

AUTOROUTE A26 : BILAN DE 25 ANS DE GESTION PATRIMONIALE DE 253 OUVRAGES D'ART POTENTIELLEMENT AFFECTÉS PAR DES RÉACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE

HIGHWAY A26: 25 YEARS MANAGEMENT OF 253 BRIDGES POTENTIALLY AFFECTED BY INTERNAL SWELLING REACTIONS

BROUXEL Marc*, SERGENT Grégoire **, JEANJEAN Yannick * et Bruno GODART******

* CONCRETE SARL, 13-15 allée des Gingkos, 69500 Bron, France

** CONCRETE SARL, Campus la Cessoie, 41 rue Simon Vollant, 59130 Lambersart, France

*** SANEF, Direction Construction et Patrimoine, BP50073, 60304 Senlis cedex, France

**** Université Paris-est - IFSTTAR, Cité Descartes - 14-20 bd Newton, 77447 Champs-sur-Marne, Cedex 2, France

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de son processus de surveillance des ouvrages, la SANEF a mis en évidence en 1990, sur le tronçon Laon – Calais de l'autoroute A26, la présence

d'ouvrages d'art atteints par des attaques différées de leurs bétons de structure (alcali-réaction et/ou formation différée d'ettringite).

Les premiers signes ont été observés sur quelques ouvrages proches de Béthune ce qui a conduit la SANEF à lancer

une campagne de reconnaissance pour déterminer l'ampleur des désordres affectant tous les ouvrages de l'autoroute A26.

La SANEF avait déjà été confrontée à des désordres liés à l'alcali-réaction sur l'autoroute A4 (district de Coutevroult) où deux ouvrages, les PS 24 et 32, ont dû être dynamités, et un autre ouvrage, le PS25, a fait l'objet de travaux d'imperméabilisation. Fort de cette expérience et sur la base des connaissances de l'époque, une gestion globale des ouvrages d'art de l'autoroute A26 (Figure 1) potentiellement affectés par ces phénomènes de gonflement interne a été progressivement déployée.

Ce document décrit la démarche qui a été mise en place et les principaux résultats obtenus ainsi que les décisions qui ont été prises au cours de ces 25 dernières années.

II. INVESTIGATION INITIALE (1990 - 1992)

La première étape a consisté à faire, entre 1990 et 1992, un audit de l'ensemble des ouvrages d'art de l'autoroute A26. Cette première étude a permis de balayer tous les ouvrages en béton armé en se basant volontairement sur des techniques d'investigations rapides et sommaires et en réalisant ainsi des observations à 3 niveaux :

- Au niveau macroscopique : inspection visuelle rapide de l'ouvrage,

- Au niveau microscopique : prélèvement d'échantillons et observations sur lames minces des décollements pâte-granulats,

- Au niveau minéralogique : analyse d'une fraction de l'échantillon pour rechercher de minéraux potentiellement délétères (ettringite et thaumasite) par diffraction des Rayons X.

Les premières inspections visuelles ont montré que les zones les plus dégradées des Passages Supérieurs étaient alors (Figures 2 et 3) :

- Le sommet des piles sous appuis ou bossages (fissures verticales de moins de 1mm avec faïençage centimétrique).

- La mi-hauteur des piles (faïençage centimétrique ou décimétrique).

- Les abouts de chevêtres de culées (faïençage centimétrique et fissures verticales de 1 à 2 mm).

Les zones les plus dégradées des Passages Inférieurs étaient (Figures 4 et 5) :

- Les piédroits (fissures verticales, faïençage au droit des infiltrations sous le terre-plein central).

- Les murs en retour (faïençage centimétrique).

Les ouvrages ont alors été classés une première fois en 4 groupes sur la base de ces observations visuelles :

- Groupe 1 : ouvrages présentant de très nombreuses dégradations,

- Groupe 2 : ouvrages présentant de nombreuses dégradations,

- Groupe 3 : ouvrages présentant quelques dégradations,

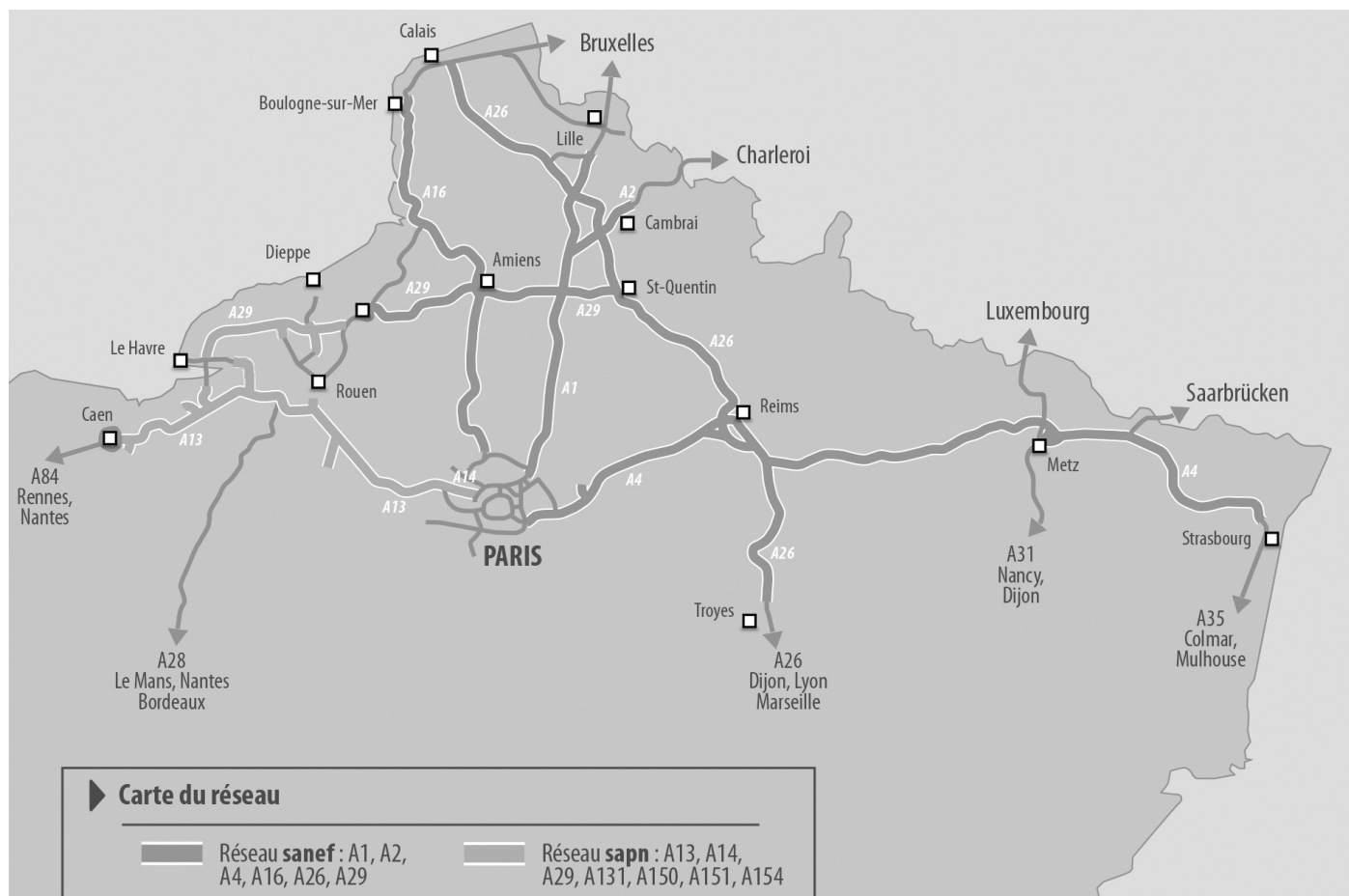


Figure 1 : Carte du réseau SANEF (Google Map ©).



Figure 2 : Faïençage d'une pile de pont.

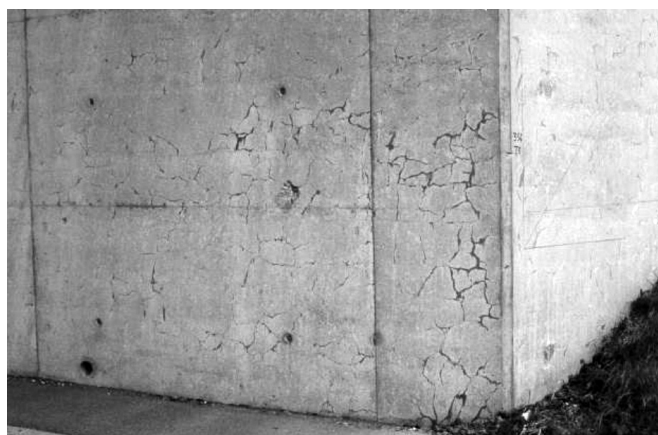


Figure 3 : Vue de détail du faïençage.



Figure 4 : Faïençage du piédroit et du mur en retour.

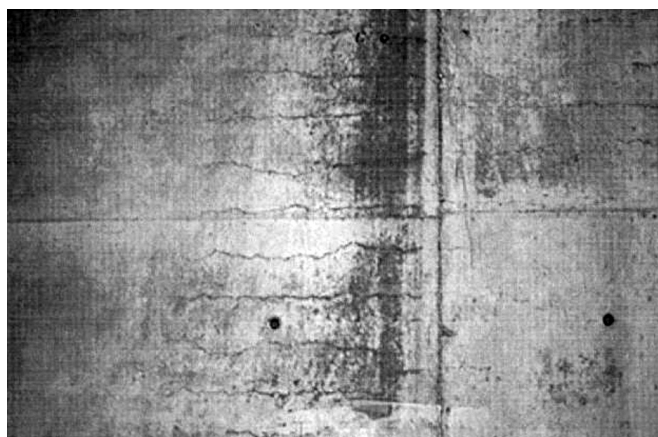


Figure 5 : Faïençage du piédroit sous le terre-plein central.

– Groupe 4 : ouvrages ne présentant aucune dégradation au jour de la visite.

À partir des deux lames minces confectionnées par ouvrage, la présence de fissures et de décollements pâte de ciment – granulats a conduit à classer les échantillons ainsi :

- Groupe 1 : béton présentant de très nombreux décollements et/ou fissures,
- Groupe 2 : béton présentant d'assez abondants décollements et/ou fissures,
- Groupe 3 : béton présentant quelques décollements et/ou fissures,
- Groupe 4 : ouvrages ne présentant aucun(e) décollement ou fissure.

Enfin, deux échantillons par ouvrage ont été broyés et analysés par diffraction des rayons X. Les principaux minéraux détectés sont le quartz, la calcite, la portlandite, l'ettringite et la dolomie. Ces minéraux reflètent la composition de la pâte de ciment et des granulats utilisés pour confectionner le béton. Certains minéraux présents en trop faible quantité ne sont pas détectés. D'autres minéraux ont pu être détruits plus ou moins partiellement par le broyage et ne sont plus identifiables. Enfin, il convient de rappeler que les gels d'alcali-réaction sont

des phases amorphes, non cristallisées et non identifiées par l'analyse par diffraction des rayons X. Par conséquent, l'ettringite (à laquelle la thaumasite parfois associée a été rajoutée, Brouxel et Valière, 1992) est le minéral sur lequel, le classement a été basé, étant entendu que cette analyse ne fait pas la part entre l'ettringite primaire et l'ettringite secondaire (ou ettringite différée) :

- Groupe 1 : ouvrages avec : $> 4,5 \%$ d'ettringite,
- Groupe 2 : ouvrages avec : $3,5 \% < \text{ettringite} < 4,5 \%$,
- Groupe 3 : ouvrages avec : $2,5 \% < \text{ettringite} < 3,5 \%$,
- Groupe 4 : ouvrages avec : $2,5 \% < \text{ettringite}$.

Dans la mesure où le niveau d'observation et d'analyse n'est pas le même pour chacun de ces classements, une pondération a été réalisée pour définir la note finale de l'ouvrage :

- Dégradation sur site : $\times 1,5$,
- Microscopie optique : $\times 1$,
- Diffraction des rayons X : $\times 0,5$.

Sur les 253 ouvrages d'art de ce tronçon de l'autoroute A26, 224 ouvrages ont fait l'objet de cette étude. 29 ouvrages ne sont pas concernés par ces pathologies de gonflement interne (ouvrages construits récemment, notamment au droit de nouveaux échangeurs, ouvrages

métalliques et ouvrages en terre armée). Ce système de notation a débouché sur un classement des 224 ouvrages en béton de l'autoroute A26 en 4 groupes :

- Groupe 1, les plus dégradés : 24 ouvrages (10%).
- Groupe 2 : 63 ouvrages (28%).
- Groupe 3 : 116 ouvrages (52%). Total des groupes 1+2+3 = 203 ouvrages.
- Groupe 4 : les moins dégradés : 21 ouvrages (10%).

Il convient de souligner également qu'à ce stade de l'étude, 46 ouvrages ont été considérés comme potentiellement réactifs d'après leur composition chimiques et minéralogiques (présence de granulats potentiellement réactifs vis-à-vis de l'alcali-réaction et/ou teneurs élevées en cristaux d'ettringite).

Les ouvrages du groupe 1 sont essentiellement des Passages Inférieurs, et parmi ceux-ci, quatre ouvrages sont particulièrement dégradés : PI328, PI 329, PI 330 et PI 338. Ces quatre ouvrages ont été construits entre avril et décembre 1974, vraisemblablement pendant les mois d'été et faisaient partie de la déviation de Béthune. Cette déviation fut le premier tronçon de l'Autoroute A26.

III. ANALYSE DES DOSSIERS D'OUVRAGE

Étant donné la longueur du tracé (plus de 200 km) et la durée des travaux (plus de 10 ans), les matériaux utilisés (sable, graviers et ciment) varient d'une section à l'autre. On trouve ainsi les formulations suivantes :

Section Saint-Omer / Lillers :

- ciment : Lumbres, sable et graviers : marbre du Boulonnais

Section Lillers / A1 :

- ciment : Barlin, sable : Rue ou Seine, graviers : Gaurain (calcaire de Tournaisis)

Section A1 / Cambrai-Masnières :

- ciment : Cantin, sable : Rue ou Seine, graviers : Gaurain (calcaire de Tournaisis)

Section Cambrai-Masnières / Gauchy :

- ciment : Origny Ste Benoite, sable : Seine ou Oise, graviers : Viry Noureuil

Section Gauchy / Laon :

- ciment : Origny Ste Benoite, sable : Seine ou Oise, graviers : Oise ou Viry Noureuil

Section Laon / Vallée de l'Aisne :

- ciment : Origny Ste Benoite, sable et graviers : Oise
- À la lumière des données disponibles aujourd'hui, il apparaît que le calcaire de Tournaisis (carrière de Gaurain au sud de la Belgique) est particulièrement réactif vis-à-vis de l'alcali-réaction et que la cimenterie de Barlin (région de Béthune), aujourd'hui fermée, a fourni un ciment particulièrement riche en alcalins (Prin et Brouxel, 1992, Salomon et al., 1992). La teneur en alcalins équivalents du ciment de Barlin était d'environ 1,12 % (0,4 % Na_2O + 1,1 % K_2O), soit 4,4 kg d'alcalins par m^3 pour un béton dosé à 400 kg de ciment. Il est donc "normal" que les ouvrages les plus dégradés se situent dans la section Lillers - autoroute A1 (ouvrages de Béthune).

Il convient également de souligner que des matériaux à base de schistes houillers (potentiellement riches en sulfures) provenant des terrils ont été utilisés pour remblayer les ouvrages d'art de la région de Béthune.

IV. DIAGNOSTIC MATÉRIAU INITIAL (1992 – 1993)

Afin de pouvoir conclure sur l'origine des désordres et réfléchir à la mise en place d'une politique de maintenance, un diagnostic approfondi des quatre ouvrages d'art les plus dégradés du groupe 1 a été effectué dans un premier temps.

Ce diagnostic comprenait :

- la mise en place d'une instrumentation simplifiée à l'aide de trièdres (Godart et al., 1992, méthode LCPC n°47) et de plots d'extensométrie,
- le prélèvement d'échantillons pour réaliser des essais mécaniques et physico-chimiques,
- des observations au microscope optique pour caractériser la nature des granulats et observer la microfissuration de la pâte de ciment,
- des observations au microscope électronique à balayage pour identifier la nature des phases délétères néoformées (gel d'alcali-réaction et/ou ettringite et/ou thaumasite), des essais de vieillissement accéléré :

- spécifiques à l'alcali-réaction. Les éprouvettes sont soumises à des cycles de passage en autoclave à 120°C en milieu humide de 24 heures suivis de 4 heures de refroidissement. Le seuil d'expansion retenue est de 0,11%. Entre 0,02 et 0,06 % les bétons sont considérés comme faiblement réactifs. Entre 0,06 et 0,11 % ils sont considérés comme moyennement réactifs. Il s'agit d'un essai développé initialement pour caractériser la réactivité des granulats dans une formulation de béton donnée (essai de caractérisation des granulats à l'autoclave, Tang et al. 1983) et qui a été détourné pour évaluer le potentiel de gonflement résiduel de bétons affectés par l'alcali-réaction. Cet essai jugé trop sévère, n'est plus pratiqué aujourd'hui et a été remplacé par des essais mis au point par le LCPC (méthode LCPC n° 44).

- spécifiques à l'attaque sulfatique (essai développé par Garbowski et al. 1992). Les carottes utilisées ont la même taille que celles utilisées pour l'essai spécifique à l'alcali-réaction. Elles sont d'abord soumises à des cycles journaliers d'immersion dans l'eau à 21°C et de chauffage en étuve à 82°C pendant 5 jours pour initier le développement des cristaux d'ettringite. Au bout de 5 jours, la longueur des carottes est mesurée (point 0) et les carottes sont plongées dans l'eau distillée à 21°C. La longueur des carottes est mesurée tous les 3 jours et si l'expansion moyenne est inférieure à 0,10 %, le béton est considéré comme non expansif vis-à-vis des réactions ettringitiques. Cet essai n'est plus pratiqué aujourd'hui et a été remplacé par des essais mis au point par le LCPC. L'essai actuel prend en compte les périodes de chauffage pour les bétons frais (méthode LCPC n° 66) mais ces périodes de chauffage ne sont pas réalisées pour les bétons prélevés sur des ouvrages d'art existants (méthode LCPC n° 67).

Dans les deux méthodes, le gonflement est mesuré pendant 52 semaines.

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 1 ci-après. Ils ont servi de base aux réflexions pour la mise en place de leur suivi sachant qu'en 1993, les connaissances relatives à ces pathologies étaient nettement moins développées qu'à ce jour.

Les PI 328 et 338 ont fait l'objet d'une « contre-expertise » par le LCPC en 1995, soit trois ans après l'expertise initiale. Si une attaque sulfatique a bien été mise en évidence par le LCPC dans les bétons de ces deux ouvrages, il convient de souligner qu'aucune alcali-réaction n'a été observée dans les bétons du PI 328. Cette différence s'explique vraisemblablement par le fait que l'alcali-réaction n'était pas ou n'était plus la pathologie dominante dans ces bétons. Ces observations accréditent par contre le fait que ces deux pathologies sont souvent présentes de façon concomitante.

V. SUIVI ET TRAITEMENT DES OUVRAGES : 1993 À 2006

Une mission conjointe SANEF, Concrete, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ministère des Transports (IGOA) a été créée en janvier 1993 pour examiner la situation. Il a été décidé de mettre en place un suivi de la fissuration et de réaliser les travaux d'étanchéité des ouvrages les plus dégradés ou présentant des expansions résiduelles significatives.

V.1. Suivi des ouvrages

Le suivi de la fissuration des ouvrages a été réalisé par la méthode des trièdres (Figure 6, méthode LCPC : mesures du nombre et des ouvertures des fissures sur les axes verticaux, diagonaux et horizontaux de trièdres installés sur les parements des ouvrages). Ce suivi a été mis en place par Concrete pour les ouvrages des groupes 1 et 2 et a été

étendu aux ouvrages des groupes 3 et 4 par les équipes de la SANEF.

Les indices de fissuration ainsi mesurés (moyenne de la somme des ouvertures de fissures) ont permis de classer les ouvrages en 6 catégories :

catégorie A : < 0,15 mm/m

catégorie B : < 0,30 mm/m

catégorie C : < 0,60 mm/m

catégorie D : < 1,20 mm/m

catégorie E : < 2,40 mm/m

catégorie F : > 2,40 mm/m

PI 329

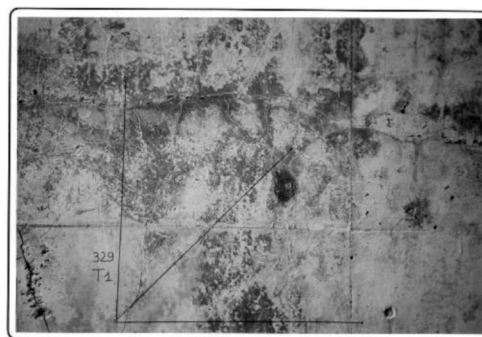
Date : 18 Avril 1994

Température : 7,6 °C

Position : Piédroit Reims - Calais : côté Reims

Trièdre

1



Axes	Ouverture des fissures (mm)	Nombre de fissures	Indice de fissuration (mm/m)	Ouverture moyenne (mm)	Histogramme des ouvertures de fissures (mm)
↑ 1 m	0,3 0,1 0,4 0,1 0,05 0,2 0,8 0,05	8	2,00	0,25	
↗ 1 m	1,7 0,2 0,3 0,2 0,1 0,1 0,4	7	3,00	0,43	
→ 1 m	1,7 0,5 0,2 1,0 0,8	5	4,20	0,84	
Totalité		20	3,07	0,51	

Figure 6 : Indice de fissuration du PI 329.

OA	Début fissures	Zone atteinte	Pathologie
PI 338 (PIPO)	1983 traversantes	Tablier et piédroits	Présence d'ettringite secondaire et de thaumasite Pas d'expansion résiduelle potentielle mesurée
PI 328 (PICF)	< 1983 traversantes	Tablier et piédroits	Présence de gel d'alcali-réaction, d'ettringite et de thaumasite Fort potentiel d'expansion résiduelle vis-à-vis de l'alcali-réaction et de l'attaque sulfatique
PI 329 (VIPP)	1977 Fissures importantes	Voiles culées	Présence de gel d'alcali-réaction en grande quantité, d'ettringite et thaumasite Fort potentiel d'expansion résiduelle vis-à-vis de l'alcali-réaction et de l'attaque sulfatique
PI 330 (VIPP)	< 1983 importantes	Voiles culées	Présence de gel d'alcali-réaction et d'ettringite Pas d'expansion résiduelle potentielle mesurée

Tableau 1 : Synthèse des résultats obtenus sur les 4 ouvrages les plus dégradés.

Les mesures ont été effectuées deux fois par an, au printemps et à l'automne. Concrete a effectué les mesures sur les ouvrages présentant une fissuration supérieure à 0,6 mm/m (catégories D, E et F). Le personnel SANEF des districts a effectué les mesures sur tous les autres ouvrages. Concrete a assuré la formation du personnel SANEF effectuant les relevés. Dans la mesure du possible, la même personne a été chargée, au fil des ans, de réaliser ces relevés. L'ensemble des données a été rassemblé à la SANEF dans une base de données spécifique "Suivi des Trièdres". Chaque année un bilan de l'évolution de la fissuration a été fait conjointement entre la SANEF et Concrete et les ouvrages présentant une évolution de leur fissuration en catégorie D, E ou F ont fait l'objet d'une pré-visite pour s'assurer du caractère évolutif de la fissuration et écarter d'éventuels artefacts de mesure.

Il a ainsi été possible de montrer que certains ouvrages, pourtant bien dégradés, ne montraient pas d'évolution de leurs indices de fissuration. C'est le cas du PI 328 (Figure 7) qui a servi d'ouvrage test pour effectuer notamment des essais sur les produits d'imperméabilisation.

Les ouvrages en catégorie D, E ou F (indice de fissuration supérieur à 0,6 mm/m) ont fait l'objet ensuite :

- Dans un premier temps, d'une étude spécifique visant à déterminer la nature de la pathologie à l'origine des désordres observés (diagnostic matériau identique à celui décrit au chapitre IV),
- Puis, dans un deuxième temps, de travaux, si la pathologie était avérée et que le potentiel résiduel de gonflement était important,

- Et / ou d'un suivi de leur fissuration.

V.2 - Traitement des ouvrages

En fonction des résultats des observations et des essais, et en fonction de l'état de fissuration de l'ouvrage, il a été décidé, ou non, d'effectuer des travaux sur l'ouvrage. Ainsi, les ouvrages les plus dégradés et/ou présentant un fort potentiel d'évolution ont été sélectionnés. Au total, 10 ouvrages (PI 322, 328, 329, 330, 354, 355, 361, 363, 365, et PS 357) ont fait l'objet de travaux de réhabilitation : Avec mise en œuvre, soit, dans 9 cas sur 10, d'un revêtement hydraulique souple, type Masterseal 550, soit, dans le cas du PI 328 (Figure 8), d'un revêtement polymère souple à base de styrène butadiène, sur l'ensemble des parements visibles (piédroits, murs en aile et intrados de tablier).

Avec réfection de la chape d'étanchéité de l'extrados des tabliers (Figure 9).

Pour les ouvrages ne faisant pas l'objet de travaux en raison d'une pathologie peu marquée ou d'une absence d'évolution résiduelle significative, le suivi de la fissuration par trièdres a été poursuivi.

Les travaux d'imperméabilisation des ouvrages se sont étalés sur plus de 7 ans (entre 1996 et 2006) au fur et à mesure de l'évolution de la fissuration des ouvrages et des résultats des diagnostics matériaux. Les travaux ont été réalisés selon le phasage suivant :

- 1997 : PI 322, PI 329, PI 330 et PI 361,
- 1999 : PI 354,
- 2000 : PI 355 et PS 357,

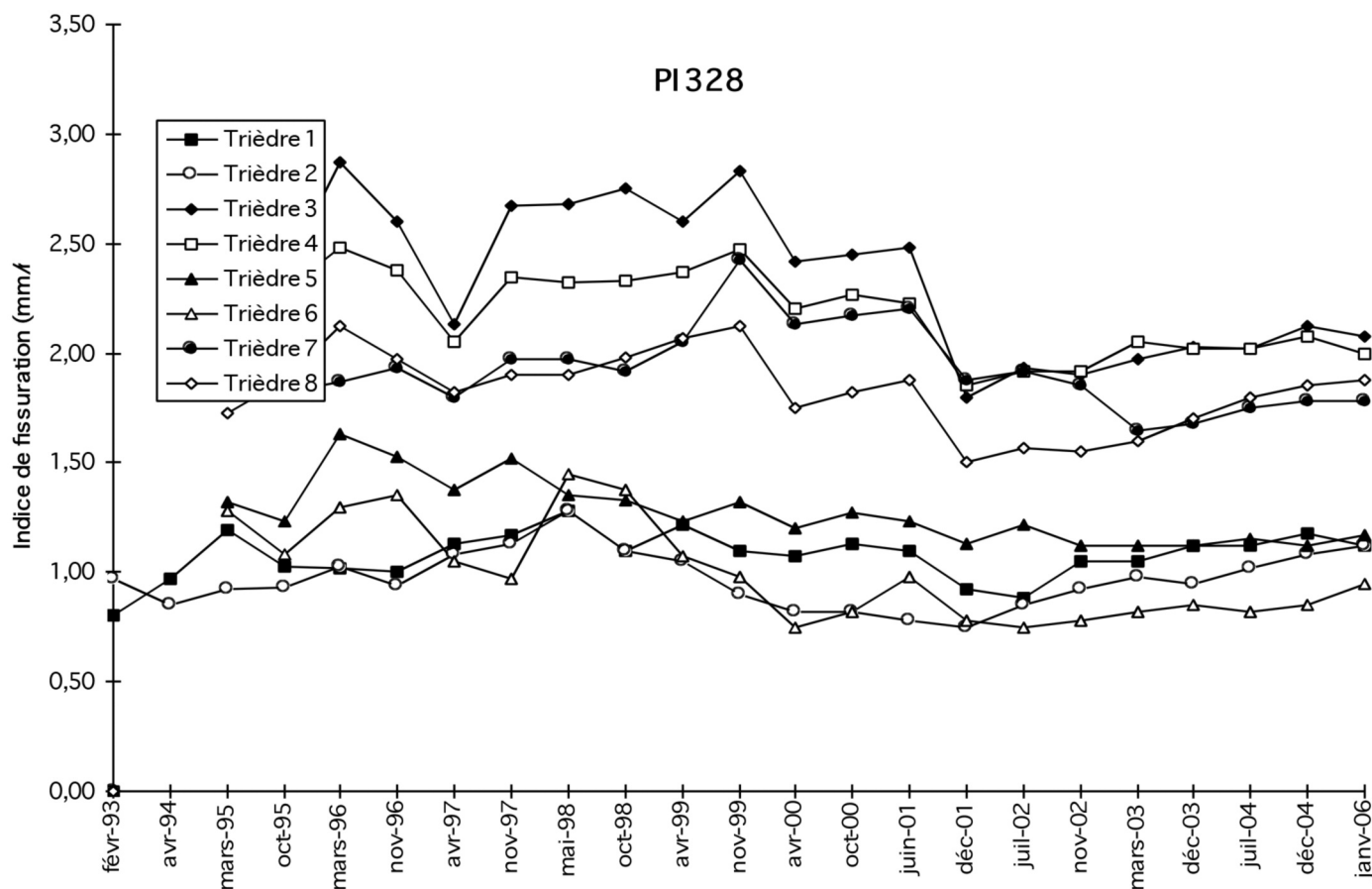


Figure 7 : Évolution de l'indice de fissuration du PI 328 entre 1993 et 2006.



Figure 8 : Piédroits du PI 328 revêtus par un produit à base de styrène-butadiène.

- 2003 : PI 363 et PI 365,
- 2006 : PI 328 (sur un seul piédroit du fait de l'absence d'évolution de la fissuration).

V.3. Instrumentation des ouvrages revêtus

Afin de vérifier que le traitement appliqué sur les ouvrages ralentit de manière satisfaisante les réactions internes au béton, les ouvrages traités ont fait l'objet d'un suivi de leur fissuration à l'aide de capteurs mesurant :

Soit l'ouverture d'une fissure,
Soit la déformation globale du parement (y compris l'ouverture d'un grand nombre de fissures) par l'intermédiaire de barres de mesures fixées sur le parement des ouvrages (Figures 10 et 11). Par ouvrage, il a été installé un capteur par piédroit et intrados de tablier et un capteur sur 2 barres de déplacement de 6 m et de 12 m.

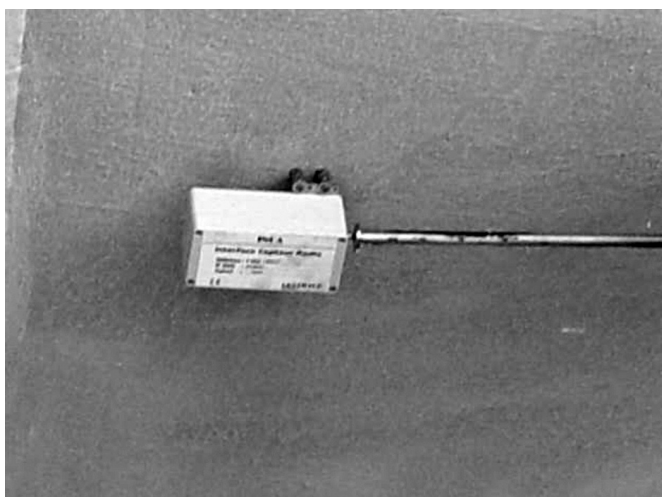


Figure 10 : capteur de déplacement à l'extrémité d'une barre de mesure.



Figure 9 : Réfection de l'étanchéité du tablier du PI 328.

V.4. Essais préliminaires à la réalisation des travaux

Parmi les ouvrages les plus dégradés, le PI 328 a été sélectionné pour réaliser des essais et des investigations complémentaires.

V.4.1. Enlèvement du remblai présent à l'arrière du piédroit

Les ouvrages affectés par des réactions de gonflement interne présentent une fissuration importante de leurs parements exposés à l'air et aux intempéries. Aucune information n'est disponible sur l'état des parements en contact avec les remblais. Il a donc été décidé de procéder au décapage du remblai derrière un des piédroits du PI 328 (piédroit côté Calais, sens Reims - Calais).

Pour ce faire, en 1993, un rideau de palplanches a été battu 3 mètres derrière l'ouvrage (Figure 12) et le remblai constitué de schistes noirs et de schistes rouges a été retiré à la pelle mécanique (Figure 13). Après décapage haute

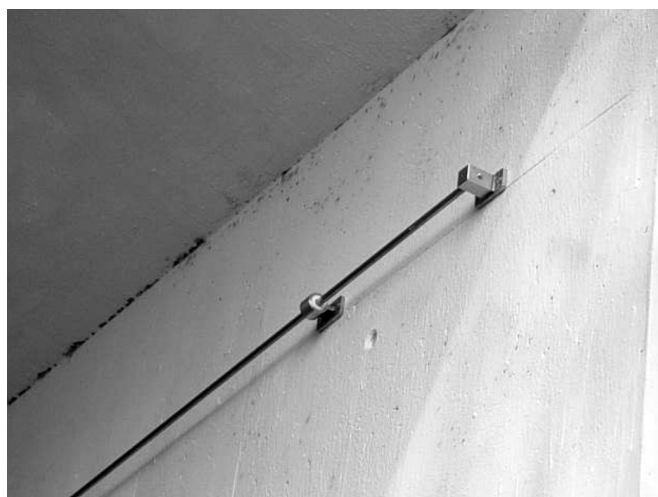


Figure 11 : Barre de mesure fixe à une extrémité.

pression, il a été possible de procéder à l'inspection du parement. Il est apparu quelques désordres ponctuels (béton pulvérulent), notamment à l'interface schistes noirs – schistes rouges (Figure 14), mais aucun faïençage caractéristique de l'alcali-réaction ou de l'attaque sulfatique n'a été observé sur le parement intérieur, à la différence du parement extérieur. Cette information, capitale, a permis de valider le traitement envisagé, à savoir réaliser uniquement une imperméabilisation des parements exposés à l'air et à l'eau.

V.4.2. Essais sur les produits d'imperméabilisation

Il a ensuite été réalisé sur cet ouvrage, en 1996, des essais de produits d'imperméabilisation sur un piédroit (piédroit côté Reims, sens Calais - Reims). L'objectif de ces essais était de retenir un produit ou une famille de produits pour réaliser l'imperméabilisation des parements extérieurs. En effet, avant de sélectionner un produit spécifique au traitement d'ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, il faudrait idéalement pouvoir répondre à deux questions :

- l'eau interne au béton suffit-elle pour alimenter et entretenir la réaction ? Si la réponse à cette question est positive, il est probable que le fait d'imperméabiliser le béton ne fera que ralentir l'expansion. La question sera alors de savoir si l'on peut ralentir suffisamment la réaction au point d'éviter la fissuration du béton et du revêtement d'imperméabilisation.



Figure 12 : Rideau de palplanches à l'arrière du piédroit.

- le revêtement à mettre en œuvre doit-il assurer une simple imperméabilité à l'eau de pluie, ou une imperméabilité plus complète à la vapeur d'eau ? La plupart des revêtements habituellement appliqués sur les ouvrages d'art présentent une certaine perméabilité à la vapeur d'eau afin de permettre à l'eau contenue dans le béton de s'évaporer.

Les produits retenus devaient :

- être imperméables à l'eau,
- avoir une certaine souplesse pour pouvoir supporter une éventuelle fissuration résiduelle,
- avoir une bonne durabilité (résistance au pelage et au cloquage, maintien des propriétés élastiques et de la résistance à la fissuration et bonne résistance au gel-dégel),
- avoir une adhérence suffisante au support (au moins 1 MPa).

Un produit à base de styrène – butadiène (Decadex de Pentagon), imperméable à l'eau et à la vapeur d'eau et 5 produits à base de liants hydrauliques modifiés (Sika, MBT, Kristo, Lanko et Betorec), imperméables à l'eau mais pas à la vapeur d'eau, ont été mis en œuvre directement par les fournisseurs (Figure 15) sur des surfaces de 2 m x 2 m. Le support a été préalablement sablé et des essais d'adhérence ont été effectués pour vérifier l'épaisseur et l'adhérence des produits mis en œuvre (Figure 16). En parallèle, des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur des carottes revêtues par ces mêmes produits.



Figure 13 : Retrait du remblai à la pelle mécanique.



Figure 14 : Parement du piédroit côté remblai après décapage des terres.



Figure 15 : Application d'un liant hydraulique modifié sur une zone test du PI 328.

Ces essais ont permis de confirmer que les liants hydrauliques modifiés étaient parfaitement adaptés pour ralentir les phénomènes de gonflements résiduels liés à l'alcali-réaction et/ou à l'attaque sulfatique. Ils ont également confirmé que le produit de la société Décadex pouvait, grâce à sa très forte élasticité et à son imperméabilité, répondre aux critères imposés par les pathologies affectant les ouvrages d'art de la SANEF. À ce jour, les produits mis en œuvre à la SANEF depuis plus de 20 ans sont le Masterseal de la société BASF et le Décadex de la société Pentagon.

V.4.3. Essai de chargement d'un tablier fortement fissuré

Le PI361 (district de Saint Omer) présentait un tablier fortement fissuré (fissuration horizontale dans l'épaisseur et faïençage dans la masse, figures 18 et 19). Le diagnostic matériau a confirmé l'existence d'une alcali-réaction avec toutefois des potentiels limités d'expansion dans le temps. Il a donc été décidé, comme pour tous les ouvrages fortement dégradés, de mettre en œuvre un revêtement d'étanchéité sur les parois en contact avec l'environnement ainsi



Figure 18 : Tablier fortement faïencé du PI 361.



Figure 16 : Essais d'adhérence.

que sur le tablier (réfection de l'étanchéité sous chaussée). Toutefois, étant donné le niveau de fissuration anormalement élevé de l'ouvrage, il a également été décidé d'effectuer un essai de chargement des deux tabliers de l'ouvrage. Un premier essai de chargement a été réalisé en 1995. Quatre points de mesure supplémentaires ont été effectués en plus du point situé au centre de l'ouvrage (cas de charge réglementaire de référence). L'objectif était notamment de vérifier les effets des désordres liés à l'alcali-réaction dans la partie la plus abîmée du tablier (partie centrale côté terre-plein central). Cet essai de chargement a permis de montrer :

- Un retour élastique des tabliers,
- Une flèche légèrement plus importante (en partie centrale et côté terre-plein central) par rapport à l'essai de chargement initial de 1975, conduisant à une très faible diminution du coefficient de sécurité dans la partie la plus dégradée (12 %),
- Aucune variation dans les autres parties des deux tabliers par rapport à l'essai de chargement initial de 1975.

Ces résultats ont confirmé que l'ouvrage pouvait faire l'objet de simples travaux d'imperméabilisation et qu'il conviendrait de vérifier l'évolution de son comportement dans un délai de 10 ans.



Figure 19 : Prélèvement par carottage (à noter la fissuration horizontale du tablier).

La méthodologie suivie par la SANEF pendant ces 10 premières années a été présentée lors de la 11^e conférence internationale sur l'alcali-réaction en 2000 à Québec (Baillemont et al., 2000).

V. PREMIER BILAN : 2006

Un premier bilan du suivi des ouvrages a été établi en 2006, soit 16 ans après le début du suivi, par la mission conjointe SANEF, Concrete, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ministère des Transports (IGOA) créée en janvier 1993 pour examiner la situation. Ce premier bilan avait notamment pour but d'examiner :

- les mesures de suivi,
- l'évolution constatée,
- les mesures envisagées à moyen et long terme.

L'objectif était également d'être en cohérence avec la politique française de maintenance des ouvrages atteints de réactions de gonflements internes définie en France (Godart et al., 2004).

VI.1. Patrimoine couvert par les investigations

Il apparaît que 243 ouvrages sont suivis sur 253. Les dix ouvrages qui ne font pas l'objet d'un suivi sont bien identifiés et sont susceptibles d'être intégrés dans les ouvrages suivis en cas d'évolution qui serait constatée lors de la surveillance périodique.

VI.2. Modalités du suivi réalisé avec les trièdres

Le suivi de la fissuration est réalisé sur les 243 ouvrages par mesure de l'ouverture cumulée de fissures selon la méthode LCPC des trièdres. Les indices de fissuration conduisent au classement des ouvrages selon 6 catégories réparties de la façon suivante :

- catégories A, B et C : fissuration inférieure à 0,6 mm/m : 230 ouvrages suivis par les districts de Béthune (46 ouvrages), St Omer (47 ouvrages), Cambrai (26 ouvrages) et St Quentin (84 ouvrages).
- catégories D, E et F : fissuration supérieure à 0,6 mm/m : 13 ouvrages suivis par Concrete dans les districts de Béthune (8 ouvrages : 322, 328, 329, 330, 338, 354, 355 et 357), de Saint Omer (3 ouvrages : 361, 363 et 365), d'Arras (1 ouvrage : 525) et Saint Quentin (1 ouvrage : 631).

Les trièdres (minimum 3 par ouvrage) sont mesurés deux fois par an par les districts ou par Concrete. Les données sont centralisées dans une base de données spécifique et les éventuelles évolutions sont validées conjointement par la SANEF et Concrete. Cette méthodologie paraît bien adaptée et est maintenue au même rythme, c'est-à-dire deux fois par an, sauf pour les ouvrages qui semblent être stabilisés et pour lesquels un rythme annuel peut être admis.

VI.3. Modalité du diagnostic matériau

En cas d'évolution de la fissuration, la méthodologie implique de :

- Réaliser des carottes dans les parties les plus dégradées,
- D'observer le béton au microscope polarisant (caractérisation des granulats et étude de la micro-fissuration de la pâte de ciment et des granulats),
- D'observer les bétons au microscope électronique à balayage (caractérisation des gels d'alcali-réaction ou des cristaux d'ettringite secondaire).
- De réaliser des essais de vieillissement accélérés.

Il apparaît clairement que les ouvrages se dégradent moins que ce que les essais de vieillissement ultra-accéléré laissaient supposer. Il est donc décidé d'abandonner les essais de Tang et al. 1983 et de Garbowski et al. 1992 et de les remplacer, en cas de nouvelles études, par les essais mis au point par le LCPC (méthode LCPC n°44 pour l'alcali-réaction et méthode LCPC n°67 pour l'attaque sulfatique).

VI.4. Modalité du suivi de la fissuration par capteurs

Les neuf ouvrages protégés entièrement par un revêtement à base de liant hydraulique modifié ont été instrumentés avec des capteurs de déplacement positionnés, soit au droit de fissures, soit à l'extrémité de barres verticales de 3, 5, 6 ou 12 m en fonction de la géométrie des ouvrages (Figure 20). Le principe de cette instrumentation est de détecter un gonflement qui serait masqué par le revêtement qui est suffisamment souple pour ne pas fissurer sous un gonflement modéré (Delaby et al., 2004).

Les résultats obtenus entre 1997 (pour les premiers ouvrages équipés) et 2006 (date du premier bilan) ont mis en évidence un certain nombre de problèmes liés au fonctionnement des capteurs et à leur entretien (problèmes d'alimentation par panneaux solaires ou batterie, vieillissements prématurés, corrosion des palpeurs). De plus, les mesures sur fissures n'ont pas permis d'obtenir des résultats intéressants. Il a donc été décidé de poursuivre uniquement l'instrumentation des capteurs sur barres. Le matériel a été remplacé ou reconditionné et les capteurs ont été reprogrammés pour prendre une mesure toutes les 4 h au lieu de toutes les heures auparavant.

L'instrumentation a permis de mettre en évidence dans la plupart des cas uniquement des variations saisonnières. Aucune augmentation significative n'a été mise en évidence, confirmant l'efficacité des revêtements mis en œuvre.

À l'issue de cette mise à jour, le matériel d'instrumentation suivant était en place :

- PI 322 (VIPP dont les poutres précontraintes ne sont pas affectées par une quelconque pathologie) : 1 barre verticale de 5 m sur piédroit et 1 barre horizontale de 12 m sur piédroit,
- PI 329 (VIPP dont les poutres précontraintes ne sont pas affectées par une quelconque pathologie) : 1 barre horizontale de 12 m sur piédroit,

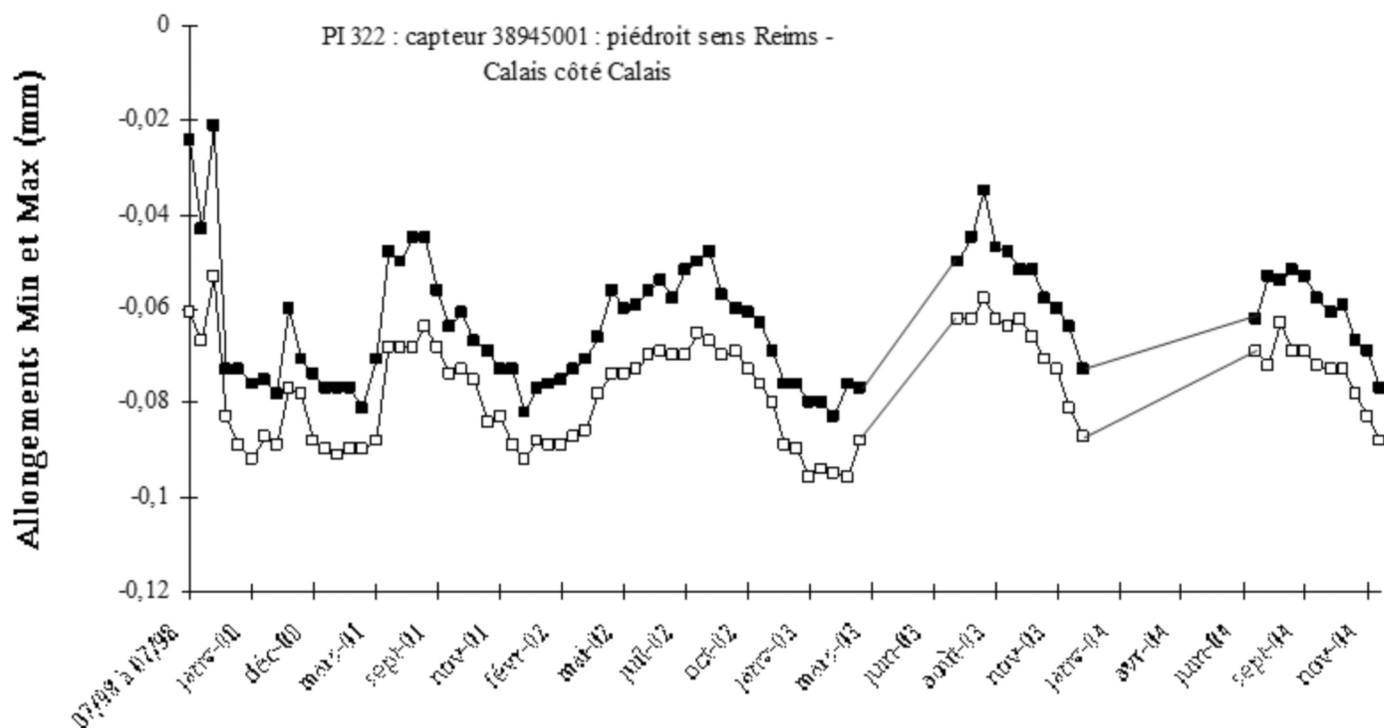


Figure 20 : Synthèse des résultats obtenus entre 1998 et 2004. Seule la valeur maximale par période de 24h est présentée.

- PI 330 (VIPP dont les poutres précontraintes ne sont pas affectées par une quelconque pathologie) : 1 barre horizontale de 12 m sur piédroit,
- PI 354 : 1 barre de 5 m en intrados de tablier et une barre de 12 m sur piédroit,
- PI 355 : 1 barre de 5 m en intrados de tablier et une barre de 12 m sur piédroit,
- PS 357 : 2 barres horizontales de 3 m sur pile,
- PI 361 : 1 barre de 6 m en intrados de tablier et une barre de 12 m sur piédroit,
- PI 363 : 1 barre de 6 m en intrados de tablier et une barre de 12 m sur piédroit,
- PI 365 : 1 barre de 6 m en intrados de tablier et une barre de 12 m sur piédroit.

Le traitement et l'analyse des résultats ont également été modifiés comme le montre la Figure 21 où une faible expansion a été mesurée entre 2009 et 2014 sur le PI 354.

VI.5. Résultats des suivis

Les résultats des suivis réalisés pendant les 16 premières années ont conduit à prendre les décisions suivantes, outre la poursuite des suivis réalisés par trièdres et la poursuite de l'instrumentation par capteurs sur barres après reconditionnement du matériel :

- Essai de chargement à reconduire sur le PI 361, 10 ans après l'essai précédent,
- Vérification de l'état des armatures du PI 329 au droit des fissures les plus ouvertes,
- Reprise des revêtements d'étanchéité dégradés du PI 330 et traitement des fissures présentant des traces d'humidité,
- Suivi de l'état des revêtements de tous les ouvrages traités,
- Reprise des zones cloquées au droit du terre-plein central et traitement des venues d'eau du PI 363.

- Reprise des zones cloques cloquées et mise en œuvre d'une étanchéité au droit du joint entre ouvrages en terre-plein central du PI 365.
- Les revêtements des ouvrages, s'ils ont vieilli et montrent localement des désordres tels que des cloquages, sont globalement en bon état. Il convient de les inspecter régulièrement et de prévoir une réfection lourde tous les 20 ans (durée vie habituellement constatée).

VI.6. Traitements préventifs

Les traitements de fond préventifs suivants ont été préconisés suite à ce bilan :

- Sur deux ouvrages (PI 525 et PI 631), mise en œuvre partielle (parties exposées aux pluies et aux ruissellements) d'un revêtement à base de styrène – butadiène (Decadex de Pentagon),
- En vue d'éviter un « décaissement à l'arrière des culées avec remplacement du remblai, drainage et étanchéité » et la démolition-reconstruction des ouvrages, les travaux suivants ont été réalisés :
 - suppression des chapes dans les trottoirs au profit d'une chape générale,
 - imperméabilisation des terre-pleins centraux au droit des ouvrages avec recueil des eaux de plate-forme,
 - imperméabilisation des remblais sur 30 m de part et d'autre des ouvrages.

VI.7. Fonctionnalité résiduelle des dispositifs de retenue

On dispose de nombreux éléments sur la dégradation des matériaux et leurs conséquences structurales (exemple du

PI 354 - Capteur 2302

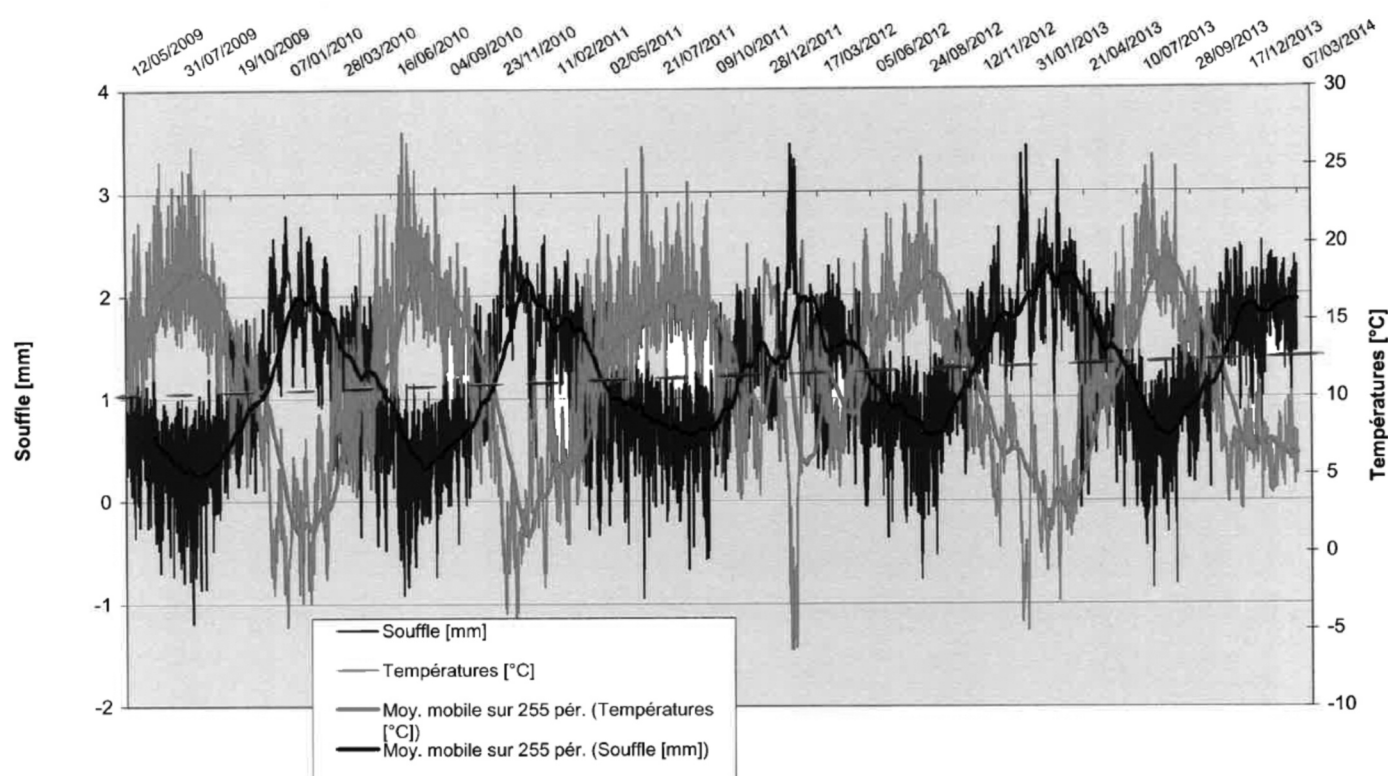


Figure 21 : Instrumentation du PI 354 entre 2009 et 2014.

PI 329 et du PI 361). Par contre, on ne dispose pas d'éléments quantifiés sur la dégradation de la fonctionnalité des ouvrages et notamment l'efficacité des dispositifs de sécurité. Les longrines d'ancrage des dispositifs de retenue sont probablement constituées de bétons identiques à ceux des piédroits et des tabliers. S'ils sont soumis aux intempéries ils peuvent donc développer les mêmes pathologies. Par conséquent, des études spécifiques sont à prévoir au cas par cas.

VII. SUIVI ET TRAITEMENT DES OUVRAGES : 2007 À 2015

VII.1. État des armatures

Des sondages de reconnaissance ont été réalisés sur le PI 329, l'ouvrage le plus fissuré, pour vérifier l'état des armatures au droit des fissures les plus ouvertes. Les investigations n'ont montré aucune armature déformée ou sectionnée.

VII.2. Essai de chargement

Un essai de chargement a été réalisé en 2007 sur le PI 361, dans les mêmes conditions qu'en 1995. Cet essai a permis de montrer :

- Un retour toujours élastique des tabliers,

- Une bonne symétrie de comportement des deux rives de chaque tablier (flèches mesurées sous bande d'arrêt d'urgence très proches des flèches mesurées sous voie rapide), ceci quel que soit le cas de charge et en tenant compte de la symétrie des chargements (camions identiques sur voie rapide et sur bande d'arrêt d'urgence).
- Une absence d'évolution significative de la flèche au centre de l'ouvrage dans le cas de chargement de référence sur le tablier non dégradé,
- Une légère tendance à l'augmentation des flèches sur le tablier dégradé. Il s'agit toutefois d'une tendance à pondérer du fait des faibles flèches mesurées étant donné le type de pont (pont cadre à faible portée).

Les variations par rapport à 1995 sont faibles au regard des valeurs mesurées, mais montrent tout de même une tendance à l'augmentation vraisemblablement liée à l'alcali-réaction et/ou à l'attaque sulfatique. Le bon état apparemment du revêtement mis en œuvre en 1995 sur les parements de l'ouvrage et plus particulièrement du tablier, et l'absence de traces de circulations d'eau à travers le tablier suite au remplacement de l'étanchéité en extrados laissent penser que la ou les pathologies affectant les bétons ont été fortement ralenties. Elles restent toutefois actives comme l'atteste la tendance à l'augmentation des flèches ce qui nécessitera l'entretien à vie de l'ouvrage d'un revêtement d'imperméabilisation en bon état.

Il conviendra également de s'assurer, par des essais de chargement réguliers (tous les 10 ans), du maintien du fonctionnement élastique des tabliers de cet ouvrage.

VIII. DEUXIÈME BILAN : 2014

Un second bilan du suivi des ouvrages a été établi en 2014, soit près de 25 ans après le début du suivi. On constate après 25 ans de suivi que sur 253 ouvrages :

- 18 ne sont pas susceptibles d'être affectés par une réaction de gonflement interne,
- 182 sont dans un état de fissuration acceptable (fissuration inférieure à 0,3 mm/m),
- 39 sont dans un état « moyen » (fissuration comprise entre 0,3 et 0,6 mm/m),
- 4 sont particulièrement dégradés (fissuration supérieure à 0,9 mm/m).

Le nombre d'ouvrages dégradés n'a pas ou peu évolué au cours des 10 dernières années et les travaux réalisés ont permis de limiter l'évolution des désordres.

VIII.1. Suivi de la fissuration des ouvrages les moins dégradés

Le suivi réalisé pendant 25 ans a montré sa fiabilité. Il peut être envisagé d'alléger ce suivi (tous les ans ou tous les 2 ans).

VIII.2. Suivi de la fissuration et état des ouvrages les plus dégradés

Plusieurs ouvrages (PI 322, 329, 338, 354) n'ont montré aucun gonflement depuis la mise en œuvre des revêtements d'étanchéité, soit pour certains depuis plus de 15 ans. Certains ouvrages montrent des évolutions faibles, voire négligeables (PI 330, 355).

Deux ouvrages montrent un gonflement, des exsudats de gel et une fissuration sur les murs en retour (PI 363 et 365). Une vérification de l'instrumentation et un suivi annuel de l'état des revêtements et de la fissuration est à prévoir.

Le PI 361, qui a montré une légère augmentation de la flèche du tablier lors de l'essai de chargement de 2007, devra faire l'objet d'un nouvel essai de chargement en 2017. On note également une dégradation de plus en plus importante du revêtement d'imperméabilisation (Figure 22). Une réfection de ce revêtement est à prévoir d'autant plus qu'il a bientôt 20 ans.

Le PS 357 montre une évolution significative (capteurs sur barres horizontales de 2 m) et son revêtement est fissuré en plusieurs points (figure 23). Des investigations complémentaires sont à prévoir sur cet ouvrage :

- Carottage au droit d'une fissure pour déterminer sa profondeur et la comparer à l'enrobage,
- Décapage horizontal du revêtement sur une bande de 10 cm de large pour mesurer l'ouverture des fissures,
- Essais d'expansion résiduelle,
- Mesure de la résistance mécanique du béton,
- Mesure du module d'élasticité du béton.

IX. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les méthodes déployées pour l'analyse, le suivi et le traitement des ouvrages sont bien adaptées à la problématique et ont permis d'effectuer des travaux adaptés à la pathologie et de limiter ces travaux aux seuls ouvrages réellement dégradés.

Même si la démolition – reconstruction de certains ouvrages n'est pas à exclure, cet article montre qu'une bonne politique de gestion et de maintenance des ouvrages



Figure 22 : Cloquage du revêtement du PI 361.



Figure 23 : Fissuration du revêtement du PS 357.

atteints de réaction de gonflement interne du béton peut permettre de les maintenir en service et de prolonger significativement leur durée de vie tout en respectant les conditions de sécurité nécessaires. Il convient évidemment de mettre en œuvre une surveillance renforcée de ces ouvrages et de s'assurer du bon état des revêtements et de la bonne récupération et évacuation des eaux de pluie.

X. BIBLIOGRAPHIE

- Baillemont G., Delaby J.B., Brouxel M. et Rémy P., 2000, Diagnosis, treatment and monitoring of a bridge damaged by AAR. Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, Quebec, p. 1099 - 1108.
- Brouxel M. et Valière A., 1992, Thaumasite as the final product of alkali-aggregate reaction: a case study. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, London, p. 136 -144.
- Delaby J.B., Brouxel M. et Remy P., 2004. Monitoring of nine repaired bridges affected by AAR. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, Beijing, p. 1215-1218.
- Godart B., Fasseu P. and Michel M., 1992, Diagnosis and monitoring of concrete bridges damaged by A.A.R in northern France. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, London, p. 368 -375.
- Godart B., Mahut B. Fasseu P. and Michel M., 2004. The guide for aiding to the management of structures damaged by concrete expansion in France. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, Beijing, p. 1219-1228.
- Garbowski E., Czamecki B., Gillot J.E., Duggan C.R. et Scott J.F., 1992, Rapid test of concrete expansivity due to internal sulfate attack, American Concrete Institute Materials Journal, v. 89, 5, p. 469-480.
- Méthode d'essai n° 44 : Alkali-réaction du béton. Essai d'expansion résiduelle sur béton durci. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 10 pages.
- Méthode d'essai n° 47 : Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 11 pages.
- Méthode d'essai n° 66 : Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essai de performance. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 18 pages.
- Méthode d'essai n° 67 : Réaction sulfatique interne au béton. Essai d'expansion résiduelle sur carotte de béton extraite de l'ouvrage. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 18 pages.
- Prin D. et Brouxel M., 1992, Alkali-aggregate reaction in northern France: a review. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, London, p. 790-798.
- Salomon, M., Caude J. et Hasni L., 1992, Diagnosis of concrete structures affected by alkali-aggregate reaction. Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, London, p. 902 - 932.
- Tang M.S., Han S.F. and Zhen S.H., 1983, A rapid method for identification of alkali reactivity of aggregates. Cement and Concrete Research, v.13, 3, p. 417-422.