréquence de résonance et/ou
- profils de densité

examen des armatures :

- état des aciers passifs
- état des armatures actives
- qualité résiduelle des injections

2. Essais de laboratoire

caractéristiques résiduelles du béton

- résistance en compression et/ou
- profils de module d'élasticité dynamique

caractéristiques résiduelles des aciers

- métallographie et/ou
- essais de traction et/ou
- composition chimique, dureté (précontrainte)

information complémentaire :

évaluation de la température atteinte

- microscopie électronique à balayage
- analyse thermique
- diffractométrie à rayons X

Analyse structurale

Recalcul éventuel de la structure