



Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques,
l'environnement, la mobilité et l'aménagement



Journée technique

Auscultation et diagnostic des ouvrages d'art

Incendie : Exemple du pont de Piquet à Etreilles (CD35)

Benoit THAUVIN, Patrick LE ROY, Pascal BOULAIRE, Cerema Ouest

Département Laboratoire de Saint-Brieuc

Bertrand Veillard, Conseil Départemental d'Ile et Vilaine

Service Ouvrages d'Art



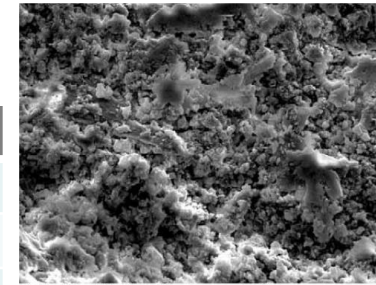
• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

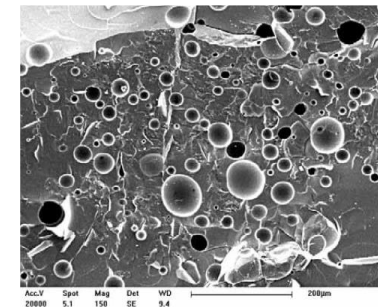
• Effets sur la microstructure du béton

- Départ de l'eau (liée) => **Augmentation de la porosité**
- Transformation des granulats
- Réactions physico-chimiques

Température	Phénomène
Jusqu'à 80	Départ de l'eau libre
A partir de 80	L'eau liée chimiquement commence à s'évaporer
Jusqu'à 300	Déshydratation des C-S-H
Entre 450 et 550	Décomposition de la portlandite
573	Fissuration des granulats siliceux
700 - 900	Décarbonatation
A partir de 1100 - 1200	Fusion de certains agrégats et de la pâte de ciment



Aspect normal d'une pâte de ciment n'ayant pas subi d'échauffement (image MEB, x400)



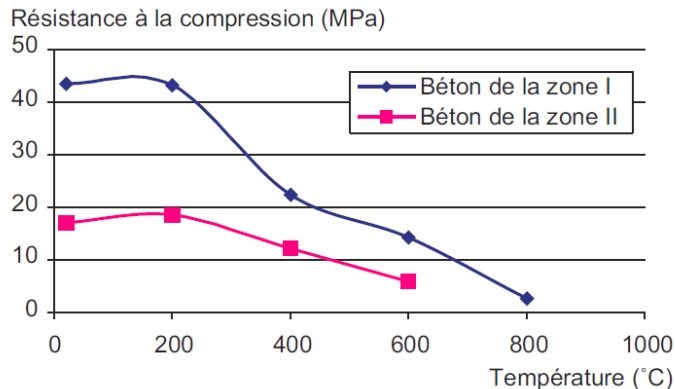
Matrice cimentaire vitreuse, macroporosité importante : fusion et refroidissement de la pâte de ciment ($T > 1000$) (image MEB, x150)



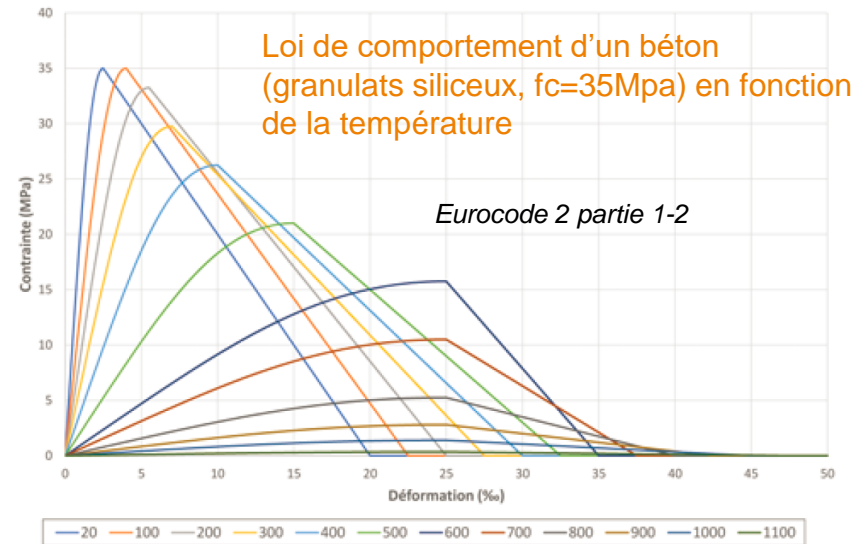
• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

- Effets sur les propriétés mécaniques du béton
 - Chute de la résistance en compression (à partir de $T=200$)
 - » Fonction de la composition du béton
 - » Fonction de la vitesse d'échauffement et de refroidissement
 - Explication : dilatation thermique, apparition de micro-fissuration, augmentation de la porosité



Evolution de la résistance en compression des bétons du tunnel du Mont-Blanc en fonction de la température



• Déformation thermique :

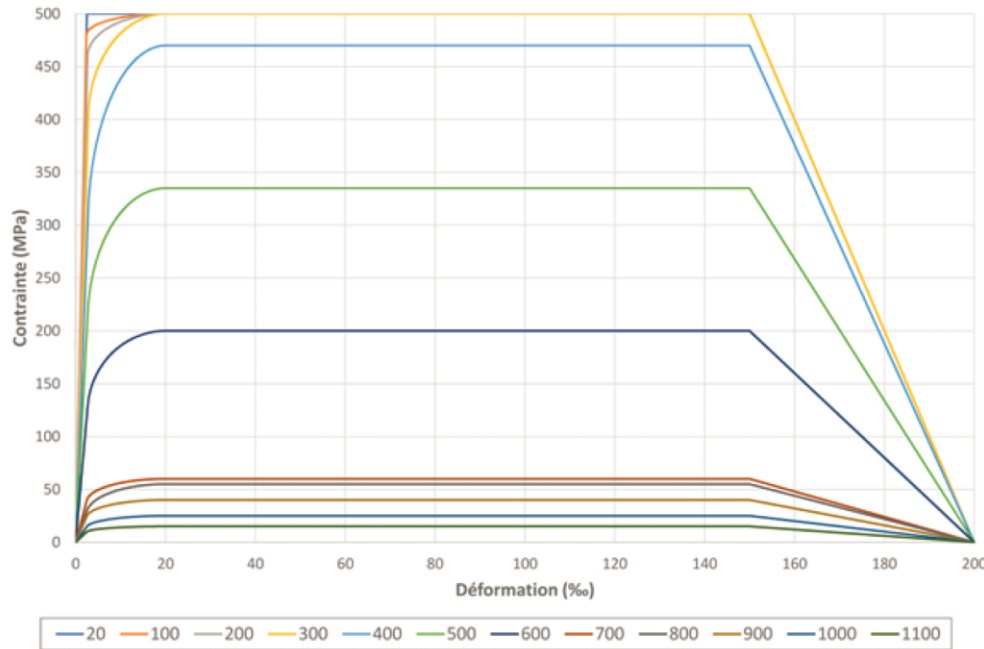
- Expansion thermique des constituants, retrait du béton (évaporation), etc.



• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

- Effets sur les propriétés mécaniques des armatures passives
 - Diminution de la limite élastique, de la résistance en traction
 - Diminution du module de déformation
 - Augmentation de l'allongement à rupture



Loi de comportement d'un acier formé à froid de classe N en fonction de la température

Eurocode 2 partie 1-2

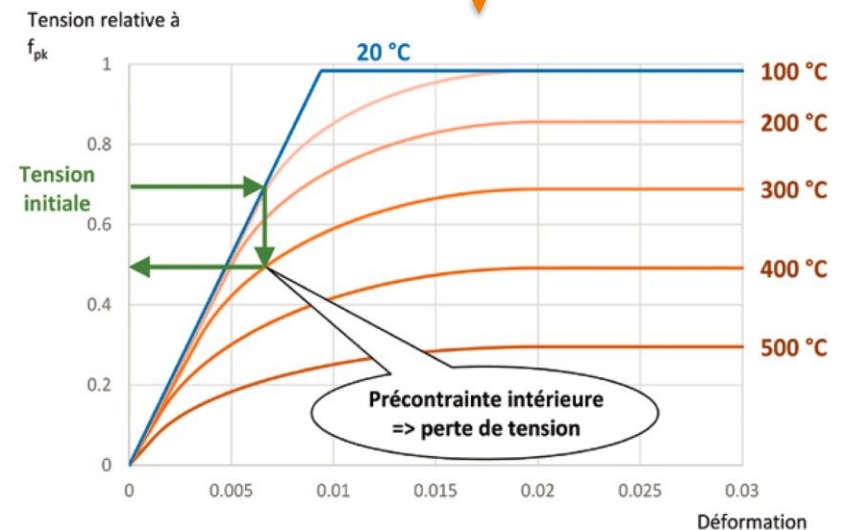
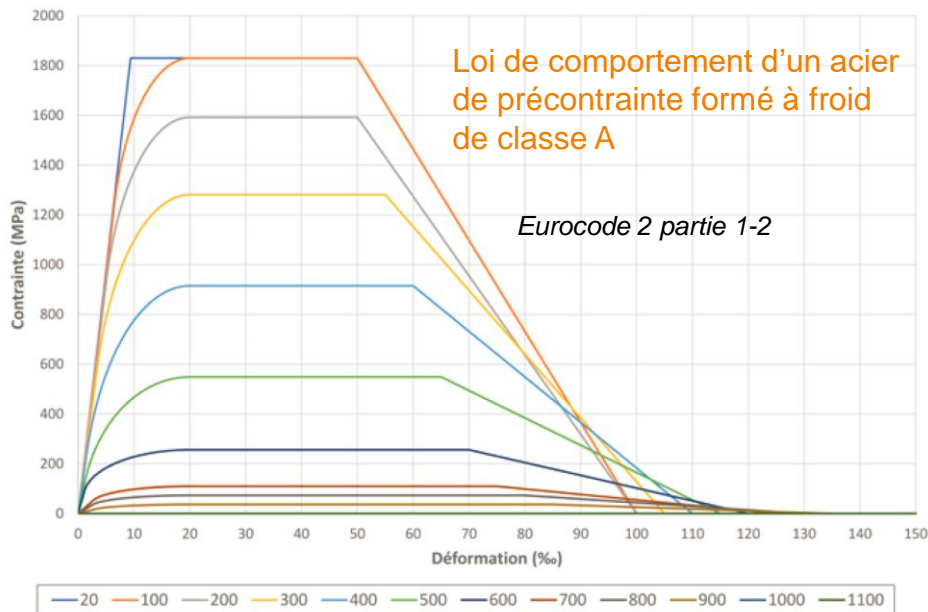


• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

• Effets sur les propriétés mécaniques des armatures actives

- Diminution de la limite élastique, de la résistance en traction
- Diminution du module de déformation
- Augmentation de la relaxation
- Perte de tension
- Ruptures d'armature possible à partir de 300° C (précontrainte extérieure)



Effet d'une augmentation de température sur la tension dans les armatures de précontrainte



• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

• Effets sur le comportement structurel

– Modification de la loi de comportement contrainte-déformation :

» Limite élastique, résistance à la rupture, module de déformation

» Baisse de la résistance, augmentation de la souplesse => **plus ductiles**

– Modification des caractéristiques des modèles mécaniques (masse volumique, coefficient de dilatation thermique)

⇒ **Csq semi-globales (comport. des sections de poutres et des dalles)**

⇒ **Csq globales (comport. d'ensemble du pont : redistribution ...)**

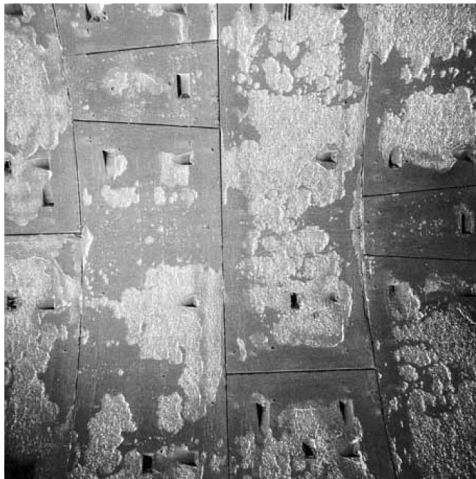


• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Phénomènes

• Symptômes

- Détachement d'écailles (de qlq mm à qlq cm)
- Eclatement de plus gros éléments
 - » Intensité fonction de la sollicitation thermique, de la forme de la pièce, de la densité d'armatures, de la composition et de la porosité
- Explications : Gradients de dilatation thermique, gradients de pression de vapeur d'eau



Ecaillage superficiel



Ecaillage superficiel



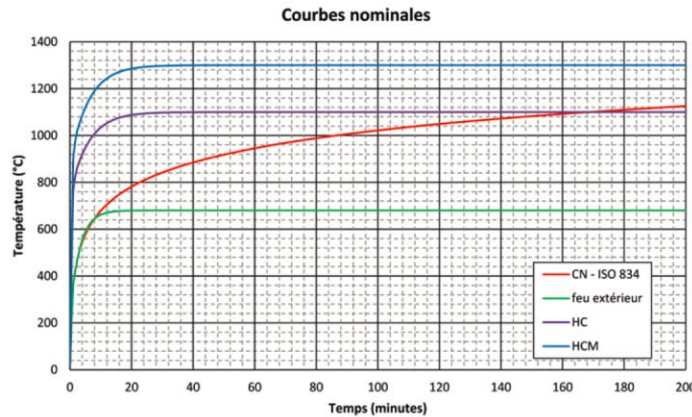
Eclatement du béton laissant apparaître les armatures



• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

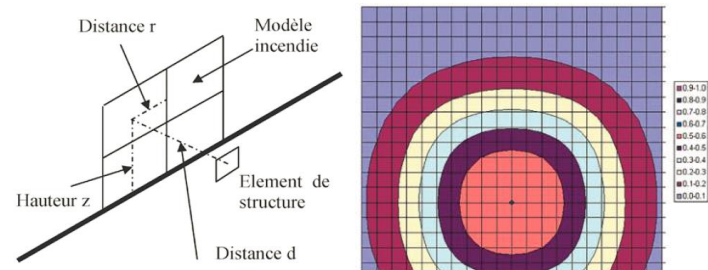
– Caractérisation du feu et de ses effets

• Courbes normalisées températures-temps



- CN-ISO834 (Eurocode 1-1-2) : adaptée aux incendies sur ou sous les ponts
- HC : feux d'hydrocarbures
- HCM : Cas exceptionnel, tunnels

- **Transfert de chaleur à la structure** (convection, rayonnement, facteur de forme)



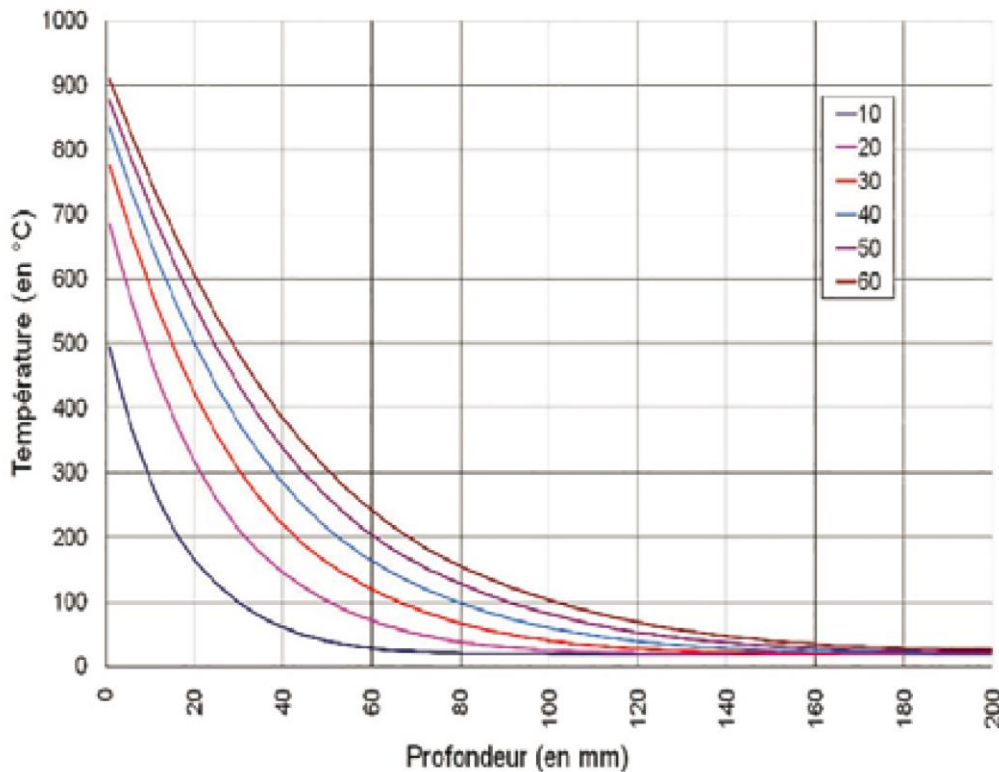
- **Effets thermiques dans la structure** (chaleur spécifique, conductivité thermique du matériau)



• Incendie sur ou sous les ouvrages d'art

– Caractérisation du feu et de ses effets

- Exemple pour une dalle en béton soumis à un incendie selon la courbe CN-ISO834



- Abaque utilisable en diagnostic
- Faible conductivité thermique du béton : en général seuls les 10 premiers cm sont chauffés
- Prise en compte de l'écaillage : profondeur par rapport au parement écaillé (approche sécuritaire)



• Démarche de diagnostic

– Principe général

- Caractérisation de l'endommagement
- Recherche des températures atteintes dans le béton et au niveau des armatures

=> **Evaluer les risques encourus par les usagers et vis-à-vis de la stabilité de la structure**

DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DES MATÉRIEAUX BÉTON

D1-4

DIAGNOSTIC D'UN BÉTON DÉGRADÉ PAR INCENDIE

CONTEXTE

Cette procédure traite principalement 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 structurelle de l'ouvrage après incendie.

L'évaluation 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 évaluation 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), état de la déshydratation des CSH (180-300°C), décomposition de la portlandite (450-550°C), transformation aluminique du quartz (579°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 composés (CSH, 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'évaporation d'une réhydratation 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 transformation physique des divers constituants ;
- **un phénomène d'écailage de béton**, allant de quelques millimètres à plusieurs centimètres, voire d'éclats 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 opposée ainsi que les phénomènes d'expansion/contraction se produisant au sein du béton poreux ;
- **une évolution des propriétés mécaniques des armatures** se traduisant par des températures modérées par une augmentation possible de la résistance (en cas d'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 de la résistance en traction ; et parfois même rupture à température ambiante ;
- **le cas échéant, une rupture d'armatures de précontrainte** : celle-ci rupture est certaine à partir d'une température d'environ 300°C au niveau du câble (la même et double en dessous, ce qui implique des investigations approfondies sur les saignées précontraintes).

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

- les caractéristiques liées à l'incendie : durée, température atteinte, vitesse de chauffage, circulation d'air, vitesse de refroidissement, humidité relative (sèche 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, possibilité de diffusion thermique, existence de déformations globales, 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 (latérale ou non), etc.

Il convient également de noter qu'un écaillage du béton supérieur à environ 65°C peut gêner, 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 d'incidents (pompiers, riverains, gonflements, etc.). L'identification de la cause des dommages est donc habituellement évidente.

Avant d'appliquer la méthodologie de diagnostic décrite ci-après, une analyse de risques est suggérée afin d'évaluer si elle fait état d'effets les risques encourus par les personnes et le cas 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 :

- bruyance ou fissuration localisée ;
- éclatements des bétons peu poreux, délaminage ;
- dégrèlage de surface ;
- présence de zones décarbonatées (aspect blanc pulvérulent) ;
- apparition de mailles d'armatures ;
- endommagement du caudage/des appuis/d'appui et des joints de chauxage ;
- etc.

Les collections de l'Ifsttar

Janvier 2019 - page 1

La problématique consiste généralement en une délimitation spatiale des zones affectées et en une quantification de l'exposition dégradable, de la résistance du béton et de celle des aciers. Les effets présents après l'incendie et le vieillissement de la structure peuvent en effet donner une impression erronée de la qualité des dégradations. À l'inverse, lorsque la température maximale du foyer n'a pas été élevée mais s'est maintenue longtemps, la profondeur d'endommagement peut être faiblement sous-estimée, du fait de l'absence de forte dégradation visible.

On identifie 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 du ciment, rapport E/C, nature et dosage des additifs et des adjuvants, type de granulats, présence de fibres de polypropylène, etc.) ;
- nature, mode d'isolation des armatures passives ;
- présence et position des armatures passives ainsi que des zones d'encadrement et de renforcement ;
- plans de coffrage, de dosage et de transfert ;
- présence et position des armatures de précontrainte, type de précontrainte et d'application ;
- fonctionnement de l'ouvrage (déformations thermiques globales, résistance minimale du caudage des bétons, conditions d'appui ou à la délimitation thermique) ;
- autres dégradations éventuelles sans rapport avec l'incendie liées à des problèmes d'entretien (dégâts par gel, surcharge, etc.), de conception ou de construction (zone inadaptée, etc.) ;
- réparations antérieures ;
- circulation d'air dans les tunnels (interprétation des débits de suie, impact sur l'intensité des dommages) ;
- supports d'incendies préexistants ;
- informations sur l'incendie : emplacement, durée, température atteinte, nature du combustible, modalités d'extinction, données visibles sur des éléments amovibles, 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 indépendamment des bétons, notamment sur les caractéristiques de l'incendie : la nature des combustibles (bouteilles de gaz, hydrocarbures, véhicules incendies, etc.), la durée, son déroulement, la distance de son foyer à la structure, les températures atteintes, les délais d'intervention des pompiers, les modalités d'extinction, etc.

Les éléments à relever et à positionner sur le support d'examens sont indiqués dans le tableau ci-dessous, par ordre croissant de gravité :

1. Débits de suie ;
2. Zones de coloration, différences de teintes ;
3. Écaillage, profonds rayures et dommages de surface ;
4. Fissures : factes, orientées, dorsales, soudures (régimes et maximale) ;
5. Zones de béton sans confinement (dilatation du cœur (regainage ou régainage)) ;
6. Zones d'armatures apparentes : profonds rayures et dommages, fissures latérales, état des armatures ;
7. Profils latéraux de béton : profondeur moyenne et maximale, présence et état des armatures ;
8. Câbles de précontrainte endommagés, voire rompus.

Ces relevés sont complétés par des clichés photographiques d'éléments et de détail.

L'objectif est alors de noter sur le tableau que les débits de suie peuvent mesurer une partie des dommages, par exemple, les fissures. Un relevage aux surfaces, selon le schéma des zones couvertes de suie, est donc fortement recommandé.

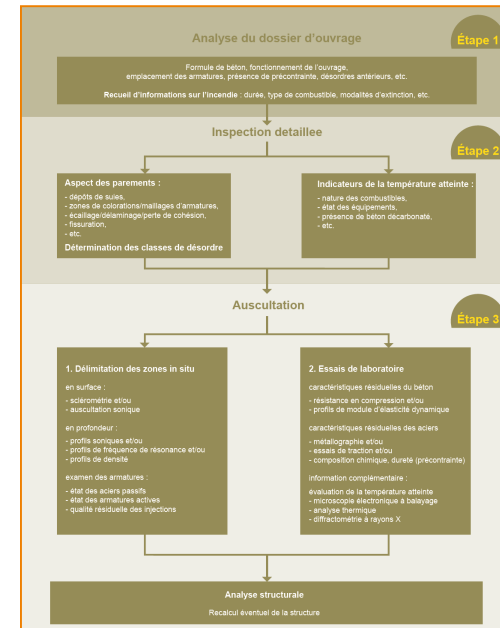
Les notes de classement des différents types de dégradation en termes de gravité est présentée dans la grille. La présentation des techniques de diagnostic, de l'état d'un béton (notamment un incendie) (1) et l'état d'appréhension de l'état d'endommagement de la structure pour assurer de la stabilité globale et de déterminer la suite à donner (notamment la formation d'un plan de dégradation) (2) sont détaillées dans les annexes (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 (véhicules, branches, hydrocarbures, produits chimiques divers, etc.) ;

Les collections de l'Ifsttar

Janvier 2019 - page 2





- **Démarche de diagnostic**
 - **Déclinaison sur le pont Piquet à Etreilles**





- **Démarche de diagnostic**
 - **Analyse du dossier d'ouvrage**

Analyse du dossier d'ouvrage

Étape 1

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.



• Démarche de diagnostic

– Recueil d'informations sur l'incendie

- Localisation de l'incendie (tracteur du camion) : voie rapide sous la travée T2 au droit de la pile P3
- 2h29 : heure de l'accident
- 2h50 : les flammes dépassent le tablier de 3 m environ – les pompiers (Vitré et Argentré) sont déjà en intervention sur site
- 3h03 : arrivée des pompiers de St-Servon - les flammes sont rabattues sous le tablier

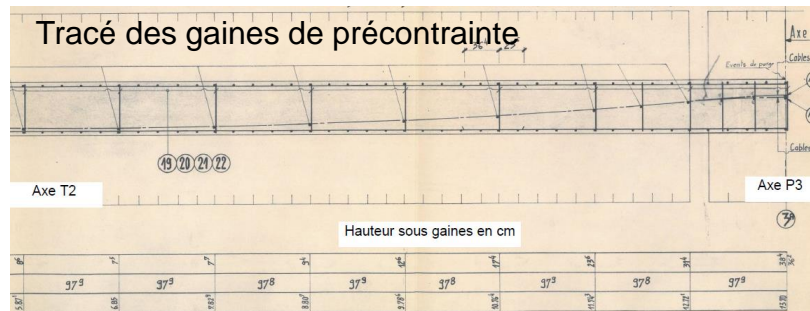
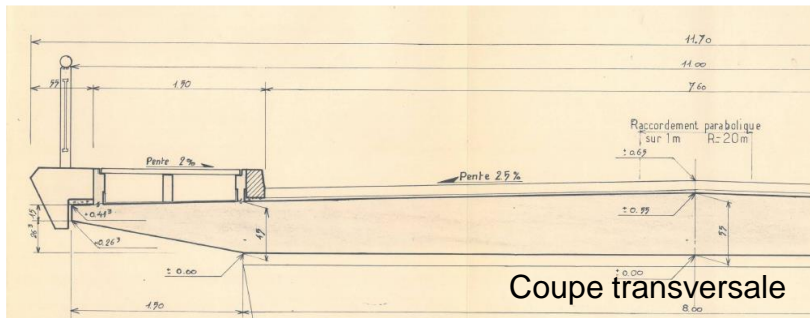
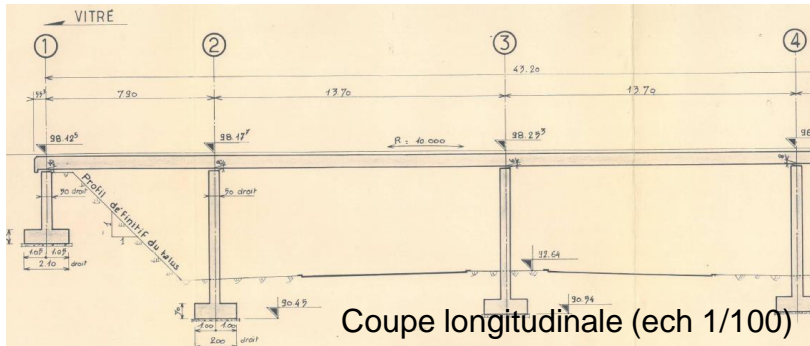


- **Maximum de puissance pendant ~ 30 minutes**
- Carburant dans le réservoir du tracteur
- Produits variés conditionnés sur palettes et en cartons (riz, céréales, outillage, vaisselle, pièces mécaniques, etc.)



• Démarche de diagnostic

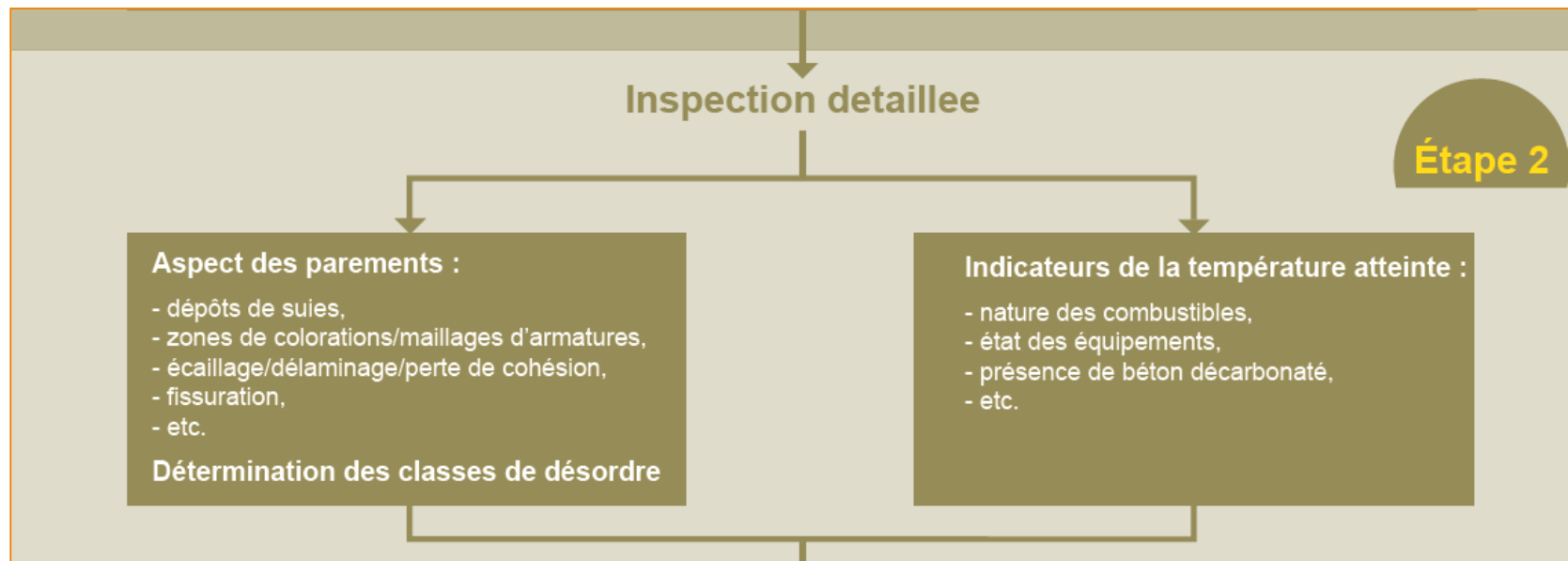
– Analyse du dossier d'ouvrage



- PSDP construit en 1974
- Bétons :
 - Appuis : 350 kg/m³
 - Tablier : 400 kg/m³
- Précontrainte :
 - 13 câbles 29φ7 BBR actif-actif
 - Espacement de 64 cm
 - Câbles non déviés en plan
 - Prof. gaines :
 - ~ 36-38 cm à l'axe de P3
 - 7,5 cm dans l'axe de T2
- Appareils d'appuis :
 - C1, P2, P4 et C5 : 4 AA néop. Fretté
 - P3 : 4 articulations à section rétrécie
- Enrobages théoriques : 25 mm



- **Démarche de diagnostic**
 - **Inspection détaillée exceptionnelle**





• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

- Encadrée par l'ITSEOA, inspection de l'intégralité de l'ouvrage
- Nettoyage préalable pour éliminer la suie (masque)
- Utilisation d'une nacelle positive (P3, T2 et T3 uniquement)
- A pied pour le reste
- Mesures d'enrobages



Débris, noircissement de la structure : impression exagérée de la gravité des désordres

• Eléments à rechercher et à positionner :

- Zones de coloration, différences de teintes
- Ecaillage : profondeur moy. et max, étendue
- Fissures : faciès, orientation, densité, W_{max} , W_m
- Béton non cohésif (sondage au marteau)
- Perte, éclatement de béton : profondeur moy. et max, étendue
- Armatures apparentes : étendue, état



Température du foyer peu élevée mais maintenue longtemps => risque de sous-estimation de la gravité du fait de l'absence de dégradation visible



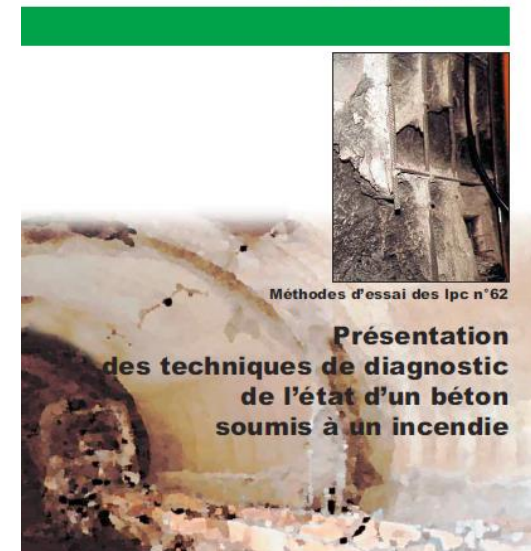
- **Démarche de diagnostic**
 - **Inspection détaillée exceptionnelle**
 - Classification des dégradations

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



1009 1107-480X

techniques et méthodes
des laboratoires des ports et chaussées



Méthodes d'essai des lpc n°62

**Présentation
des techniques de diagnostic
de l'état d'un béton
soumis à un incendie**



- **Démarche de diagnostic**

- **Inspection détaillée exceptionnelle**

- Equipements

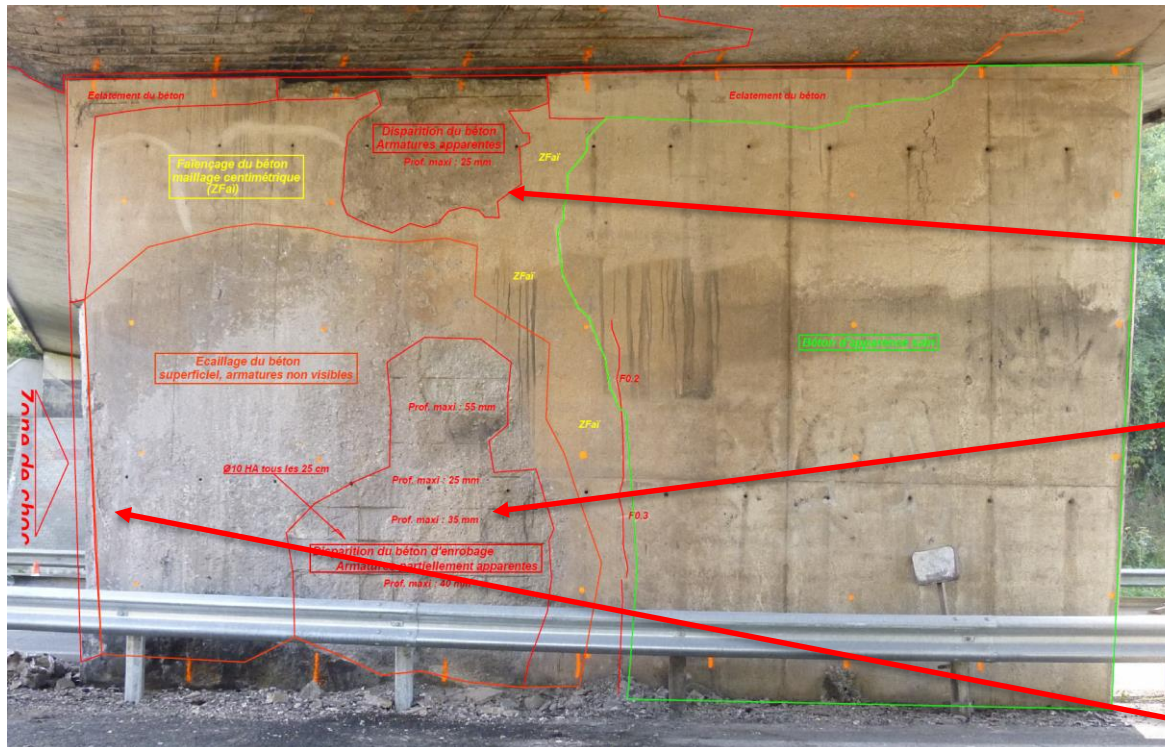
- Endommagement de quelques corniches au niveau de l'accident (choc et/ou accident) : écaillage, éclatements avec armatures apparentes mais pas de défaillance visible des ancrages
 - Altération de la galvanisation des garde-corps au droit de la zone d'incendie



- Altération importante de la couche de roulement de la voie franchie sur plusieurs centimètres



- **Démarche de diagnostic**
 - **Inspection détaillée exceptionnelle**
 - Pile P3 (face Nord)



- **Partie Ouest visuellement saine**
- **Partie Est la plus endommagée**
- **Dégradations max au droit AA2**
 - 1 zone en partie haute (confinement de la chaleur) : ~ 1,5 m², perte de béton maximale de 25 mm
 - 1 zone en partie basse (foyer de l'incendie) : ~ 5 m², perte de béton maximale de 55 mm, armatures horizontales et verticales apparentes
- **Intensité variable :**
 - Perte de béton, écaillage superficiel puis faëçnage à mailles centimétriques
- **Extrémité Est :**
 - Epaufreure liée au chocs sur 2/3 de la hauteur
 - Amorce d'épaufreure sur le 1/3 restant

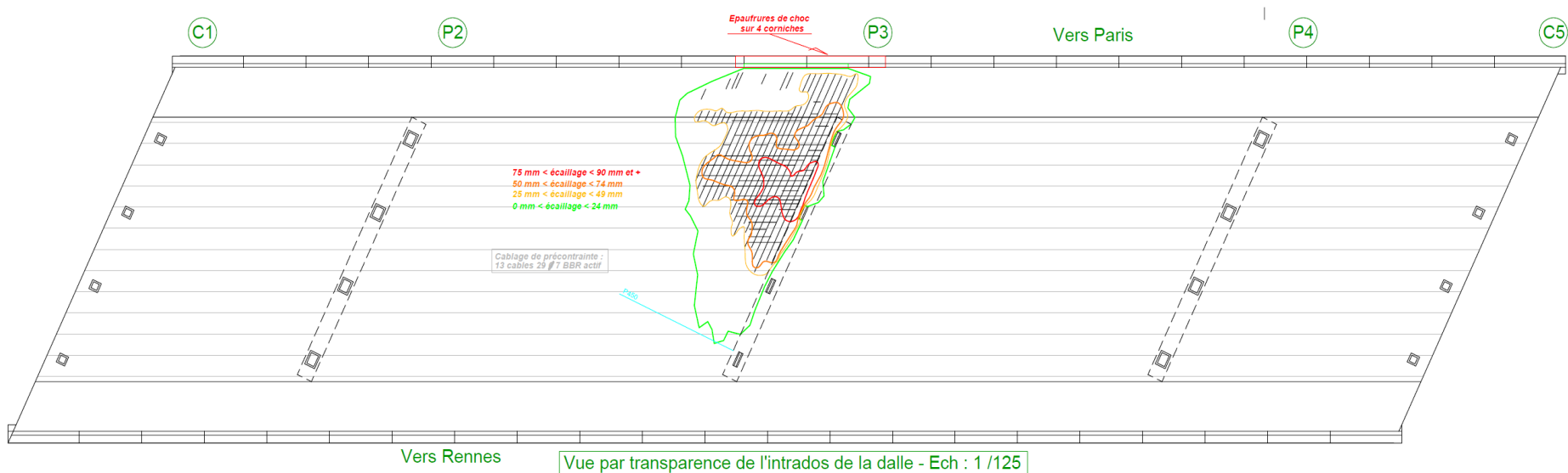


• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

• Intrados du tablier

- ~30 m² présentant des dégradations d'intensité variable
- Perte de matériau : jusqu'à 100 mm
- Perte de béton avec armatures apparentes : ~16 m²
- Perte de béton avec armatures trans. intégralement désenrobées : ~9 m²



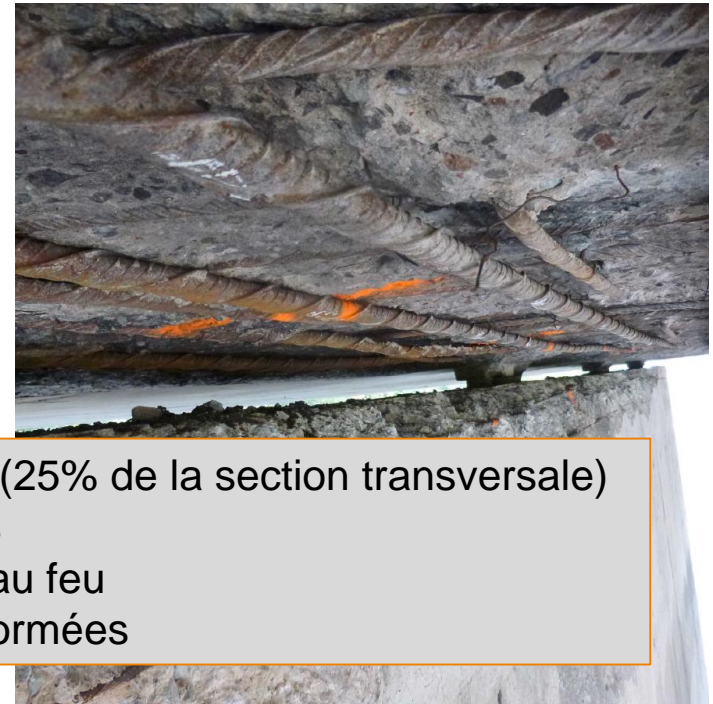
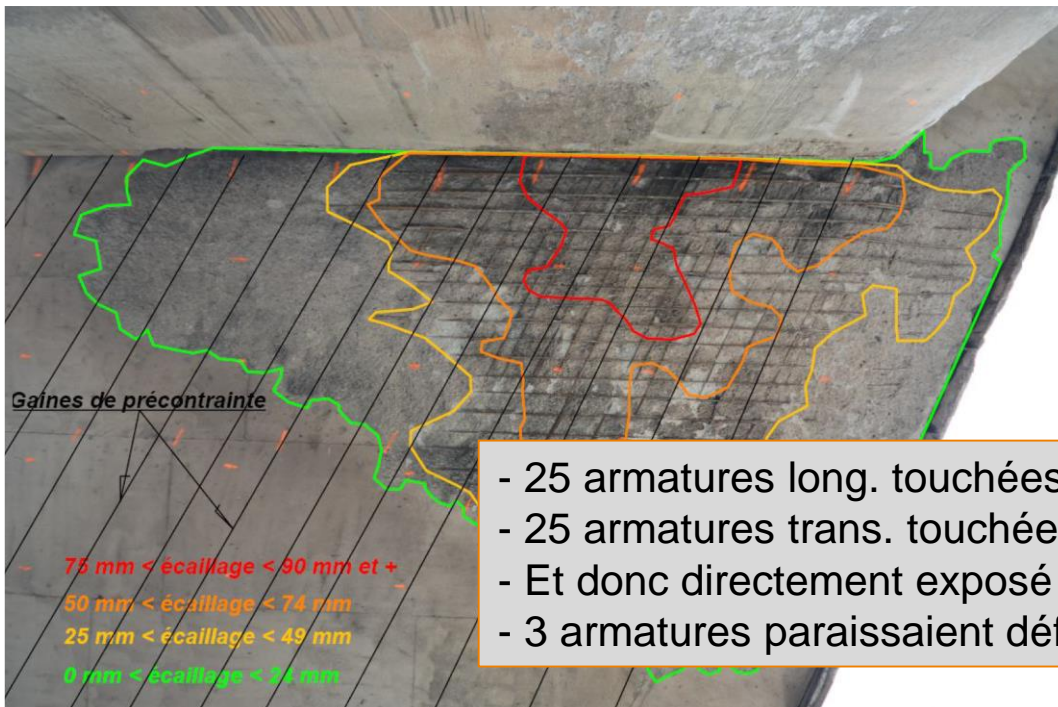


• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

• Intrados du tablier

- ~30 m² présentant des dégradations d'intensité variable
- Perte de matériau : jusqu'à 100 mm
- Perte de béton avec armatures apparentes : ~16 m²
- Perte de béton avec armatures trans. intégralement désenrobées : ~9 m²



- 25 armatures long. touchées (25% de la section transversale)
- 25 armatures trans. touchées
- Et donc directement exposé au feu
- 3 armatures paraissaient déformées

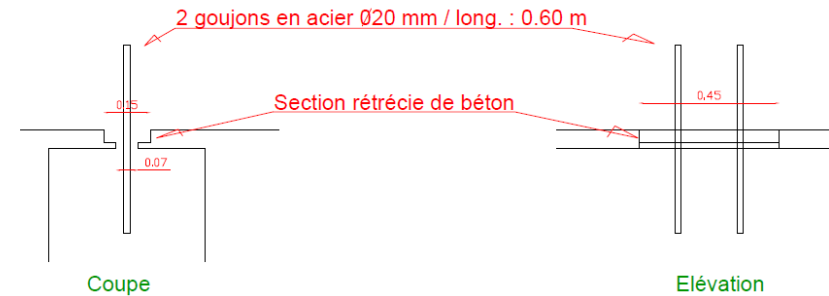


• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

• Appareils d'appui

- Pas de distorsion anormale sur les AA en néoprène fretté (C1, P2, P4 et C5)
- 3 AA impactés par l'incendie (AA2 plus particulièrement)
- Dégradations limitées aux faces exposées à l'incendie
- Tête de pile endommagée
- Eclatement de l'angle des bossages supérieurs
- AA2 : Eclatement de la section rétrécie (goujons non apparent)
- Frettage tablier non apparent

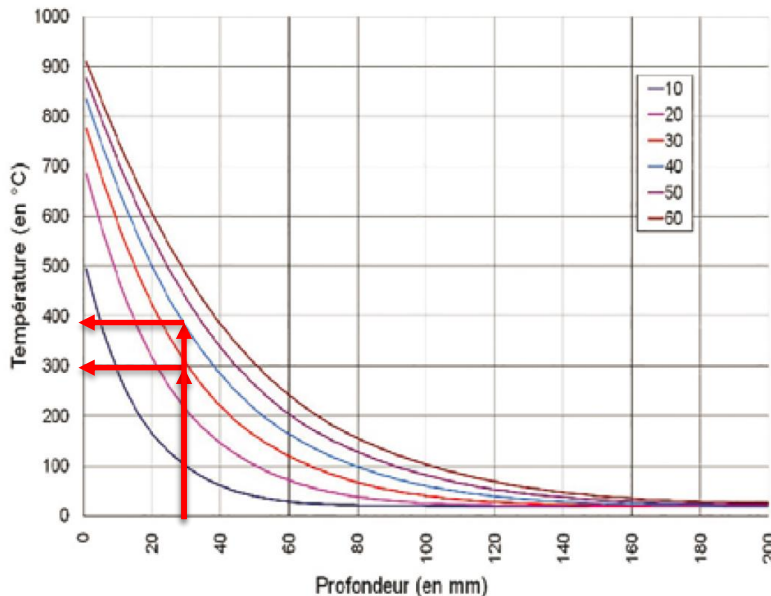




• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

- Conclusions, pré-diagnostic
 - Pas de signes de faiblesse structurelle
 - Mais un **endommagement significatif** de # parties de l'ouvrage
 - **Perte de béton** sur des profondeurs importantes (jusqu'à 10 cm)
 - **Armatures désenrobées** directement exposées à l'incendie
 - 3AA/4 dégradés mais sections rétrécies peu ou pas impactées
- Question : Impact sur le béton et les armatures passive ?



- Durée de l'incendie : 30 à 40 minutes
- $T > 200$ dans les 40 premiers mm
- Enrobage moyen : 30 mm (pile), 35 mm (tablier)
- ⇒ **$T = 300$ à 400 pour les armatures restées enrobées**
- ⇒ **$T \sim 800$ pour les armatures directement exposées**

En 1^{ère} approche (sécuritaire) :

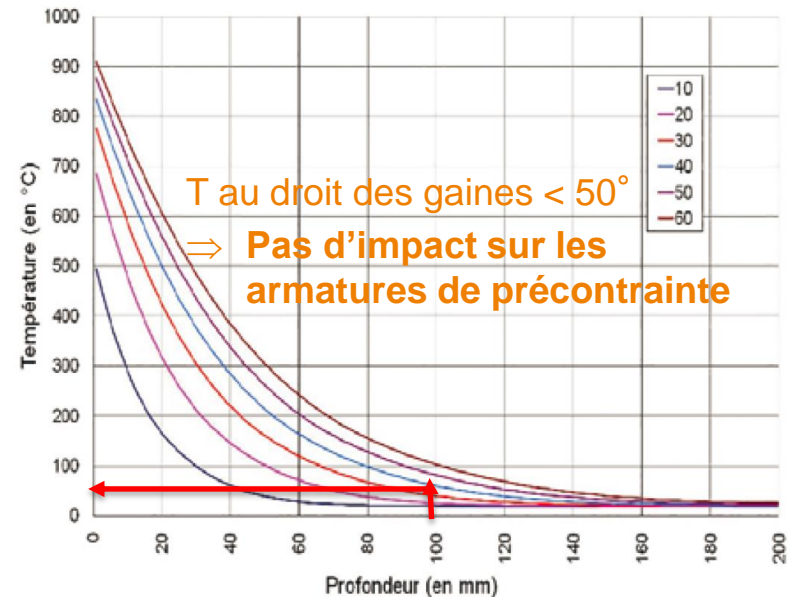
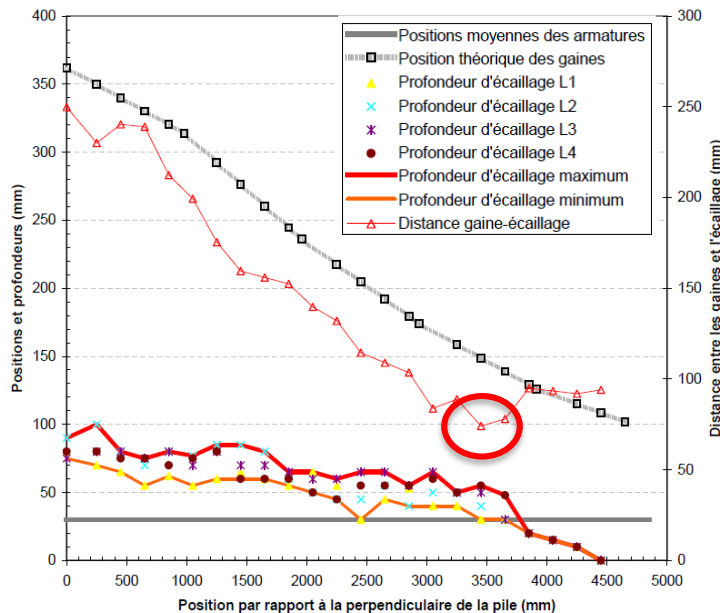
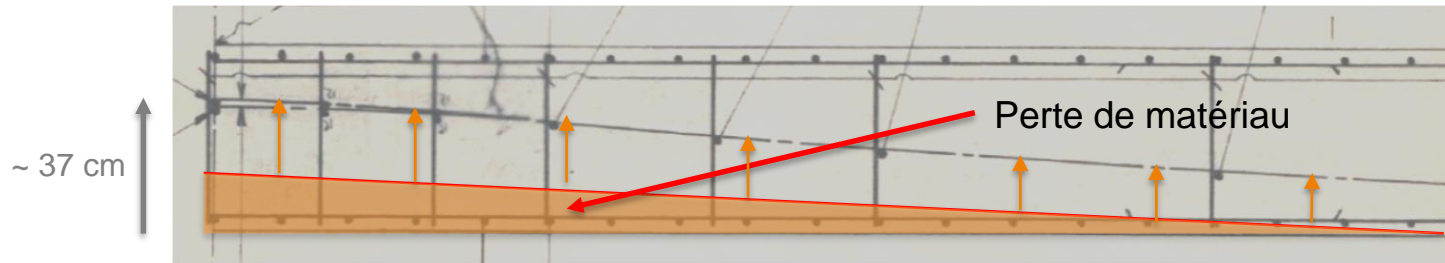
- **Toutes les armatures directement exposées à l'incendie ont perdu leurs propriétés mécaniques**



• Démarche de diagnostic

– Inspection détaillée exceptionnelle

- Question : Impact sur les câbles de précontrainte ?
 - Théoriquement limité dans cette zone d'appui (gaines en partie haute)





- **Démarche de diagnostic**

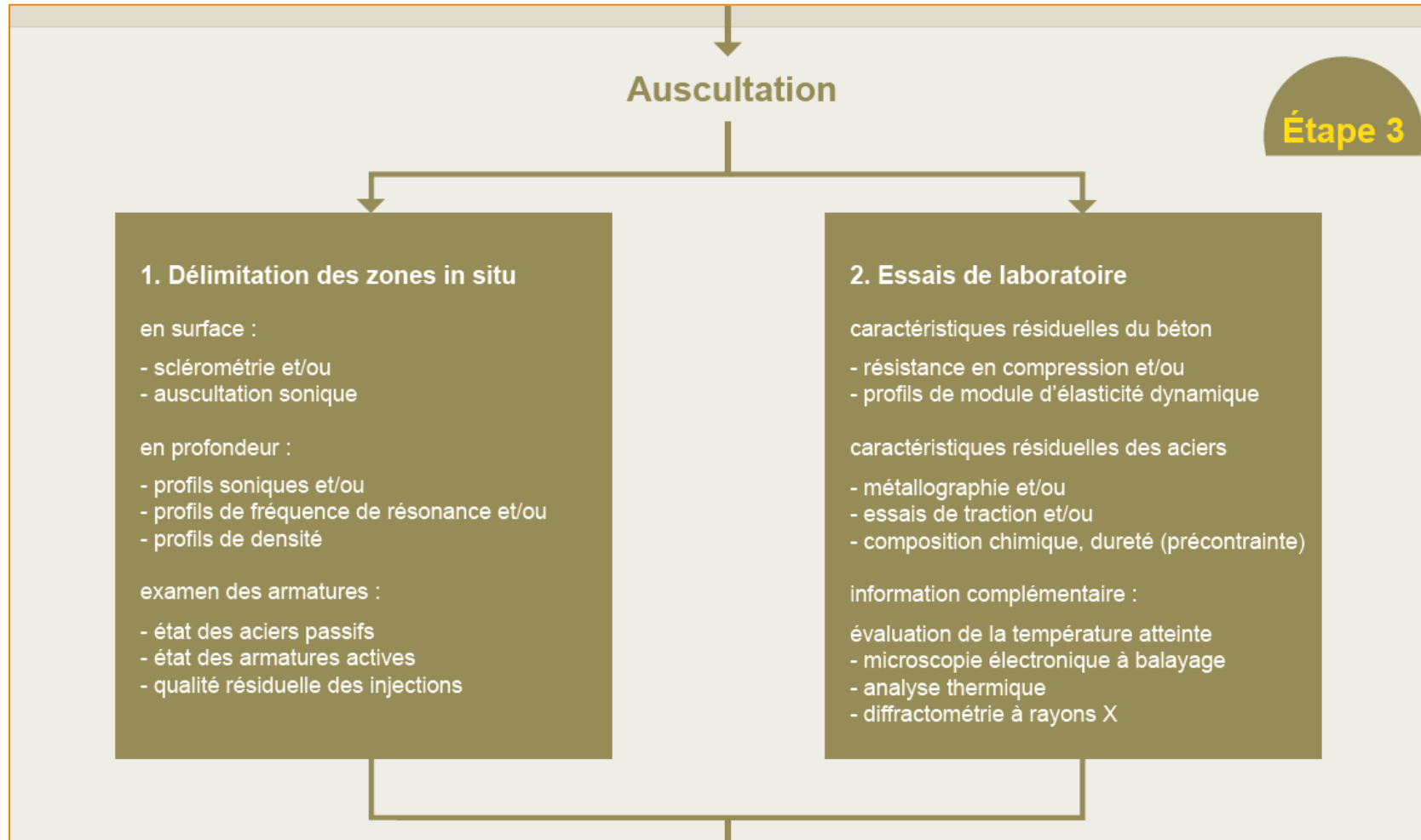
- **Inspection détaillée exceptionnelle**

- Préconisations

- Travaux nécessaires à court terme sur la pile P3, le tablier et les AA
 - Nature et ampleur conditionnées par les résultats d'investigations complémentaires
 - Dans l'attente :
 - » Voie portée : limitation à 3,5 T avec dispositif physique (portique)
 - » Voie franchie : maintien de la neutralisation de la voie rapide



- **Démarche de diagnostic**
 - **Auscultation**





• Démarche de diagnostic

– Objectifs des investigations

(au-delà du simple examen visuel)

- Délimitation précise des zones endommagées
- Evaluation précise de la profondeur d'endommagement
- Evaluation des caractéristiques résiduelles du béton et des armatures
- Estimation des températures atteintes au niveau des armatures




techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées



Méthodes d'essai des Ipc n°62

Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie

MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLÈVEMENTS BÉTON		A1-1
MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLÈVEMENTS BÉTON		A1-2
ANALYSE		A2-1
OBJECTIF		MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLÈVEMENTS ACIER
PRINCIPE		EXAMEN MÉTALLOGRAPHIQUE ET FRACTOGRAPHIE
OBJECTIF		PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE
PRINCIPE		Identifier la microstructure (y compris les inclusions non métalliques) d'un métal. Cette méthode fait partie des essais permettant de déterminer la soudabilité d'un métal.
PRINCIPE		Un examen métallographique consiste à visualiser la microstructure d'un métal, en réalisant sur un échantillon une coupe microscopique pour observer la structure du métal et en réaliser une microscopie optique chimique ou électrolytique (à l'état employé couramment) pour analyser la microstructure.
PRINCIPE		
PRINCIPE		Structure en petits lattes - (Détail) après un traitement à l'acide HCl 10%
PRINCIPE		Destruction de l'échantillon
PRINCIPE		Méthode dérivée depuis longtemp
PRINCIPE		Barre de métallographie lisse avec lubrifiant, embase, polissoir, microscop.
PRINCIPE		MODALITÉS D'APPLICATIONS
PRINCIPE		Analyse de la structure cristalline des métaux, en particulier de leur pureté ou de l'acier, dans le but de déterminer la structure micrographique, les inclusions, les fautes et les porosités.
PRINCIPE		Nécessite un prélèvement sur site et des précautions : - précautions pour ne pas modifier la structure du métal (chauffe, déformation, etc.) - précautions pour que le prélèvement ne ruine pas la structure (réduction de section, concentration de contraintes, etc.)
PRINCIPE		Il peut être nécessaire de compléter l'observation par une analyse chimique, ou une analyse X à la micro sonde (pour la détermination des composants des inclusions).
PRINCIPE		Précision et/ou sensibilité
PRINCIPE		Chargé d'étude
PRINCIPE		CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES
PRINCIPE		Accès à 1 ou 2 faces
PRINCIPE		Une face (légèrement destructif)
PRINCIPE		Couplures ou restrictions de circulation nécessaires
PRINCIPE		Non
PRINCIPE		Les collections de l'Ifsttar
PRINCIPE		Octobre 2015

MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON		B1-1
MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON		B1-2
AU		B2-1
MÉT		D1-7
OBJECTIF		DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DES MATÉRIAUX BÉTON
PRINCIPE		ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON IN SITU
OBJECTIF		CONTEXTE
PRINCIPE		La présente méthodologie d'évaluation de la résistance en compression du béton sur site est fortement inspirée du complément national de la norme NF EN 12501-1 "Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton" et est complétée par les chapitres 7 - Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par essai sur carottes" et 8 - Évaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par des méthodes indirectes".
PRINCIPE		La résistance caractéristique de calcul est obtenue en divisant la résistance caractéristique à la compression déterminée sur site par un coefficient de SBC (coefficient de sécurité) de la norme NF EN 12501-1. Cette opération est effectuée sur la base d'un échantillonnage approprié de la résistance mesurée qui est mesurée sur une éprouvette moule.
PRINCIPE		À être évaluer, on peut avoir besoin de connaître la résistance à la compression du béton lorsque l'on réalise l'évaluation structurelle réalisée d'un ouvrage en vue de diagnostiquer un endommagement, un état de détérioration ou un préjudice additionnel, ou pour connaître la résistance résultante d'une structure conçue initialement pour être partagée comme une section de guidage de la structure.
PRINCIPE		METHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC
PRINCIPE		L'objectif est d'établir les différents types de béton qui ont pu être utilisés pour construire l'ouvrage. Cela permet de disposer l'ouvrage en zones d'essai avant d'y faire la même formulation de béton, ou tout au moins une cartouche homogénéisée de résistance.
PRINCIPE		Rappel des définitions de la norme NF EN 12501-1
PRINCIPE		- Zone d'essai : un ou plusieurs éléments structuraux en béton dont on veut se rendre compte du comportement de la même situation. Une zone d'essai comprend plusieurs axes d'essai
PRINCIPE		- Axe d'essai : une éprouvette qui est destinée à mesurer les messages et qui est utilisée en tant que résultat d'essai, quel qu'il soit, pour l'évaluation de la résistance à la compression sur site
PRINCIPE		On essaie d'établir, grâce aux bons de livraison, les différences caractéristiques entre les bétons utilisés dans les zones de livraison, cela permet de faire le triage préliminaire des axes.
PRINCIPE		En fonction des résultats de l'étape 1 et des constatations effectuées lors de l'inspection détaillée (localisation de fissures, présence de corrosion, présence de carbonatation indiquant l'existence d'un centre salin, joints de collage défectueux des zones d'ancrage différents, joints de soudure, etc.), on effectue le triage préliminaire des axes de diagnostic de manière à sélectionner et évaluer les cartouches, ou d'établir les axes d'essai où seront faites les mesures non destructives.
PRINCIPE		Les cartouches seront effectuées dans des zones où il ne peut pas y avoir de problème structurel, par exemple de craquelure de l'axe mesuré. Un triage préalable de la position des axes permet de définir les zones de précontrainte des axes effectués.
PRINCIPE		La norme NF EN 12501-1 propose différentes méthodes, directes ou indirectes, pour déterminer la résistance caractéristique en compression.
PRINCIPE		Essais basés sur des essais de compression sur carottes
PRINCIPE		Comme l'échelle du complément national de la norme NF EN 12501-1 est fortement recommandée d'évaluer la résistance en compression de béton sur site par des essais de compression sur carottes.
PRINCIPE		Il est important que la qualité du prélèvement par carottage soit très importante pour ne pas endommager les carottes d'essai et pour le respect de la géométrie requise pour l'essai de compression (norme NF EN 12501-1 et NF EN 12590-1) et se conformer à la fiche d'orientation (S.3).
PRINCIPE		La dimension nominale de la carotte réglée par la norme NF EN 12501-1 est de 100 mm, la plus grande généralement. Il est souhaitable, si le forage et la préparation de la pièce le permettent, de prélever des carottes ayant un diamètre égal à 150 mm (sauf si la norme NF EN 12501-1 ne le permet pas) et d'augmenter de ce qui a permis des carottes de diamètre égal à environ 10 cm.
PRINCIPE		L'échantillonnage recommandé de 3 à 5 axes dans le complément national de la norme NF EN 12501-1 est basé sur des coefficients de correction de la résistance en fonction de la géométrie des éprouvettes pouvant être utilisés pour des éprouvettes de diamètre ou d'épaisseurs différents.
PRINCIPE		Les collections de l'Ifsttar
PRINCIPE		Novembre 2017 - page 1



• Démarche de diagnostic

– Détection des gaines de précontrainte

- Localisation en plan et en profondeur des gaines de précontrainte

MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON ARMÉ (DURABILITÉ) **B2-1**

MESURE DE LA PROFONDEUR D'ENROBAGE ET DU DIAMÈTRE DES ACIERS

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Localisation des armatures et détermination de leur diamètre et de leur profondeur d'enrobage par méthode électromagnétique basse fréquence.
PRINCIPE	Le matériel mesure les courants induits (courants de Foucault) générés dans les armatures par un champ magnétique variable dans le temps et créé par une ou plusieurs bobines électromagnétiques déplacées à la surface du béton. Le signal mesuré augmente avec le diamètre des armatures en acier et diminue avec l'épaisseur de recouvrement des aciers par le béton.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis longtemps.
<p>Case et règle si tracage des armatures direction sur le parement.</p> <p>Appareil de type :</p> <p>Profondeur ou pachymètre ou Ferrascan</p>	
<p>MODALITÉS D'APPLICATIONS</p>	
DOMAINE D'APPLICATION	Structures en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, etc.) Structures en béton précontraint (conducteurs métalliques de précontrainte, fils adhérents (préhension), Maçonnerie armée ou contenant des inclusions métalliques).
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Il est conseillé de procéder à des petits sondages pour confirmer la profondeur d'enrobage et le diamètre fournis par la méthode, notamment en l'absence de plans d'exécution de ferrailage ou de câblage. Il convient de reboucher ces petits sondages.
LIMITES D'UTILISATION	Profondeur limite de détection variable suivant les appareils et le diamètre des armatures, couramment de l'ordre de 70 à 80 mm. Difficultés d'interprétation lorsque les armatures sont groupées ou présentent des recouvrements. Les surfaces soulevées doivent être relativement planes et sans relief prononcé (difficultés sur certains parements).

Les collections de l'Ifsttar Octobre 2015

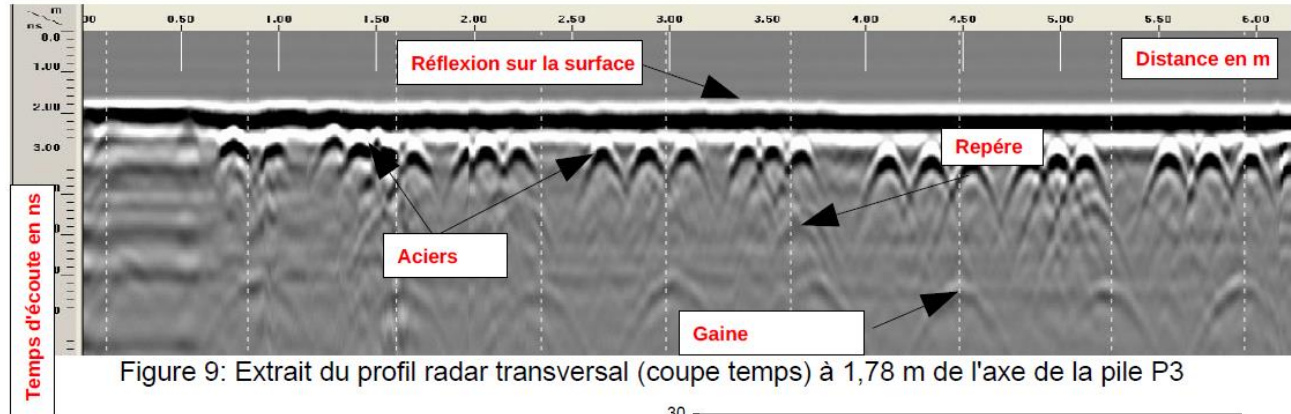
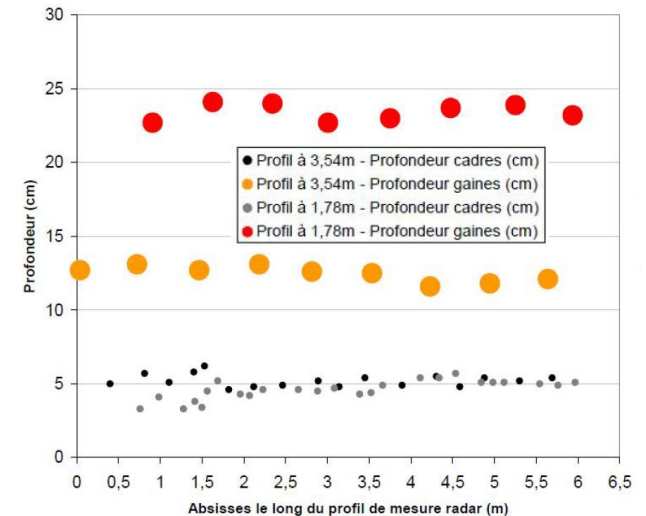


Figure 9: Extrait du profil radar transversal (coupe temps) à 1,78 m de l'axe de la pile P3





• Démarche de diagnostic

– Essais de dureté de surface au scléromètre

- Délimitation des zones endommagées (y compris zones visuellement saines)

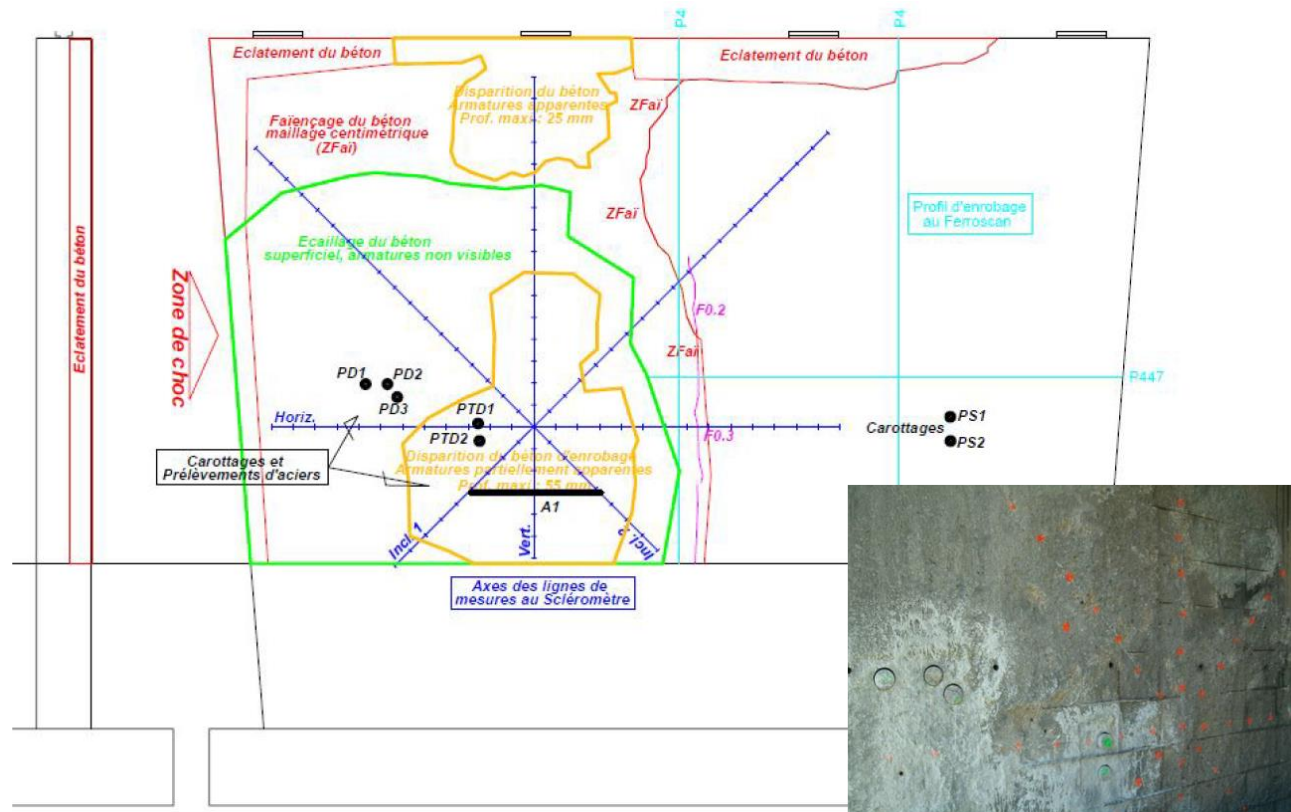
Mesure du rebond d'une bille en acier sur la surface du béton – Hauteur du rebond liée à la dureté de surface du béton

MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON **B1-1**

MESURES AU SCLÉROMÈTRE

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Évaluation de la dureté et de l'homogénéité de surface d'un parement en béton. Délimitation de zones dégradées (incendie, gel, etc.) ou de zones présentant des caractéristiques mécaniques différentes.
PRINCIPE	La mesure de la dureté de surface d'un béton est basée sur l'étude du rebond d'une bille d'acier projetée sur sa surface à l'aide d'un ressort taré. La hauteur du rebond qui augmente avec la dureté de surface du béton sollicité, est caractérisée par un indice sclérométrique. Une valeur peut aussi être obtenue en fonction de la différence d'énergie ou de vitesse avant et après l'impact de la masse, avec les nouveaux modèles. Il est possible de réaliser une cartographie des pièces auscultées afin de déterminer l'homogénéité de la surface. La norme NF EN 13793/CN permet d'évaluer des résistances en compression à partir de mesures d'indices sclérométriques à condition de procéder à un étalonnage sur des éprouvettes prélevées dans la structure et soumises à des essais de compression à rupture, selon des règles précises.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis très longtemps
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Un marteau testeur gradué Un bloc ou une enclume d'étalonnage permettant le réglage de l'appareil Une pierre à polir Le cas échéant, un module d'acquisition de données adapté au scléromètre automatisé
MODALITÉS D'APPLICATIONS	
DOMAINE D'APPLICATION	Tous types de béton durci et toutes situations dont au moins 1 face est accessible. Il existe également des appareils pour les matériaux de caractéristiques plus faibles (plâtre, mousse, béton jeune et pour les revêtements ou enduits) : de 0,5 à 25 MPa.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Pour chaque surface élémentaire d'environ 9 dm ² , il convient de réaliser au moins 9 mesures espacées de plus de 2,5 cm et de retenir la valeur médiane comme indice sclérométrique de cette surface. Il peut être nécessaire de poncer la surface si elle est accidentée (la fiche de la pointe de mesure). Il ne faut pas faire d'essai directement sur des cavités visibles. En outre, on ne doit pas effectuer de mesure à moins de 2,5 cm des bords. Un coefficient de correction doit être appliqué à la mesure de l'indice sclérométrique en fonction de l'orientation du scléromètre.

Les collections de l'Ifsttar Octobre 2015

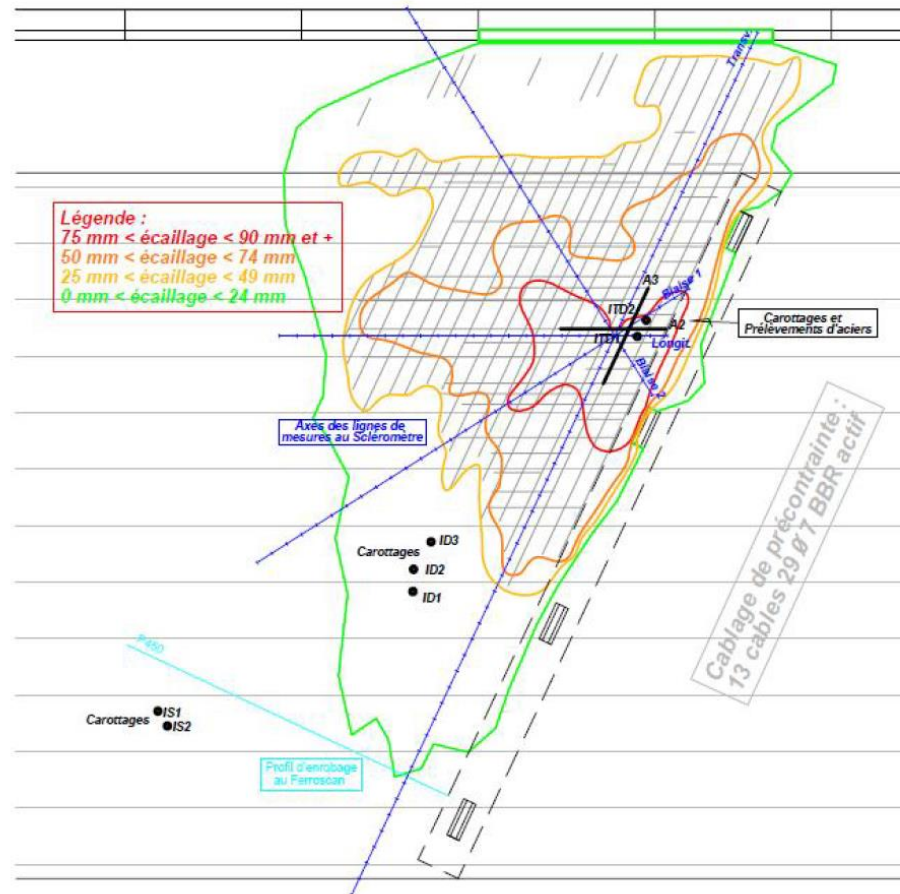




• Démarche de diagnostic

– Essais de dureté de surface au scléromètre

- Délimitation des zones endommagées (y compris zones visuellement saines)

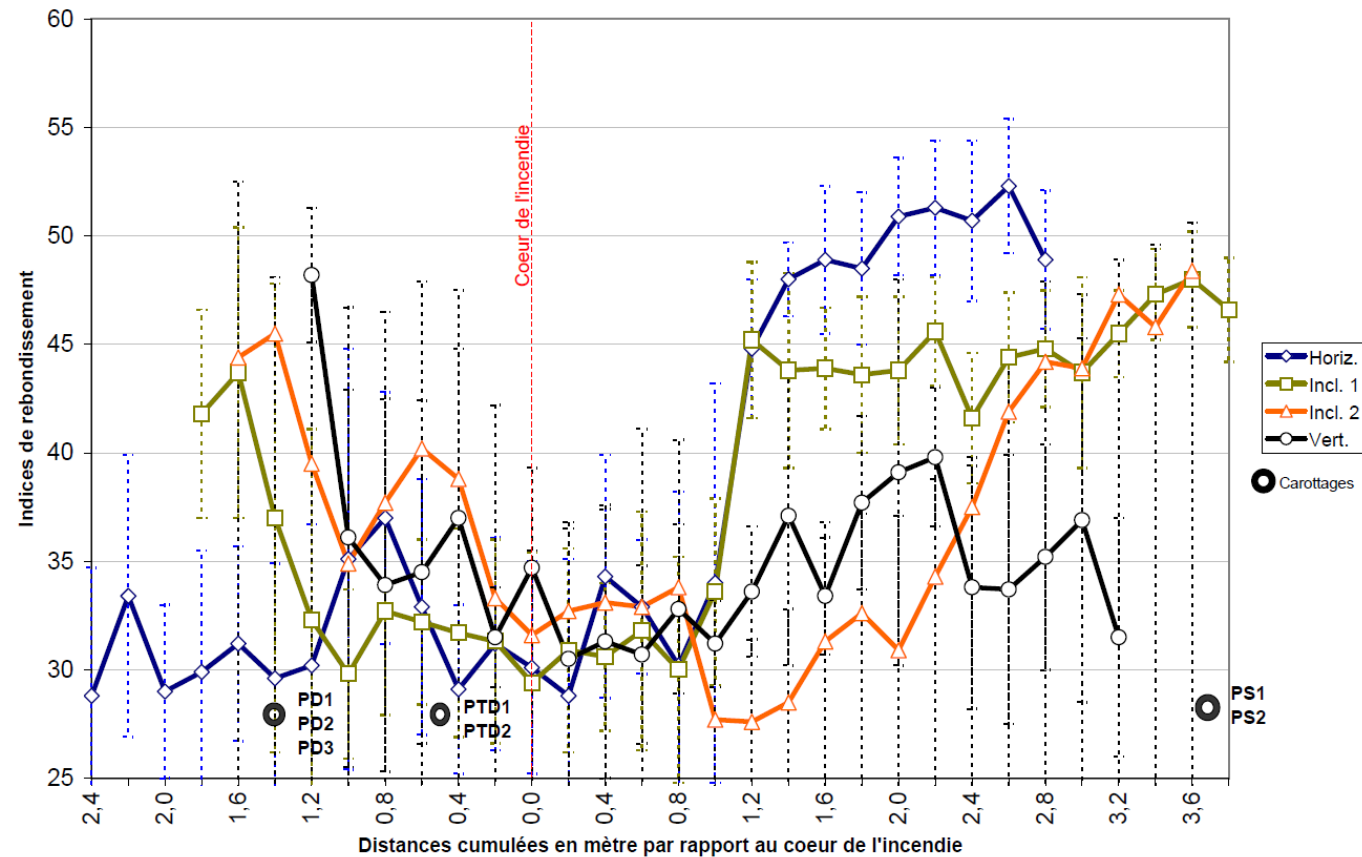
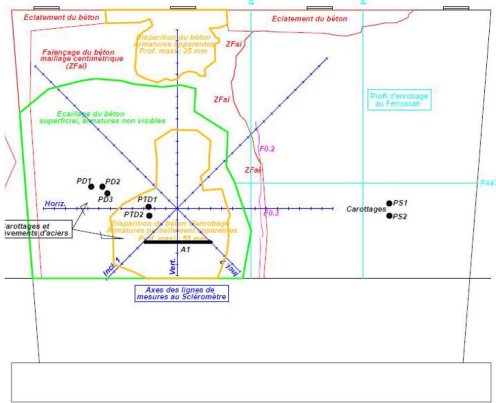




• Démarche de diagnostic

– Essais de dureté de surface au scléromètre

- Délimitation des zones endommagées (y compris zones visuellement saines)





• Démarche de diagnostic

– Profils soniques

- Caractérisation de l'épaisseur de béton affectée par l'incendie
- Etablissement d'un profil d'endommagement en fonction de la profondeur

MÉTHODES D'AUSCULTATION DU MATÉRIAU EN PLACE BÉTON **B1-2**

AUSCULTATION SONIQUE DES BÉTONS (Auscultation par ultrasons)

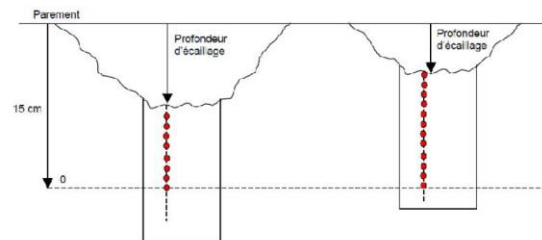
PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Recherche des hétérogénéités et des discontinuités dans les structures en béton, et mesure d'épaisseur de pièces en béton.
PRINCIPE	Le contrôle sonique par ultrasons consiste à générer à l'aide d'un émetteur piézoélectrique une onde mécanique de compression dans la structure à ausculter, à recevoir à l'aide d'un récepteur l'onde qui se propage dans tout l'élément et à analyser ses paramètres physiques en différents points de la structure (temps et amplitude). L'essai est réalisé selon l'une des méthodes décrites dans la norme NF EN 12504-4 : méthode directe dite « par transparence », méthode indirecte dite « de surface », ou méthode semi-directe dite « en semi-transparence ».
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis longtemps
Il existe de nombreux matériels, et voici à titre d'exemple, ci-dessous, la chaîne d'auscultation ANSP 1500 (GCEP de Rouen). Les transducteurs sont soit des transducteurs de contact à pointe, soit des transducteurs plans, droits ou inclinés couplés à la structure par du ghril-salicylate, du gel ou de la graisse. Les fréquences de travail utilisées se situent entre 20 et 100 kHz. Un oscilloscope et un micro ordinateur permettent de stocker les signaux et de faire une analyse en temps réel. D'autres appareils sont disponibles dans le commerce.	
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	 Oscilloscope (CERMA) Micro ordinateur (CERMA) Émetteur/Recepteur ultrasons (CERMA) Baller électronique (CERMA)

Les collections de l'Ifattar Octobre 2015

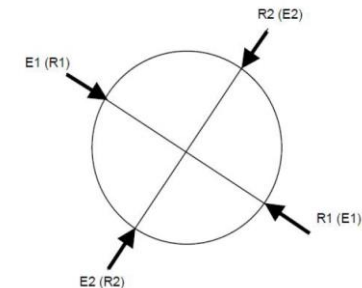
Vitesse sonique (des ondes de compression) :

- dépend du module, de la résistance à la compression et de la masse volumique

⇒ Donne une information qualitative sur la résistance et la compacité du béton



Prélèvement des carottes dans l'ouvrage (zones saine, très dégradée, très dégradée)



Principe de la mesure en laboratoire

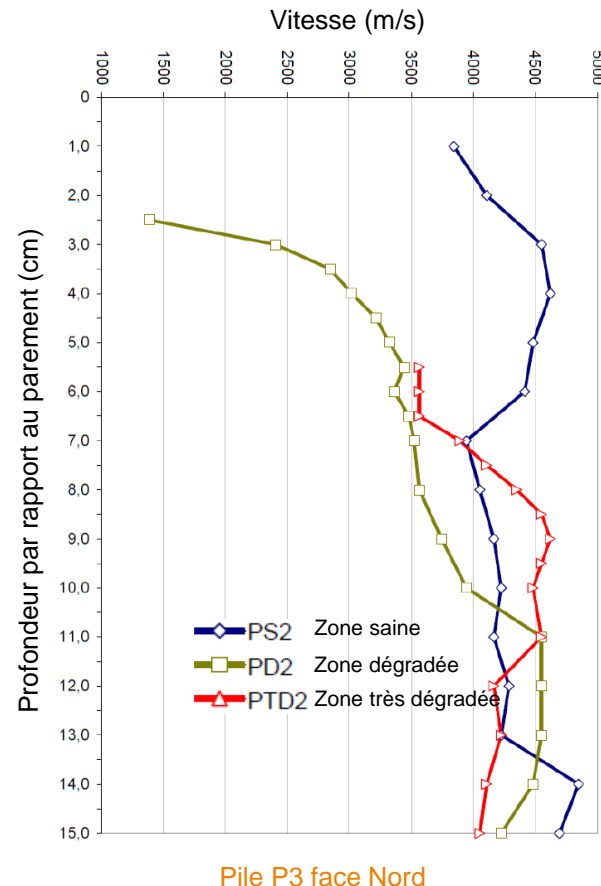
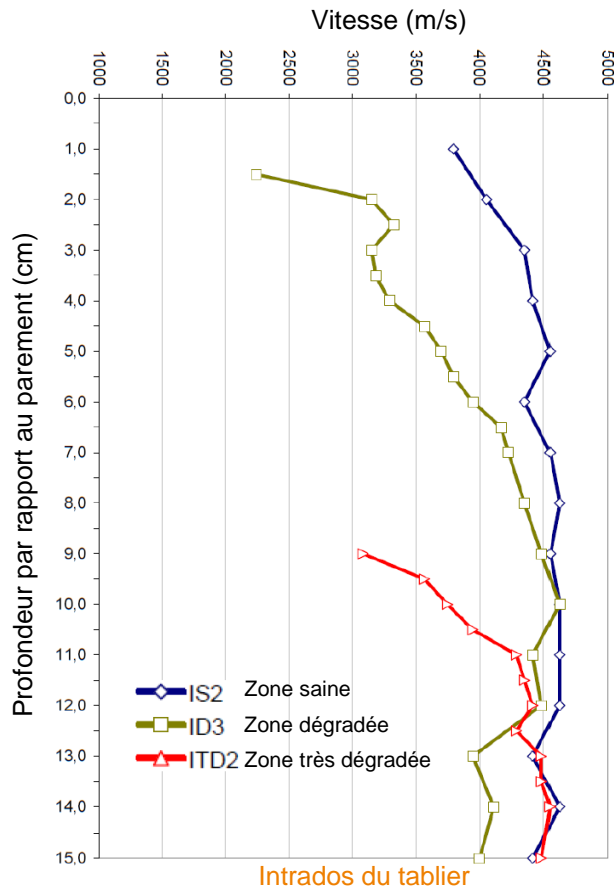
Béton sain : $V > 4000$ m/s
Béton altéré : $2000 < V < 3500$ m/s
Béton très altéré : $V < 1500$ m/s



• Démarche de diagnostic

– Profils soniques

- Caractérisation de l'épaisseur de béton affectée par l'incendie
- Etablissement d'un profil d'endommagement en fonction de la profondeur



- Altération sensible des propriétés du béton au-delà de l'épaisseur écaillée
- Béton pile P3 sain à partir de :
 - 10 cm en zone dégradée
 - 4 cm en zone très dégradée
- Béton tablier sain à partir de :
 - 8 cm en zone dégradée
 - 2 cm en zone très dégradée



• Démarche de diagnostic

– Résistance à la compression

- Impact de l'incendie sur les propriétés mécaniques du béton
- Indication en perspective d'un éventuel recalcul

DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DES MATÉRIEAUX BÉTON

D1-7

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON IN SITU

CONTEXTE

La présente méthodologie d'évaluation de la résistance en compression du béton sur site est fortement inspirée du complément national de la norme NF EN 13791 « Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton » et notamment de ses chapitres 7 « Evaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par l'essai sur carottes » et 8 « Evaluation de la résistance caractéristique à la compression sur site par des méthodes indirectes ».

La résistance caractéristique de calcul est obtenue en divisant la résistance caractéristique à la compression déterminée sur site par un coefficient de 0,85 conformément au tableau 1 de la norme NF EN 13791/EN. Cela signifie que le béton dans la structure a généralement une résistance moindre que celle mesurée sur une éprouvette moule.

A titre d'exemple, on peut avoir besoin de corriger la résistance à la compression du béton lorsque l'on réalise l'évaluation structurale (recalcul d'un ouvrage en vue de proposer une réparation ou un renforcement, notamment par précontrainte additionnelle, ou pour connaître la résistance résiduelle d'une structure dont le béton présente une pathologie comme une réaction de gonflement interne).

Méthodologie du diagnostic

L'objectif est d'identifier les différents types de béton qui ont pu être utilisés pour construire l'ouvrage. Cela permet de découper l'ouvrage en zones d'essai ayant a priori la même formulation de béton, ou tout au moins une certaine homogénéité de résistance.

Rappel des définitions de la norme NF EN 13791/EN :

- « Zone d'essai : un ou plusieurs éléments structuraux en béton dont on sait ou suppose qu'ils proviennent de la même population. Une zone d'essai contient plusieurs aires d'essai ».
- « Aire d'essai : aire limitée qui est sélectionnée pour les mesurages et qui sert à estimer un seul résultat d'essai, lequel doit permettre l'évaluation de la résistance à la compression sur site ».

On essaiera d'identifier, grâce aux bons de livraison, les différents contrôles ayant fourni les bétons et les dates de livraison ; cela permettra d'affiner le zonage précédemment défini.

En fonction des résultats de l'étape 1 et des constatations effectuées lors de l'inspection détaillée (existence de reprises de bétonnage, parements de coulage uniforme indiquant l'utilisation d'un même béton, joints de coffrage délimitant des zones d'aspect différents, joints de voutures, etc.), on affina le zonage précédemment défini afin de décider du nombre de carottes à prélever et d'implanter les carottages, ou d'implanter les aires d'essai où seront faites les mesures non destructives.

Les carottages seront effectués dans des zones où ils ne posent pas de problème structurel, par exemple au niveau de l'axe neutre. Un repérage préalable de la position des aciers passifs et des câbles de précontrainte doit être effectué.

La norme NF EN 13791/EN propose différentes méthodes, directe ou indirectes, pour déterminer la résistance caractéristique en compression.

Évaluation basée sur des essais de compression sur carottes

Comme l'indique le complément national de la norme NF EN 13791, il est fortement recommandé d'évaluer la résistance en compression du béton in situ par des essais de compression sur carottes. Il est rappelé que la qualité du prélèvement par carottage est très importante pour ne pas endommager les carottes et être garant du respect de la géométrie requise pour l'essai de compression (se reporter aux normes NF EN 12504-1 et NF EN 12590-1 et se conformer à la fiche d'auscultation A1.1).

Le diamètre minimal de la carotte exigé par la norme est de 3 fois le diamètre du plus gros granulats. Il est souhaitable, si le fraiissage et la dimension de la pince le permettent, de prélever des carottes ayant un diamètre égal à 5 fois le diamètre du plus gros granulats, ce qui conduit dans la plupart des cas à prélever des carottes de diamètre égal à environ 10 cm.

L'épave est recommandée et de 2. Il existe dans le complément national à la norme des graphiques qui donnent des coefficients de correction de la résistance en fonction de la géométrie des éprouvettes pouvant être utilisés pour des éprouvettes de diamètres ou d'épave différents.

Les collections de l'Ifsttar Novembre 2017 - page 1

Prélèv.	Localisation	Résistance à la compression (Mpa)	Indice sclérométrique	Ecart type sur l'indice	Porosité accessible à l'eau (%)	Masse volumique apparente (kg/m³)
IS2	Intrados tablier / Zone Saine	41,8	48,7	3	12,3	2291,5
ID3	Intrados tablier / Zone Dégradée	41,3	-	-	14,4	2227,7
ITD2	Intrados tablier / Zone Très Dégradée	43	28,4	5	13,2	2258
PS2	Pile P3 / Zone Saine	41,6	52,2	3,9	11,9	2308,5
			49,2	3,8		
PD2	Pile P3 / Zone Dégradée	28,4	50,6	4,2	11,3	2334,1
			27,8	5,6		
			31,5	7,6		
PTD2	Pile P3 / Zone Très Dégradée	40,4	35,3	7,8	12,3	2300,3
			40,4	11,3		
			36,2	6,6		



• Démarche de diagnostic

– Analyse thermogravimétrique (ATG)

- Estimation des températures atteintes dans le béton à différentes profondeurs

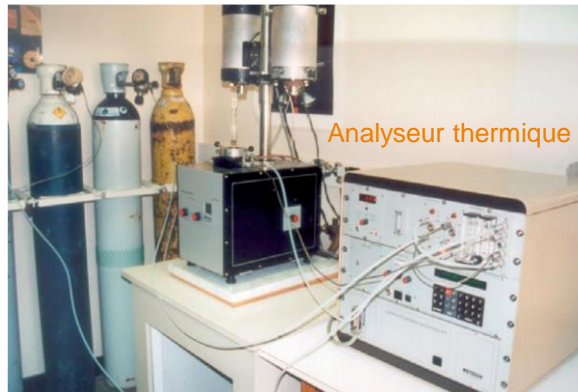
Identification des minéraux cristallisés présents dans le béton :

- initialement présents,
- résultant de modifications liées à l'élévation de température

Sélection des échantillons à partir des résultats de profils soniques :

- Identification de # tranches présentant des niveaux d'altération différents (zones saine, dégradée, très dégradée)
- Echantillons sous forme de poudre

MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLEVEMENTS BÉTON	
A1-2	
ANALYSE MINÉRALOGIQUE COMPLÈTE DU BÉTON	
PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Expérimenter à l'aide d'analyses physico-chimiques un échantillon de béton suspecté de présenter une pathologie ou dont la composition est à évaluer. L'analyse minéralogique détaillée permet : - de caractériser la composition du béton ; - d'identifier la nature du liant et des granulats ; - de déterminer la formule simplifiée du béton (dosage en ciment, eau et granulats) ; - de déterminer la présence éventuelle de produits délégués à l'origine des désordres observés sur structure (gels d'alkali-réaction, attériorité, trassite, etc.).
PRINCIPE	L'analyse se base sur la réalisation des opérations et essais suivants : - sélection et sciage d'un échantillon de béton ; - mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau selon la méthode recommandée par l'AFPC-AFRM ; - broyage + moutage + de l'échantillon sec à une granulométrie inférieure à 215 microns ; - mise en solution partielle de l'échantillon par une attaque à l'acide nitrique dilué au 1/50 ^e ; - analyses thermiques différentielles et thermogravimétriques simultanées ; - détermination des espèces minérales présentes par diffractométrie des rayons X ; - examen de la microstructure au microscope électronique à balayage couplé à une sonde d'analyse en sélection d'énergie du spectre des rayons X émis. Les résultats de ces différentes investigations sont traités par itérations successives à l'aide d'un programme tel que « MINERLUX » de l'IFSTTAR pour calculer la composition minéralogique quantitative des matériaux selon le protocole décrit dans le rapport LPC n°58. Cette analyse peut éventuellement être complétée par des essais ou des mesures spécifiques, en fonction de la pathologie précise que l'on cherche à expérimenter, à titre d'exemple, dans le cas d'un béton suspecté d'alkali-réaction, l'analyse minéralogique peut être complétée par une détection des gels par l'essai de fluorescence à l'acétate d'uranyle.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Destructif (en général, un échantillon de béton d'au minimum 80 mm de diamètre et de 200 mm de longueur suffit pour l'expérimentation).
MATURITÉ	Méthode d'analyse éprouvée depuis plus de 25 ans.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Spectromètre d'émission atomique (ICP-AES). Spectromètre d'absorption atomique. Matériel classique de dosage chimique. Appareil de titrage potentiométrique. Analyseur thermique simultané (de type NETZSCH STA 409 ou équivalent). Diffractomètre à rayons X (type PHILIPS PW 1830 ou équivalent). Microscope électronique à balayage (type PHILIPS XL 30 ou équivalent). Microscopie EDAX (DX 4i ou équivalent). Dispositif de mesure de la masse volumique et de la porosité accessible à l'eau d'un échantillon de béton. Scie à béton. Broyeur. Appareil de méthanisation au carbone. Base de données de pics de diffraction des différents minéraux existants. Banque de données sur la composition des anciens ciments.

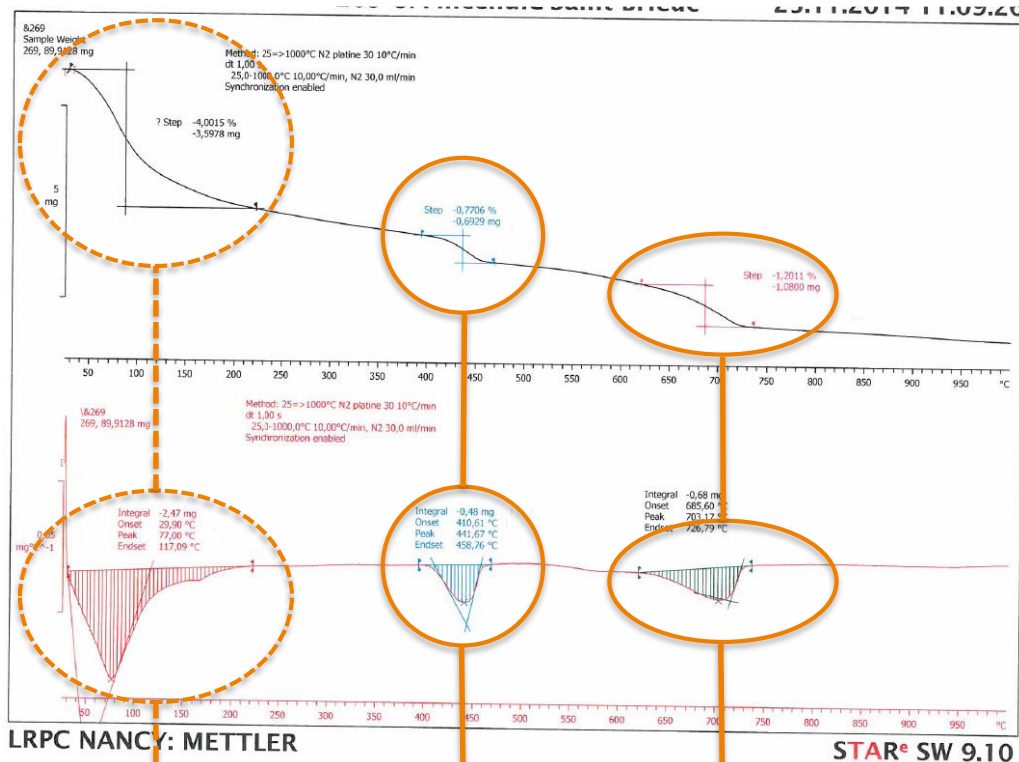




• Démarche de diagnostic

– Analyse thermogravimétrique (ATG)

- Estimation des températures atteintes dans le béton à différentes profondeurs



Perte de l'eau contenu
dans les échantillons
~100°

Perte d'eau de la
portlandite
~440°

Perte de CO₂ de la
calcite provenant de la
carbonatation ~ 700°

Méthode LPC n° 62 :

- Suivi de la perte de masse des échantillons en fonction de la montée en température
 - Chaque pic, correspondant à la disparition d'un composé
- => Présentation sous forme de thermogrammes

Présence systématique sur tous les échantillons d'une perte de masse à 450-500° (eau de la portlandite)
=> Le béton (éch.) n'a pas subi de température prolongée au-delà de 450°




• Démarche de diagnostic

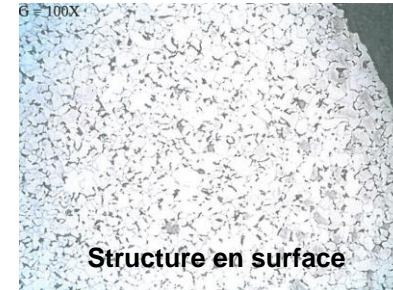
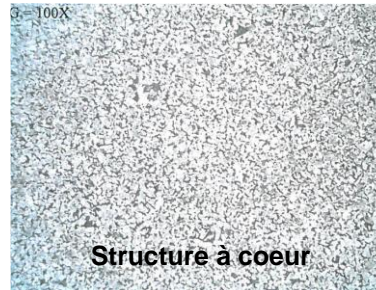
– Essais sur les armatures passives

- Evaluation des propriétés physico-chimiques et mécaniques

Analyse métallographique :

- Pas de risque de fragilité (NF A 04-106)
- Pas de phénomène de trempe suite à l'incendie (NF EN ISO 643)
- Modifications microstructurales (taille des grains) (NF EN ISO 643)

MÉTHODES D'AUSCULTATION SUR PRÉLEVEMENTS ACIER	
A2-1	
EXAMEN MÉTALLOGRAPHIQUE ET FRACTOGRAPHIE	
PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE	
OBJECTIF	Identifier la microstructure (y compris les inclusions non métalliques) d'un métal. Cette méthode fait partie des essais permettant de déterminer la soudabilité d'un métal.
PRINCIPE	L'examen métallographique consiste à visualiser la microstructure d'un métal, en réalisant sur un échantillon soit un examen microscopique pour déterminer la propreté du métal et un examen microscopique après attaque chimique ou électrolytique (Nital employé couramment) pour analyser de la microstructure. 
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Destruction de l'échantillon
MATURITÉ	Méthode éprouvée depuis longtemps
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Banc de métallographie (détourne avec lubrifiant, enrouleur, polisseuse, réactif, microscope).
MODALITÉS D'APPLICATIONS	
DOMAINE D'APPLICATION	Analyse de la structure cristalline des métaux, en particulier du fer puddlé ou de l'acier, dans le but de déterminer la structure micrographique, les impuretés, les fissures et la porosité.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	Nécessite un prélèvement sur site et des précautions : <ul style="list-style-type: none">- précautions pour ne pas modifier la structure du métal (chauffe, déformation, etc.)- précautions pour que le prélèvement ne nuise pas à la structure (réduction de section, concentration de contraintes, etc.).
LIMITES D'UTILISATION	Il peut être nécessaire de compléter l'intervention par une analyse chimique, ou une analyse X à la micro sonde (pour la détermination des composants des inclusions).
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	Analyse de la taille de grain à une unité près, et de sa forme.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	Chargé d'étude
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATIONNES	
ACCÈS A 1 OU 2 FACES	Une face (prélèvement destructif)
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non



Essais de traction (NF EN ISO 15630-1) :

Acier HA de 1974 :

- Limite élastique minimum : 420 N/mm²

- Allongement minimum : A=14%

- Diminution significative de la limite élastique : 35 et 40% tablier

- Augmentation de l'allongement à ruptures : A=25,8 et 22,5%



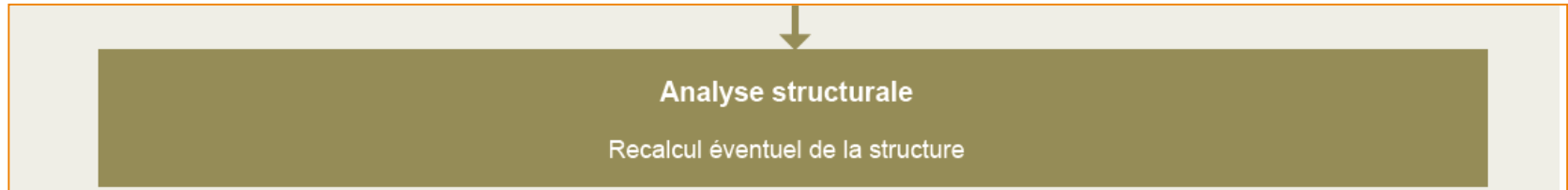
• Démarche de diagnostic

– Conclusions

- Profils sclérométriques : ~ 26m² pile P3, ~40m² intrados tablier
- Profils soniques : altération des propriétés du béton au-delà des pertes de matériaux par écaillage (jusqu'à 12 cm / parement d'origine)
- ATG : dans le béton restant en place : $T < 450^\circ$
- Altération significative des armatures désenrobées
- En périphérie des zones désenrobées (enrobage <3cm) : altération probable des propriétés des armatures
- Pas de risque d'altération des propriétés des armatures précontraintes ($T < 100^\circ$)
- Altération significative d'un AA/4



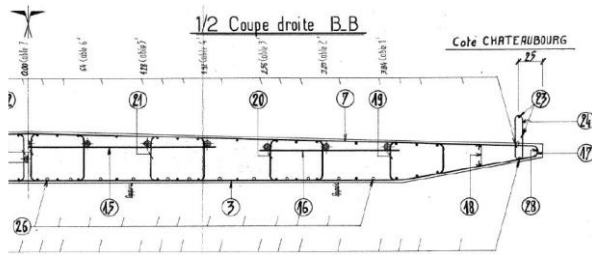
- **Démarche de diagnostic**
 - **Analyse structurale**



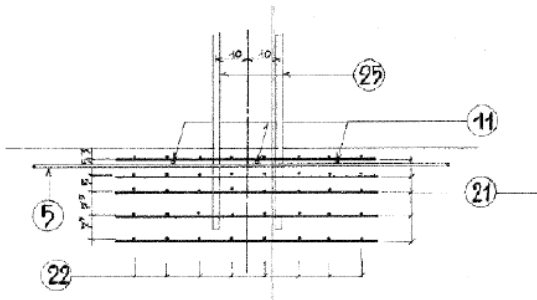


• Démarche de diagnostic

– Analyse structurale



- Zone de moment négatif (fibre sup. tendue) => impact limité de l'incendie qui a touché la fibre inf.
- **MAIS** Altération béton et armatures : modification de la distribution des contraintes dans les sections BA au droit de l'incendie (réhaussement du centre de gravité et de l'axe neutre)
 - ⇒ Modification des efforts à reprendre par les armatures passives
- Estimation de cette redistribution complexe (recalcul approfondie mais avec bcp d'incertitudes) => pas opportun
 - ⇒ **Approche conservative : reconstitution totale des sections**



- Goujons de l'articulation : reprise des efforts horizontaux
- Dimensionnement P3 : reprise de 6 tonnes avec 8 goujons
- Hyp. de la perte de 2 goujons : contrainte < limite (108Mpa)
 - ⇒ **L'altération des appuis n'est pas de nature à remettre en question le fonctionnement des articulations**



• Démarche de diagnostic

– Préconisations



- Purge de 10 cm de profondeur (/parement initial)
- Remplacement à l'identique des armatures désenrobées et celles dont l'enrobage est $<$ à 3 cm (sciage)
- Reprise des efforts (respect des longueurs de recouvrement) => purge complémentaire d'une longueur égale à la longueur de recouvrement
- Reconstitution de la section de béton par béton projeté voie sèche (NF, R4)
- Articulation : calage et matage (ou injection)
- Précautions, suggestions :
 - Trafic interrompu pendant les phases de projection
 - Stabilité de la structure durant la phase de purge (béton, armatures) (à justifier par l'entreprise) => étaieage provisoire ?
 - Participation des sections reconstituées à la reprise des charges permanentes (à justifier par l'entreprise) => étaieage préalable à la projection, chargement travée adjacente ?
 - Traitement des fissures sur la face Nord de la pile P3
 - Réalisation d'une épreuve de chargement après travaux
 - Réalisation d'une Inspection Détaillée après travaux (ITSEO, fasc1)