

**Pathologies, diagnostic
et réparation des chapes
d'étanchéité d'ouvrages d'art**

Les collections du LCPC

Le libre accès à l'information scientifique est essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés, l'Université Gustave Eiffel a fait le choix de numériser et de mettre à disposition en téléchargement gratuit, l'intégralité des ouvrages publiés dans les collections du LCPC de 1969 à 2014, du fait de son caractère patrimonial.

La collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées »

Issus de l'expertise du réseau scientifique et technique (RST), les ouvrages publiés dans la collection « techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées » ont été conçus et rédigés en vue des applications sur le terrain par les professionnels du BTP. La collection se décline en deux séries : guide technique et méthode d'essai.

- La série « guide technique » réunit des synthèses de connaissances, fruits de groupes de travail nationaux associant partenaires publics et privés. Ces guides n'ont pas de valeur normative mais servent de support au développement des techniques.
- La série « méthode d'essai » réunit des méthodes à caractère normatif ou de recommandations. Les méthodes font l'objet d'une qualification par le service qualité du LCPC.

La collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées »

La collection ERLPC « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées » se décline en 8 séries thématiques : construction routière, environnement et génie urbain, géotechnique et science de la terre, mécanique et mathématiques appliquées, ouvrage d'art, physique chimie, sécurité et exploitation routières, sciences de l'ingénieur. Des mémoires de thèses ou d'habilitation à la direction de recherche, des résultats d'études générales et d'expérimentations en laboratoire et *in situ* ont été notamment publiés dans cette collection.

La collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées »

De 1969 à 1990, les travaux de recherche les plus significatifs du LCPC ont été publiés dans la collection « rapport de recherche du laboratoire central des ponts et chaussées ». Cette collection historique a ensuite laissé la place à la collection « études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées ».

La collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées »

Les ouvrages de la collection « actes des journées scientifiques du laboratoire central des ponts et chaussées » regroupent les communications présentées par les intervenants à l'occasion de manifestations scientifiques organisées ou co-organisées par le LCPC.

Les ouvrages des collections du LCPC sont diffusés sous la licence Creative Commons CC BY-NC-ND. Cette licence ne permet que la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, les documents peuvent être copiés, distribués et communiqués par tous moyens et sous tous formats.



 Attribution — Vous devez créditer l'œuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Université Gustave Eiffel vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

 Pas d'utilisation commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette œuvre, tout ou partie du matériel la composant.

 Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'œuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'œuvre modifiée.

Pathologies, diagnostic et réparation des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art

Guide technique

Novembre 2011



Institut français des sciences et technologie des transports, de l'aménagement et des réseaux
58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été rédigé par :

- Benoit Thauvin, LRPC de Saint-Brieuc (animateur)
- Marie-Paule Thaveau, LRPC d'Autun / DDEA de l'Ain
- Christophe Aubagnac, LRPC d'Autun
- Hervé Cannard, LRPC de Strasbourg
- Laurent Sauger, LRPC de Lyon
- Jean-Paul Benneton, LRPC de Lyon
- Michel Fragnet, ex Sétra
- Florence Péro, Sétra
- Xavier Dérobert, LCPC
- Olivier Carpentier, Université d'Artois
- Didier Defer, Université d'Artois

Ce guide a été soumis à un groupe de relecteurs dont les commentaires ont été examinés par le groupe de travail et, dans une large mesure, intégrés au texte final. Ce groupe est composé de :

- Pierre Pannetier, Ancien président de l'Office des Asphaltes
- Éric Turmel, RESIPOLY
- Bruno Godart, LCPC
- Jean-Marc Faivre et Jean-Étienne Urbain, EUROVIA
- Sylvain Lopez, ASF
- Vincent Lucas, Sétra
- Francis Beauvallet, COFIROUTE
- Jean-Noël Louchart, ETANDEX
- Jean-Loup Michel, LRPC de Blois
- Philippe Dumas, LRPC d'Aix-en-Provence
- Florence Péro, Sétra
- Renaud Benchet, SIPLAST
- Jean-Claude Wendling, LRPC d'Autun
- Patrick Dantec, LRPC de Clermont-Ferrand

Pour commander cet ouvrage :

Librairie Ifsttar

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 50 20 - Télécopie : 01 40 43 54 95
diffusion-publications@ifsttar.fr

Prix : 90 euros HT

Au 1^{er} janvier 2011, le LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) a fusionné avec l'INRETS (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) pour former un nouvel institut de recherche, l'Ifsttar (décret 2010-1702 du 30 décembre 2010 portant création de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux). La production de cet ouvrage dans les collections du LCPC intervenant au moment de la fusion, il est fait référence parfois au LCPC, parfois à l'Ifsttar.

Ce document est propriété de l'Institut français des sciences et technologie des transports, de l'aménagement et des réseaux et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général (ou de ses représentants autorisés)

© 2011 - LCPC

ISBN 978-2-7208-2591-0

CrossRef 10.3829/gt-gttmchapoa-fr

Sommaire

Préambule	9
Introduction	10
CHAPITRE 1 – LES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ	13
1. Les étanchéités des ponts routes au cours du temps	15
1.1 L'origine	15
1.2 Les premières étanchéités	15
1.3 Les ponts en maçonnerie	16
1.4 L'apparition des procédés à base de bitume	17
1.5 L'apparition des feuilles préfabriquées	18
1.6 L'évolution des techniques asphalte	18
1.7 Les évolutions récentes	19
1.8 Conclusion	20
2. Les fonctions d'un complexe d'étanchéité	20
3. Les différents types d'étanchéité rencontrés	21
3.1 Feuille préfabriquée monocouche	21
3.2 Type « Asphalte »	22
3.2.1 Asphalte monocouche	22
3.2.2 Asphalte bicouche	23
3.3 Feuille préfabriquée plus asphalte	24
3.4 Film mince adhérent au support ou Système d'étanchéité liquide	25
3.5 Moyens à haute cadence	26
4. Les étanchéités des ponts de par le monde	27
5. Le référentiel technique	30
5.1 Mise en œuvre et contrôle des chapes	30
5.2 Surveillance, prévention et réparation des chapes	31
6. Bibliographie	32
CHAPITRE 2 – DÉFAILLANCE DES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ / ORIGINES ET CONSÉQUENCES	35
1. L'étanchéité, une protection contre les venues d'eau	37
1.1 Les défauts d'étanchéité en section courante	38
1.1.1 Absence d'étanchéité sur le tablier	38
1.1.2 Absence d'étanchéité sous trottoirs	39
1.1.3 Défaut d'étanchéité de la chape	40
1.2 Les défauts d'étanchéité au droit des points singuliers	42
1.2.1 Défaut de relevé d'étanchéité	42
1.2.2 Défaut d'étanchéité au raccordement avec les points d'évacuation des eaux	43
1.2.3 Défaut d'étanchéité contigu aux joints de chaussée	44

1.2.4	Défaut d'étanchéité des joints de chaussée et de trottoirs	44
1.2.5	Défaut au droit des autres points singuliers	46
1.2.5.1	Les corniches préfabriquées	46
1.2.5.2	Les corniches caniveau	47
1.2.5.3	L'absence de larmiers	47
1.2.5.4	Les trappes d'accès	48
1.3	Autres défauts d'étanchéité	49
1.3.1	Les ancrages traversant la chape	49
1.3.2	La jonction corniche béton – contre corniche	49
1.4	Les défauts des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux	49
2.	L'étanchéité, à l'interface entre le tablier et la couche de roulement	50
2.1	Rappel sur le comportement et les dégradations des couches de roulement	50
2.1.1	Présence d'eau à l'interface étanchéité / chaussée	50
2.1.2	Contraintes de traction	51
2.1.3	Souplesse des structures porteuses	51
2.1.4	Liaison avec la chape d'étanchéité	51
2.1.5	Gradients de température	51
2.1.6	Inversion des modules d'élasticité	52
2.1.7	Épaisseurs	52
2.1.8	Tolérances d'exécution des ouvrages	53
2.1.9	Synthèse	53
2.2	Principales dégradations de la couche de roulement dues à la défaillance des chapes d'étanchéité	53
2.2.1	Les déformations	54
2.2.2	Les fissures	55
2.2.3	Les arrachements	56
2.2.4	Les remontées	56
2.3	Phénomènes à l'origine des dégradations structurelles de la couche de roulement	57
2.3.1	Les glissements	57
2.3.2	Les gonflements	58
2.3.3	Fluage, orniérage	59
2.3.4	L'altération du support de la chape d'étanchéité	60
2.4	Synthèse	60
3.	Bibliographie	62
CHAPITRE 3 – AIDE AU DIAGNOSTIC SUR L'ÉTAT ET L'EFFICACITÉ		
DES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ		65
1.	Introduction	67
1.1	Généralités	67
1.2	Quand doit-on programmer un diagnostic ?	67
1.3	Comment réaliser le diagnostic ?	68
2.	Le prédiagnostic visuel	68
2.1	L'examen visuel de la couche de roulement	68
2.1.1	S'agit-il d'un phénomène de glissement ?	69
2.1.2	S'agit-il d'un phénomène de gonflement ?	69
2.1.3	S'agit-il d'un phénomène de fluage, orniérage ?	70
2.1.4	S'agit-il d'une altération du support de la chape d'étanchéité ?	70
2.2	Évaluation visuelle de la fonction « étanchéité »	71
2.2.1	Les points singuliers	72
2.2.2	Les infiltrations d'eau	72
2.2.3	Le cheminement de l'eau	73
3.	Les investigations complémentaires	74
3.1	L'analyse approfondie du dossier d'ouvrage	74
3.1.1	Documents à consulter	74

3.1.2 Informations minimales à recueillir	74
3.1.3 Importances des éléments recueillis	74
3.2 Les essais à l'eau	75
3.2.1 Essai à l'eau claire	75
3.2.2 Essai à l'eau colorée	75
3.3 Les techniques d'auscultation non destructive	77
3.3.1 Méthode COLIBRI	77
3.3.2 Méthode TUS	78
3.3.3 Méthode RADAR	79
3.3.4 Thermographie infrarouge	81
3.3.5 Radiographie neutronique	82
3.4 Les fenêtres de reconnaissance	83
3.5 Les prélèvements et essais	84
3.5.1 Depuis les fenêtres de reconnaissance	84
3.5.2 Depuis la couche de roulement	84
3.5.3 Essais de caractérisation des produits	85
4. Recommandations pour le choix des techniques d'investigations	86
5. La démarche de diagnostic	88
6. Bibliographie	90
CHAPITRE 4 – SOLUTIONS DE RÉPARATION	93
1. La démarche de sélection des techniques de réparation	95
2. Les techniques de réparation	96
2.1 Réparation ponctuelle ou de zones particulières	96
2.1.1 Réparation de zone dégradée en partie courante et de fenêtre de reconnaissance	96
2.1.2 Réparation des carottages	97
2.1.3 Réparation de l'étanchéité de trottoirs	97
2.1.3.1 Les trottoirs faisant partie intégrante de la structure	97
2.1.3.2 Les trottoirs constituant une réservation	98
2.1.4 Reprise de l'étanchéité au droit du joint de chaussée	100
2.1.4.1 Principes généraux	100
2.1.4.2 Les exigences au cours de cette intervention	100
2.1.4.3 Les procédures proposées	101
2.1.5 Réparation des relevés	103
2.1.5.1 Configurations possibles et techniques de réparation correspondantes	103
2.1.5.2 Modalités de réfection des relevés d'étanchéité à l'arrière de bordures de trottoirs	106
2.1.6 Traitement des jonctions aux traversées	106
2.2 Réparation globale du complexe	107
2.2.1 Connaissance de l'ouvrage	107
2.2.2 Connaissance des contraintes	108
2.2.2.1 Contraintes liées à l'ouvrage	108
2.2.2.2 Contraintes liées à la situation de l'ouvrage	109
2.2.2.3 Contraintes liées au futur chantier et à l'exploitation de l'ouvrage pendant les travaux	110
3. Le suivi et le contrôle des réparations	110
3.1 Enlèvement des couches	110
3.1.1 Préalables	110
3.1.2 Les méthodes d'enlèvement ponctuel	111
3.1.3 Les méthodes d'enlèvement général	111
3.1.3.1 Le rabotage	113
3.1.3.2 Utilisation d'une pelle/chargeur	114
3.1.3.3 Hydrodécapage	114
3.1.3.4 Décapage par grenailage	115

3.2	Qualité et traitement du support.....	116
3.2.1	Principes généraux.....	116
3.2.2	Traitement local du support.....	116
3.2.2.1	Réparation par produit à base de liant hydraulique modifié (LHM).....	116
3.2.2.2	Réparation par produit à base de liant époxydique.....	116
3.2.3	Traitement des relevés d'étanchéité.....	117
3.2.4	Exécution d'un reprofilage général.....	117
3.2.4.1	Reprofilage à base de liant hydraulique.....	118
3.2.4.2	Reprofilage en microbéton bitumineux.....	118
3.3	Mise en œuvre de l'étanchéité.....	118
3.3.1	Sur réparations locales du support.....	118
3.3.2	Sur reprofilage.....	118
3.3.2.1	Reprofilage à base de liant hydraulique.....	118
3.3.2.2	Reprofilage en microbéton bitumineux.....	119
3.4	Les étapes clés du contrôle.....	119
3.5	Mise en œuvre des couches de roulement.....	121
3.5.1	Généralités.....	121
3.5.2	Cas particulier de travaux de reprise d'une chape sur un ouvrage à portance réduite.....	121
4.	Bibliographie.....	123
	CHAPITRE 5 – AIDE À LA GESTION PRÉVISIONNELLE ET PRÉVENTIVE.....	125
	Les coûts de construction et de maintenance.....	127
1.	Les garanties sur les chapes d'étanchéité.....	127
1.1	Principes généraux.....	127
1.2	La responsabilité décennale.....	128
1.3	Garantie particulière et contractuelle.....	128
1.4	La durée de vie.....	128
1.5	Point de départ des responsabilités.....	129
2.	La gestion prévisionnelle et préventive.....	129
2.1	Les enjeux de la surveillance.....	129
2.2	L'initiation de la surveillance.....	129
2.2.1	La qualité des travaux initiaux.....	129
2.2.2	L'inspection détaillée initiale.....	130
2.3	Le scénario de surveillance et de maintenance.....	130
2.3.1	Cas courants.....	130
2.3.2	Cas particuliers.....	131
2.3.3	Carnet de route.....	131
3.	Bibliographie.....	132
	CHAPITRE 6 – PERSPECTIVES ET DÉVELOPPEMENTS.....	133
1.	Évolution des complexes d'étanchéité.....	135
1.1	Développement durable.....	135
1.2	Réglementation.....	136
2.	Évolution des méthodes d'auscultation.....	136
2.1	Contexte.....	136
2.2	Méthodes et techniques.....	137
2.2.1	Techniques radar.....	137
2.2.2	Techniques mécaniques.....	139
2.2.2.1	Méthode COLIBRI.....	140
2.2.2.2	Méthode Impact Écho.....	141
2.2.3	Technique infrarouge.....	142
2.3	Traitement des mesures.....	143

3. Instrumentation initiale des ouvrages	143
3.1 Contexte et problématique	143
3.2 Les systèmes d'instrumentation intégrée	144
3.3 Exemple d'applications sur les chapes d'étanchéité	144
3.3.1 Méthode visuelle	144
3.3.2 Méthodes électriques	145
3.4 Autres applications	147
3.4.1 Contrôle des étanchéités de type géomembranes	147
3.4.2 Capteurs intégrés	148
3.5 Conclusion	148
4. Bibliographie	149
ANNEXE 1 : SITE EXPÉRIMENTAL DU RÉSEAU	153
1. La problématique	154
2. Dalles tests destinées au contrôle de réception des chapes d'étanchéité	154
3. Dalles tests destinées à la recherche de la présence d'eau sous une chape d'étanchéité « en service »	156
4. Dalle test dédiée à la formation des agents de contrôles	157
ANNEXE 2 : MESURES IN SITU AUSCULTATION RADAR	159
1. Objet de la mesure et domaines d'application	160
1.1 Contexte	160
1.2 Domaine d'application	160
2. Principe	160
2.1 Principes généraux	160
2.2 Représentation des signaux radar	161
2.3 Propagation des ondes dans les matériaux	162
2.4 Réflexion des ondes électromagnétiques	162
3. Limites et précautions	163
4. Matériel	164
5. Méthodologie	164
5.1 Préparation	164
5.2 Conditions de déploiement de la technique	165
5.3 Mode opératoire	166
5.3.1 Implantation des mesures	166
5.3.2 Réalisation des mesures	166
5.3.3 Carotte d'étalonnage	168
6. Exploitation et présentation des résultats	170
6.1 Détermination de l'épaisseur des différentes couches de la chaussée	170
6.2 Détection et localisation d'humidité sous la chape d'étanchéité	172
6.2.1 Traitement	172
6.2.2 Interprétation	173
6.3 Détection d'hétérogénéités ou d'anomalies dans le support de la chape d'étanchéité	175
7. Méthodes et essais associés	177
8. Bibliographie	178

ANNEXE 3 : MESURES IN SITU AUSCULTATION PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	181
1. Objet du diagnostic et domaine d'application.....	182
1.1 Contexte.....	182
1.2 Domaine d'application.....	182
2. Principe de l'examen par thermographie infrarouge.....	182
3. Limites et précautions	184
4. Matériel	185
4.1 Caméra infrarouge	185
4.2 Équipements divers.....	186
5. Méthodologie	186
5.1 Préparation.....	186
5.2 Conditions de déploiement de la technique	187
5.3 Mode opératoire	187
5.3.1 Implantation et réalisation des images thermographiques.....	187
5.3.2 Essais complémentaires.....	188
6. Exploitation et présentation des résultats	188
7. Méthodes et essais associés	189
8. Bibliographie.....	190
ANNEXE 4 : MESURES IN SITU AUSCULTATION NEUTRONIQUE	191
1. Objet de la mesure et domaines d'application	192
1.1 Contexte.....	192
1.2 Domaine d'application.....	192
2. Principe	192
3. Limites et précautions	193
4. Matériel	193
4.1 Sonde neutronique de surface	193
4.2 Sonde mixte de surface.....	194
4.3 Sonde de profondeur.....	194
5. Méthodologie	195
5.1 Préparation.....	195
5.2 Conditions de déploiement de la technique	195
5.3 Mode opératoire	196
5.3.1 Implantation et réalisation des mesures.....	196
5.3.2 Carotte d'étalonnage	197
6. Exploitation et présentation des résultats	198
7. Méthodes et essais associés	199
8. Bibliographie.....	199

Préambule

L'eau est l'ennemi n° 1 des ouvrages d'art.

Les eaux de ruissellement pures ou chargées d'hydrocarbures, de sels de déverglaçage ou de polluants atmosphériques ainsi que les conditions climatiques, notamment le gel-dégel, les embruns salins... agressent en continu les éléments constituant un ouvrage.

La pénétration d'eau, porteuse d'ions agressifs (chlorures, etc.), provoque la corrosion des aciers et leur gonflement, puis l'éclatement du béton d'enrobage. À noter également, dans le cas d'ouvrages d'art pathologiques, que le développement des réactions de gonflement interne du béton (réactions sulfatique interne et alcali-réaction) est favorisé par l'apport d'eau.

Une bonne étanchéité est le seul rempart efficace contre toute infiltration d'eau, notamment au niveau des fissurations normales ou anormales du béton armé.

Tout ouvrage quel qu'il soit (en maçonnerie, en béton, en métal) doit ainsi être parfaitement étanche pour répondre au mieux aux exigences de durée d'utilisation de projet de 100 ans, voire plus ! Le retour d'expérience américain, sur l'économie d'une chape d'étanchéité à la construction, n'autorise aucun doute sur ce point.

Toute dégradation constatée sur un complexe d'étanchéité est intrinsèquement liée au phénomène naturel de vieillissement, à la qualité des matériaux utilisés ou à celle de leur mise en œuvre.

Les points singuliers (joints de chaussée, relevés d'étanchéité, gargouilles, trottoirs...) sont des points critiques d'infiltration d'eau. Ils doivent faire l'objet d'une attention toute particulière tant à la mise en œuvre qu'au niveau du suivi dans le temps.

Les constatations, réalisées à l'occasion de visites périodiques ou spécifiques, peuvent identifier les pathologies attachées à une défaillance de l'étanchéité mais ne permettent généralement pas de préciser avec certitude l'origine exacte du défaut, son ampleur et son caractère évolutif.

Introduction

Ce guide aborde dans son ensemble la problématique d'évaluation des chapes d'étanchéité et de leur réparation en cas de défaillance. Il propose des outils techniques mais aussi méthodologiques pour une meilleure connaissance des ouvrages et apporte des solutions pratiques pour garantir la performance de l'étanchéité et donc *in fine* la durabilité des ouvrages.

Le guide est destiné aux maîtres d'ouvrage gestionnaires pour les aider à mieux appréhender, anticiper et diagnostiquer les pathologies complexes liées à des défaillances de chapes d'étanchéité et à spécifier des solutions de réparation adaptées. Il s'adresse aussi aux services en charge de la surveillance et à ceux en charge de l'entretien des ouvrages comme les maîtrises d'œuvre, les bureaux d'études et les laboratoires de contrôle.

Le guide couvre les ouvrages en service dont le complexe d'étanchéité est mis en œuvre sur un support en béton, mais également les étanchéités sur renformis ou couche de reprofilage en béton ou en microbéton bitumineux.

Sont donc plus particulièrement visés les ouvrages à tabliers en béton armé, en béton précontraint et les dalles en béton armé des ponts mixtes.

Les chapes d'étanchéité non recouvertes directement par la couche de roulement (celle des passages inférieurs sous remblai par exemple) ne sont pas abordées car elles relèvent du fascicule 67, titre 3. De même, l'étanchéité intégrée à la protection des ouvrages en maçonnerie contre les venues d'eau est hors du domaine d'application du présent guide. Ne sont pas abordées dans ce guide, les étanchéités sous chaussées en béton. Les complexes étanchéités / revêtements sur tabliers métalliques ne sont également pas traités, mais certaines dispositions du guide, sous réserve d'adaptations, peuvent s'appliquer.

Le guide s'articule autour de six chapitres.

Le **chapitre 1** fixe le contexte par un rappel historique sur la place de l'étanchéité vis-à-vis de la protection des ouvrages contre l'action des eaux. Il présente les fonctions essentielles de l'étanchéité pour les ouvrages d'art et décrit les différentes catégories de complexes les plus couramment rencontrés en précisant leur constitution, leurs caractéristiques, leurs modalités de mise en œuvre et leurs champs d'application. Le chapitre se termine par un panorama des pratiques à travers le monde en rappelant le positionnement français.

Le **chapitre 2** dresse un tableau des défauts et désordres en lien avec les défaillances possibles des chapes d'étanchéité. Il présente les pathologies susceptibles de concerner l'étanchéité seule mais aussi celles pouvant naître de son interaction avec la couche de roulement ou avec son support. Il décrit enfin les processus et phénomènes à l'origine de ces dégradations et leurs manifestations.

Le **chapitre 3** présente la démarche progressive de diagnostic permettant d'établir l'état et l'efficacité d'une chape d'étanchéité d'ouvrage d'art. Il précise les modalités de l'évaluation visuelle de la couche de roulement et de la fonction « étanchéité ». Il décrit les différentes

techniques d'investigations disponibles et identifie les critères de leur choix en promouvant l'apport des méthodes éprouvées de contrôles non destructifs.

Le **chapitre 4** présente la démarche de sélection des solutions de réparation. Il rappelle l'importance du diagnostic préalable dans l'aide au choix de ces solutions. Les principales techniques de réfection sont décrites en précisant leur champ d'application, leurs modalités de mise en œuvre, de suivi et de contrôle.

Le **chapitre 5** s'adresse aux gestionnaires en abordant les enjeux économiques liés aux chapes d'étanchéité et à leur durabilité. Il rappelle la définition des garanties, des responsabilités réglementaires et se termine par des recommandations sur les modalités de gestion préventive des ouvrages.

Le **chapitre 6** esquisse les perspectives de développement à court et moyen terme dans le domaine des chapes d'étanchéité. Les prochaines évolutions réglementaires sont présentées. Les dernières initiatives visant à réduire l'impact environnemental des matériaux et de leur mise en œuvre sont évoquées. Le chapitre s'achève par un panorama des développements en cours et à venir en matière de techniques d'auscultation et d'instrumentation.

Des annexes viennent compléter ce document. L'une d'elles présente le site d'essais sur lequel différentes méthodes de diagnostic ont été éprouvées et évaluées. Les autres présentent de manière détaillée les principes de trois méthodes d'auscultation non destructive applicables au diagnostic des chapes d'étanchéité sur ouvrages en service.

CHAPITRE 1

LES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ



1. Les étanchéités des ponts routes au cours du temps

1.1 L'origine

Depuis longtemps, l'homme s'est préoccupé de la protection de ses constructions contre l'action des eaux, d'une part pour éviter la pénétration de l'eau dans ses locaux ou dans ses réserves de nourriture, d'autre part pour protéger la structure contre les détériorations qui pouvaient être provoquées par l'eau de pluie.

On peut ainsi citer l'arche de Noé dont la protection et l'étanchéité étaient assurées, selon les textes anciens, par une couche de bitume. Même si l'arche de Noé reste probablement une légende, le fait que cette technique soit citée est le signe que les auteurs de ces textes connaissaient la technique (figure 1).



Figure 1. Embarcation vietnamienne (cloracle) enduite d'un produit bitumineux

Il semble que les premières utilisations connues d'une étanchéité se situent vers 3600 à 2000 ans avant J.-C. en Mésopotamie (entre le Tigre et l'Euphrate de l'actuel Irak) avec l'étanchéité des jardins suspendus ou d'une voie processionnelle à Babylone avec l'utilisation de bitumes et d'asphalte extraits localement (1).

1.2 Les premières étanchéités

Faute de pouvoir réaliser une toiture (technique la plus efficace en bâtiment) sur un pont, l'homme s'est tourné vers d'autres solutions. On soulignera ici que la réalisation d'une

toiture a été, et reste, l'une des solutions les plus utilisées pour assurer la protection des ponts en bois (voir, par exemple, le pont de Lucerne en Suisse (figure 2) dont la construction remonte à 1408, pour les parties n'ayant pas été détruites par l'incendie d'août 1993).



Figure 2. Passerelle en bois couverte de Lucerne

1.3 Les ponts en maçonnerie

Pour empêcher la pénétration de l'eau et sa circulation au sein de la voûte, des joints et des pierres des structures des ponts en maçonnerie, les constructeurs de ces ouvrages ont recherché des solutions d'étanchéité parmi les matériaux et produits disponibles à leur époque. On rencontre ainsi les techniques suivantes.

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, la chape pouvait être constituée, à condition qu'elle soit prévue et réellement exécutée, par une chape de « ciment » et de cailloux de vigne fortement comprimée, terminée par une chape de ciment (figure 3). Le tout constituait une épaisseur totale d'environ 27 cm (6 + 4 pouces). Sur certains ponts plus anciens, il est possible d'avoir une chape constituée par une couche d'argile damée d'environ 5 cm d'épaisseur (figures 2 et 3).

Plus récemment, les constructeurs se sont orientés vers des chapes en mortiers de ciment ou de chaux d'environ 3 à 5 cm d'épaisseur avec des pentes pour l'écoulement des eaux vers les évacuations. Cette chape pouvait alors recevoir :

- un enduit mince de goudron, de brai ou de bitume,
- un revêtement d'asphalte pur de 7 à 8 mm d'épaisseur ou d'asphalte sablé de 17 à 18 mm,
- aucun revêtement, mais, dans ce cas, on réalisait une surépaisseur de la chape en passant de 5 à 10 cm (cas des ouvrages construits vers 1865).

Les premières étanchéités, comportant des mastics d'asphalte chargés, figurent en tant qu'étanchéité des ponts dans les ouvrages suivants :

- pont de Chazay à Bordeaux en 1810,
- pont Morand à Lyon en 1829,
- pont Royal à Paris en 1835 (2).

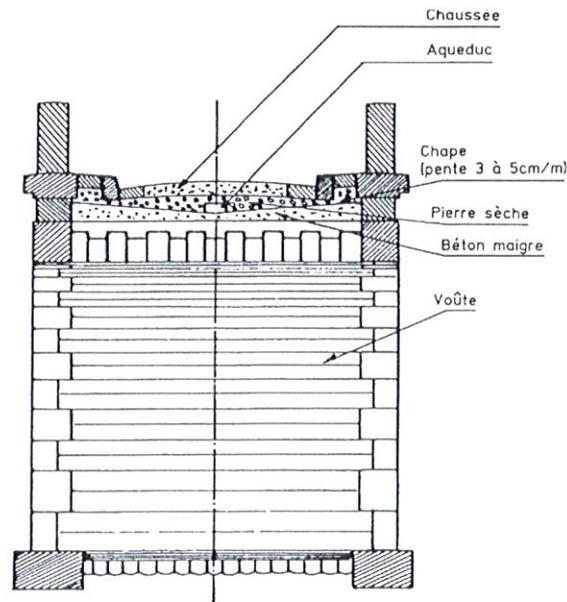


Figure 3. Exemple de constitution d'une chaussée sur un pont en maçonnerie

1.4 L'apparition des procédés à base de bitume

Avec l'apparition de la technique du béton armé, les ouvrages ont reçu une protection utilisant, fort probablement, car nous n'avons pas pu retrouver d'informations plus précises, des procédés à base de bitume, d'asphalte ou de brai / goudron.

Ces chapes pouvaient être protégées par une contre-chape intermédiaire en béton de ciment parfois légèrement armée ce qui permettait d'intervenir sur la couche de roulement sans détériorer la chape d'étanchéité, de poser des pavés sans dégrader cette étanchéité, etc. (figure 4).

Cette technique de contre-chape a été longtemps utilisée et on la retrouvait encore, par exemple, à Paris lors de la construction du pont aval du boulevard périphérique en 1968. Même si elle était largement déconseillée dans le guide technique STER de l'époque.

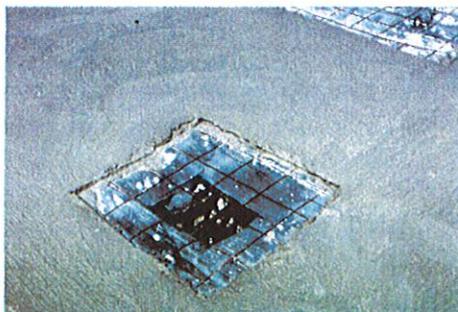


Figure 4. La technique de la contre-chape sur un pont

Concernant la technique asphalte, il a également été utilisé une couche constituée d'un mélange de poudre d'asphalte, de bitume, de filler et de gravillons serrée par damage sur une épaisseur pouvant atteindre 5 cm. Il semble que ce soit la technique de base utilisée pour ce procédé durant la fin du 19^e siècle et la 1^{re} moitié du 20^e jusque vers les années 1930.

1.5 L'apparition des feuilles préfabriquées

Des techniques du bâtiment ont parfois été également utilisées telles que celles des multicouches par feuilles préfabriquées à base de cartons imprégnés de brai de houille, puis de bitume (systèmes dits « à armature putrescible »). D'après certaines informations, cette technique aurait été utilisée depuis le début du 20^e siècle.

Ce type de multicouches a notablement évolué avec l'apparition des premières feuilles préfabriquées bitumineuses dites à « armatures imputrescibles » originellement à base de voile de verre. Cette technique a été mise au point et développée par la Société Siplast à partir de 1955. Progressivement sont apparus des tissus de verre, des non-tissés de polyester et des solutions mixtes à partir des techniques précédentes.

Il faudra toutefois attendre la mise au point des bitumes modifiés par des polymères (Bmp) à partir de 1975 pour que l'on observe leur développement dans les feuilles préfabriquées en tant que système monocouche (figure 4).

1.6 L'évolution des techniques asphalte

Les techniques asphalte ont évolué avec la mise au point des systèmes bicouches du type 5+15 dans les années 1930. Il s'agissait, sur une couche d'indépendance, le plus généralement, en papier kraft, de couler 5 mm de mastic d'asphalte pur surmonté de 15 mm d'un asphalte sablé dont la présence du squelette de sable permettait d'assurer une certaine tenue sous les charges. Il est probable que cette technique du bâtiment a été utilisée sur les ponts (figure 5).

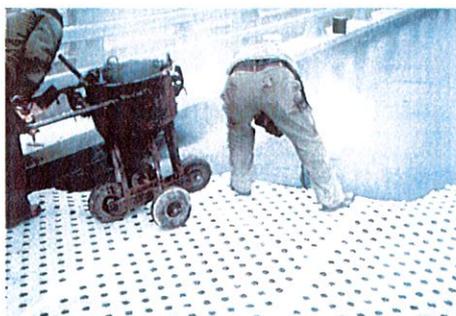


Figure 5. Mise en œuvre d'une étanchéité asphalte sur couche de semi-indépendance par papier kraft à trous

Malheureusement, son utilisation, sur le pont de la N186 sur la Seine à Choisy-le-Roi dans les années 1963-1964 en étanchéité directe sous le revêtement de la chaussée, a donné lieu à un important désordre : les camions, requis pour les éprouves de réception de l'ouvrage et stationnant pour mesurer les flèches sous charges, ont vu leurs roues s'enfoncer dans les couches de la chaussée. Cet incident ayant donné une mauvaise image de l'asphalte, les chercheurs se sont mobilisés et ont alors proposé de remplacer les 15 mm d'asphalte sablé par 22 à 26 mm d'une couche d'un asphalte « porphyre » (terme utilisé à l'époque et maintenant remplacé par « gravillonné »).

Cette évolution a conduit aux systèmes dénommés 4+26 (dans le cas d'ajout de poudre de caoutchouc dans le mastic d'asphalte pur) ou 8 + 22. Ces systèmes ont d'abord fait l'objet du guide technique STER 66 puis ont été codifiés en 1981 par le fascicule 67 titre I (5). Ces systèmes sont mis en œuvre sur une couche d'indépendance ou de semi-indépendance (plus favorable à la transmission des efforts de freinage) à base d'un papier kraft (à trous ou non) ou d'une résille de verre.

Parallèlement, des procédés de type monocouche asphalte ont été mis au point et parfois mis en œuvre. Il s'agissait parfois de la seule première couche du système 8+22 ci-dessus, ou bien d'une couche essayant de combiner les avantages en une seule couche de la souplesse

du mastic d'asphalte et la tenue sous charge de l'asphalte gravillonné. Le procédé Colpont du Groupe COLAS en est une illustration qui ne s'est pas avérée aussi performante que souhaitée.

Plus récemment, suite aux recherches des fabricants, les possibilités apportées par l'ajout de polymère dans un asphalte ont permis de relancer ce principe d'étanchéité monocouche. L'adhérence au support est améliorée par un primaire à base de bitume/ ou seul. Compte tenu des inconvénients liés, notamment, à la médiocre stabilité de la couche de mastic d'asphalte et à la semi-indépendance, une technique consistant à remplacer, dans un système 8 + 22, la couche de mastic d'asphalte par une feuille préfabriquée bitumineuse autoprotégée, a été développée. Cette feuille préfabriquée comportait une feuille d'aluminium de 16/10^e de mm assurant la protection du mastic d'asphalte et empêchant la remontée de bitume à la pose de l'asphalte de la seconde couche.

Cette technique, mise au point vers 1968, a connu alors un grand développement pour son efficacité en particulier avec le B3A de Smac Acieroid. Cependant, son point faible était la tenue dans le temps du bitume oxydé de la feuille.

1.7 Les évolutions récentes

La technique précédente n'a été détrônée que récemment par la mise au point de feuilles préfabriquées bitumineuses à base de liant à base de bitume modifié aux polymères (Bmp) dont la formulation a été étudiée pour supporter la mise en œuvre de la couche d'asphalte gravillonné entre 200 et 250 °C.

Au début des années 1963-1964, un certain nombre de maîtres d'œuvre, estimant d'une part avoir une concurrence insuffisante dans le domaine des chapes d'étanchéité des ponts, et, d'autre part que le système d'indépendance au support posait de nombreux problèmes pour le traitement des bords, a favorisé la mise au point de la technique dite « film mince adhérent au support », technique résultant de l'apparition de nouveaux produits de la chimie comme les résines époxydes (figure 6).

Cette technique s'est largement répandue mais elle a vite montré ses limites en termes de coûts (d'où, en particulier, l'incorporation de charges comme le brai) mais aussi en raison d'une qualification insuffisante des entreprises pour ce type de procédé particulièrement exigeant en terme de qualité d'application. Très rapidement, une désaffection s'est manifestée et la technique FMAS/SEL ne retrouve de l'intérêt que grâce à l'utilisation de nouvelles résines comme les s réactives projetées avec les premières vraies applications en 1986.



Figure 6. Mise en œuvre de résine sur un pont

Fin 1971, début 1972, l'application d'un bitume Bmp sur un support métallique a été rendue possible par la mise au point de machine de répandage de bitume à haute pression. Bien évidemment, on s'est demandé si ce mode d'application ne pouvait pas être envisagé directement sur le support en béton d'un pont. Les difficultés rencontrées n'ont pu être contournées qu'en interposant une couche d'un sable enrobé formulé avec un Bmp entre le support et la couche de bitume pur. Le premier ouvrage important ayant fait l'objet de ce type de système dénommé MHC (par Moyen à haute cadence) a été le pont de l'île de Ré en mars 1988. L'intérêt de cette technique réside dans sa rapidité d'exécution qui a été un critère déterminant pour cet ouvrage afin de respecter les délais d'exécution (figure 7).



Figure 7. Application par rampe de projection du liant bitume-polymère d'un complexe MHC

1.8 Conclusion

Ce balayage extrêmement rapide de l'évolution des techniques d'étanchéité des ponts montre que les techniques actuelles ne sont que l'aboutissement d'une longue histoire et de nombreux tâtonnements.

Si l'on compare avec les techniques pratiquées dans le bâtiment, les matériaux de base (à l'exception du procédé MHC) sont équivalents mais ont été adaptés pour prendre en compte les sollicitations propres à un pont, telles que celles liées au trafic.

2. Les fonctions d'un complexe d'étanchéité

Sur un pont route à support en béton, est systématiquement réalisé un complexe à vocation d'étanchéité de l'ouvrage et de support de la circulation.

Les fonctionnalités premières d'un complexe d'étanchéité peuvent être définies de la manière suivante :

- ▶ Étanchéité :

Il s'agit d'abord d'empêcher tout passage d'eau au niveau de l'extrados du tablier, soit en partie courante, soit au droit des points singuliers (joints de chaussée, gargouilles, relevés d'étanchéité...) et de permettre son évacuation à l'extérieur de l'ouvrage.

L'objectif majeur est donc de réaliser une barrière à l'eau, plus particulièrement à l'eau chargée de sels, en particulier ceux utilisés pour la viabilité hivernale, afin d'assurer la protection des aciers contre la corrosion et celle de l'extrados en béton contre les effets du gel et du sel dans les régions et sur les itinéraires concernés (viabilité hivernale, régions côtières).

- ▶ Support de la couche de roulement.

C'est une fonction spécifique et très importante d'une chape d'étanchéité de pont (contrairement au cas des étanchéités de bâtiments ou d'ouvrages souterrains). La chape d'étanchéité doit pouvoir :

› Supporter sans aucune altération la mise en œuvre de couches de chaussée avec les moyens lourds routiers (circulation de finisseurs, de camions, de compacteurs) et des températures élevées.

Les contraintes correspondantes lors du compactage des bétons bitumineux sont d'autant plus fortes que leurs épaisseurs sont réduites (quelques centimètres en couche de liaison) et peuvent générer un poinçonnement des chapes de faible épaisseur (cas des feuilles préfabriquées monocouche par exemple).

› Supporter les contraintes liées au trafic en particulier celui des poids lourds :
 – Contraintes verticales : la chape d'étanchéité doit avoir une rigidité suffisante, particulièrement par temps chaud et notamment dans le cas des asphaltes pour ne pas induire (ou accentuer) l'orniérage du complexe. Ce phénomène est amplifié dans le cas de circulations canalisées.

Il est à noter que le passage d'une roue de camion sur une fissure de la couche de roulement peut générer une injection d'eau sous pression sur les matériaux sous-jacents. Cette pression étant parfois très élevée (plusieurs MPa), les dégradations à proximité peuvent être importantes.

– Contraintes tangentielles : elles sont dues aux efforts horizontaux qui sont liés au contexte de l'ouvrage : support en pente, zones de freinage, courbure en plan et force centrifuge.

L'adhérence, que ce soit entre les couches constitutives du complexe étanchéité/couche de roulement ou entre le complexe et son support, est primordiale pour éviter les phénomènes de glissement.

Le complexe se compose généralement d'une chape d'étanchéité et d'une ou plusieurs couches constituant la couche de roulement ; par simplification, lorsqu'on traite de pathologie et contrairement aux usages en matière de chaussée, on dénomme ici « couche de roulement » l'ensemble des couches au-dessus de l'étanchéité.

La chape d'étanchéité et la couche de roulement sont constituées de produits ou procédés distincts : la première est conçue principalement dans un but d'étanchéité, la deuxième comme support de la circulation et protection de l'étanchéité. Dans le cas particulier des complexes MHC (Moyens à haute cadence) on ne peut différencier distinctement les composants « étanchéité » et « support de circulation ».

Une chape d'étanchéité peut être réalisée au moyen de produits et procédés très divers se différenciant par la nature chimique des produits, leur épaisseur, le nombre de couches, leur mode d'adhésion au support ou à la couche de roulement.

Les couches de roulement sont généralement constituées de bétons bitumineux de formulation adaptée pour cet usage spécifique : faible épaisseur (7 cm traditionnellement), support rigide, mise en œuvre sans (ou avec peu) de vibration.

3. Les différents types d'étanchéité rencontrés

Les complexes d'étanchéité peuvent être classés selon les cinq types évoqués ci-après, néanmoins certaines variantes peuvent être rencontrées, notamment dans le domaine des feuilles préfabriquées où certains procédés dits en « semi-indépendance » et utilisant des matériaux autocollants, ont fait leur apparition récemment.

3.1 Feuille préfabriquée monocouche

Le complexe d'étanchéité de type feuille préfabriquée monocouche (FPM) est couramment composé de la manière suivante (figure 8) :

› Sous la feuille : une couche de vernis d'imprégnation à froid à base de dissolution de bitume dans un solvant organique ou à base de résines (en général). Il s'agit dans ce dernier

cas d'un « bouche pores » qui a pour fonction d'éviter le dégazage du béton sous la chape d'étanchéité et de limiter ainsi le risque de gonfles.

Le vernis d'imprégnation à froid est appliqué au rouleau, à la raclette mousse suivie d'un broissage ou au pistolet.

► Une feuille préfabriquée bitumineuse d'une épaisseur de l'ordre de 3 à 5 mm armée d'un matériau tissé ou non. Cette feuille est autoprotégée (permettant un trafic léger sur l'ouvrage) par des granulés de céramique ou d'ardoise d'une dimension de l'ordre de 2 mm. La sous-face est grésée ou filmée (film de protection thermo-fusible qui doit fondre lors de la mise en œuvre).

Cette feuille préfabriquée peut être appliquée par un moyen manuel (chauffage par un chalumeau à gaz composé d'un ou plusieurs brûleurs) (figure 9a) ou au moyen d'une machine d'application automatisée permettant la mise en œuvre de rouleaux de grande longueur (100 m ou plus) (figure 9b). Dans tous les cas, un marouflage soigné doit être réalisé.

La couche de roulement en béton bitumineux recouvrant ce complexe doit avoir une épaisseur minimale de 7 cm.

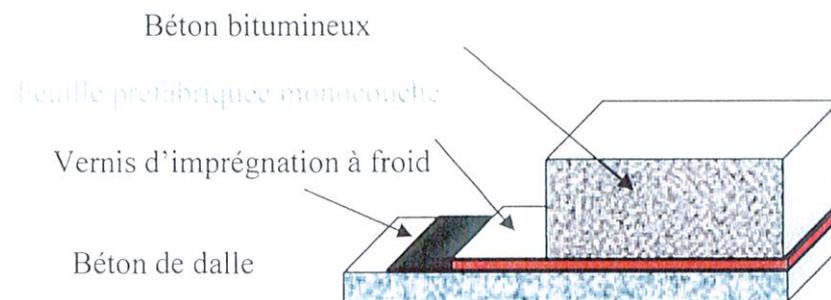


Figure 8. Schéma de principe d'une étanchéité par feuille préfabriquée monocouche



a) application manuelle



b) application mécanisée

Figure 9. Mise en œuvre des feuilles préfabriquées

3.2 Type « Asphalte »

3.2.1 Asphalte monocouche

Le complexe d'étanchéité de type asphalte coulé monocouche est généralement composé de la manière suivante (figure 10) :

► une couche d'accrochage constituée par un mélange de résines en solution ou d'un primaire bouche-pores.

► une couche d'étanchéité en asphalte élastomère ou asphalte modifié de 15 à 18 mm d'épaisseur (figure 11).

La couche de béton bitumineux recouvrant ce complexe doit avoir une épaisseur minimale de 7 cm.

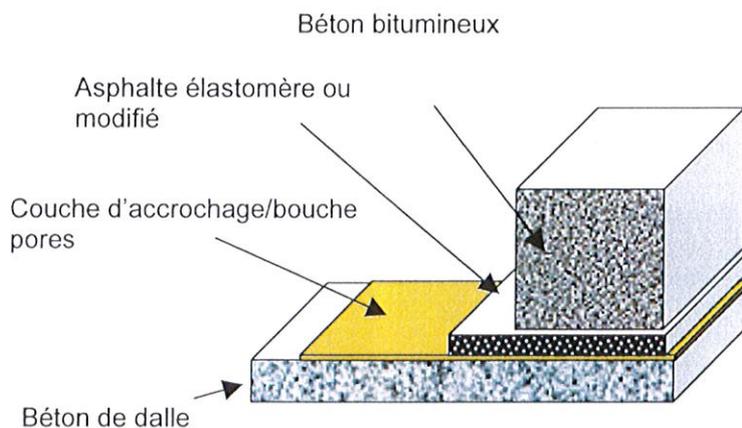


Figure 10. Schéma de principe d'une étanchéité de type asphalte monocouche



Figure 11. Mise en œuvre d'un asphalte monocouche

3.2.2 Asphalte bicouche

Le complexe d'étanchéité de type asphalte bicouche est généralement composé de la manière suivante (figure 12) :

- une couche de vernis d'imprégnation à froid à base de dissolution de bitume dans un solvant organique.
- une couche ajourée de papier Kraft ou de résille de verre. Cette couche assure la semi-indépendance du complexe et facilite la diffusion de la vapeur d'eau en provenance du béton.

Note : Pour assurer l'adhérence totale aux extrémités, la couche ajourée est interrompue à la périphérie de l'étanchéité.

- une couche d'asphalte pur de 8 mm d'épaisseur (cas le plus fréquent) appliquée manuellement (figure 13a).
- une couche d'asphalte gravillonné de 22 mm d'épaisseur (cas le plus fréquent) destinée à protéger l'asphalte pur et à augmenter l'étanchéité du complexe. Cet asphalte gravillonné peut être mis en œuvre manuellement (figure 13b) ou à l'aide d'un finisseur spécifique.

La couche de béton bitumineux recouvrant ce complexe doit avoir une épaisseur minimale de 5, voire 7 cm.

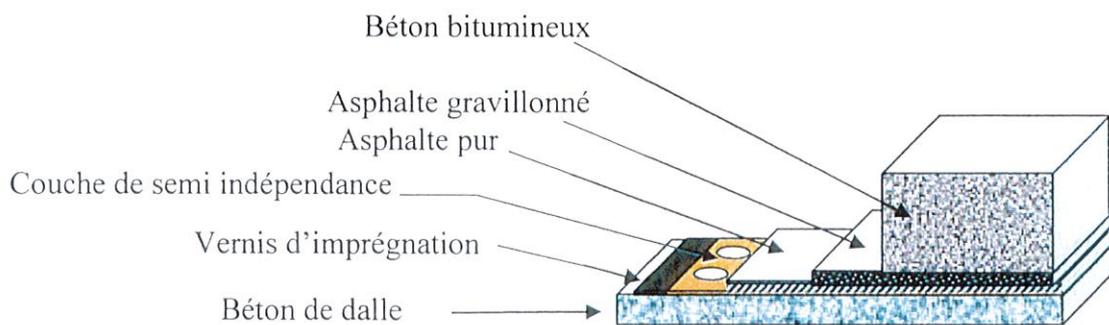


Figure 12. Schéma de principe d'une étanchéité de type asphalté bicouche



a) Mise en œuvre de la couche d'asphalte pur en semi-indépendance

b) Application manuelle de l'asphalte gravillonné

Figure 13. Mise en œuvre de l'asphalte

3.3 Feuille préfabriquée plus asphalte

Le complexe d'étanchéité de type feuille préfabriquée plus asphalte (FPA) est couramment composé de la manière suivante (figure 14) :

- une couche de vernis d'imprégnation à froid à base de dissolution de bitume dans un solvant organique ou à base de résine (en général). Il s'agit dans ce dernier cas d'un « bouche pores » qui a pour fonction d'éviter le dégazage du béton sous la chape d'étanchéité et de limiter ainsi le risque de gonfles. Le vernis d'imprégnation à froid est appliqué au rouleau, à la raclette mousse suivie d'un brossage ou au pistolet ;
- une feuille préfabriquée bitumineuse d'une épaisseur de l'ordre de 3 mm à 4 mm armée d'un matériau tissé ou non. Cette feuille préfabriquée peut être appliquée par un moyen manuel (chauffage par un chalumeau à gaz comportant un ou plusieurs brûleurs) ou au moyen d'une machine d'application automatisée permettant la mise en œuvre de rouleaux de grande longueur (100 m ou plus) ;

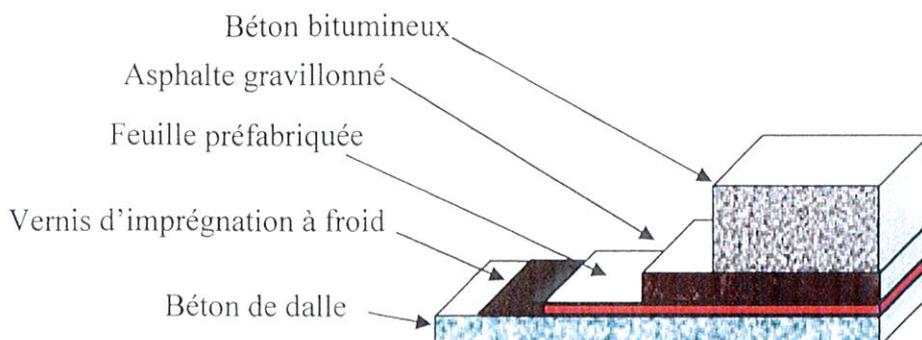


Figure 14. Schéma de principe d'une étanchéité de type feuille préfabriquée plus asphalte

► une couche d'asphalte gravillonné de 2,5 cm d'épaisseur destinée à protéger la feuille et à augmenter l'étanchéité du complexe. Cet asphalte peut être mis en œuvre manuellement ou au finisseur (figure 15).

La couche de béton bitumineux recouvrant ce complexe doit avoir une épaisseur minimale de 5, voire 7 cm.



a) Application manuelle



b) Application au finisseur

Figure 15. Application de l'asphalte gravillonné de protection sur une feuille préfabriquée

3.4 Film mince adhérent au support ou Système d'étanchéité liquide

Le complexe d'étanchéité de Film mince adhérent au support (FMAS) ou Système d'étanchéité liquide (SEL) est généralement composé de la manière suivante (figure 16) :

- une couche d'imprégnation, généralement à base de résines époxydiques, ayant pour fonction d'assurer l'interface béton-résine ;
- une couche de résine (époxydique ou polyuréthane) d'environ 1,5 mm d'épaisseur mise en œuvre au rouleau (figure 17a) ou projetée au pistolet (figure 17b) ;
- dans le cas où la chape est recouverte du béton bitumineux de chaussée (figure 16a) ou de trottoir : une couche de scellement en résine (époxydique ou polyuréthane) d'environ 1,5 mm d'épaisseur est mise en œuvre au rouleau ou pulvérisée au pistolet. Elle est destinée à recevoir la couche de gravillon d'accrochage ;
- dans le cas où la chape n'est pas recouverte par un béton bitumineux ou un sable enrobé (figure 16b), une couche complémentaire anti-UV et, le cas échéant, une couche destinée à apporter de la rugosité en cas de circulation sur l'étanchéité.

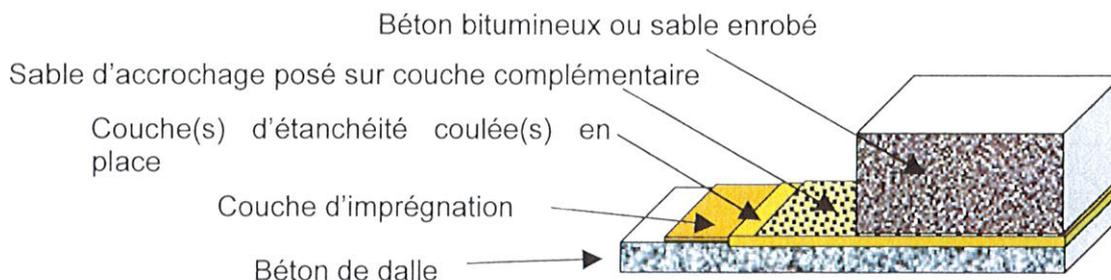
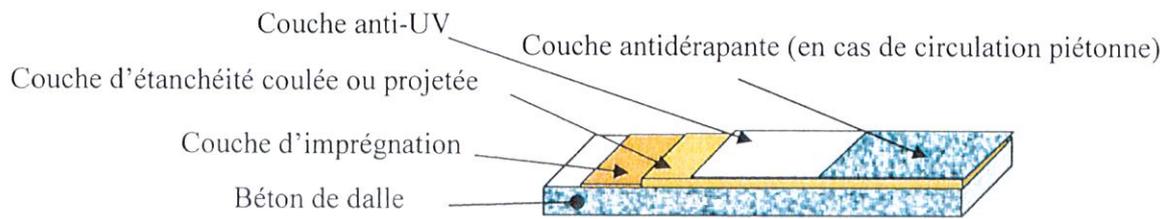


Figure 16 a) Cas d'une étanchéité recouverte de béton bitumineux ou sable enrobé

* La couche de béton bitumineux recouvrant ce complexe doit avoir une épaisseur minimale de 7 cm.



b) cas d'une étanchéité non recouverte

Figure 16. Schéma de principe d'une étanchéité de type FMAS/SEL



a) Mise en œuvre au rouleau



b) Mise en œuvre au pistolet

Figure 17. Mise en œuvre de la couche de film mince

3.5 Moyens à haute cadence

Les moyens à haute cadence sont issus des techniques de mise en œuvre des matériaux bitumineux constitutifs des chaussées et se composent généralement de la manière suivante (figure 18) :

- une couche d'imprégnation ayant pour fonction d'assurer l'interface béton-microbéton bitumineux. Cette interface peut être à base d'émulsion de bitume et elle est dans ce cas appliquée à la répandeuse, elle peut également être à base de dissolution de bitume modifié par des polymères dans un solvant organique et est, dans ce cas, appliquée au pistolet airless ;
- une couche de microbéton bitumineux de 3 cm d'épaisseur environ mise en œuvre au finisseur ;

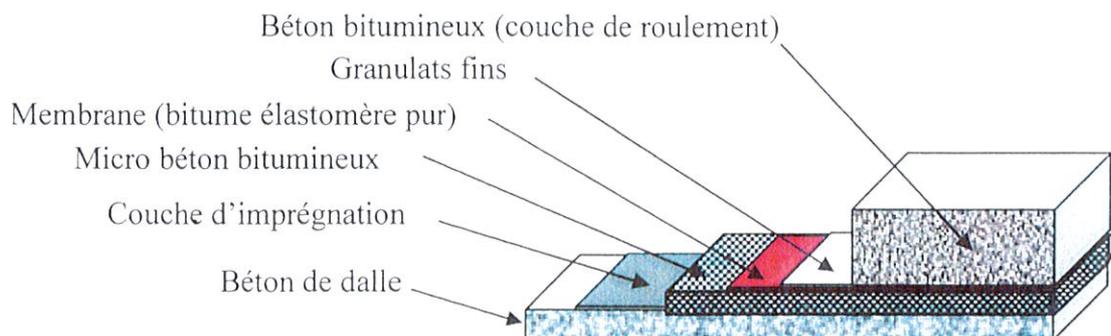


Figure 18. Schéma de principe d'une étanchéité par moyen à haute cadence (MHC)

- une couche de bitume polymère dosé à environ $2,5 \text{ kg/m}^2$ projetée par une répandeuse ;
- une couche de granulats fins destinée à faciliter la circulation des engins de chantier assurant la pose de la couche suivante ;
- une couche de roulement à base de béton bitumineux au bitume élastomère de 5 cm d'épaisseur environ.



a) Application de la membrane en bitume pur



b) Application de la protection de la membrane

Figure 19. Mise en œuvre d'une étanchéité de type MHC

Note : ce type de complexe peut permettre, selon le procédé mis en œuvre, des reprofilages jusqu'à 3 cm d'épaisseur à l'aide de la couche de microbéton bitumineux. L'utilisation d'une couche de reprofilage spécifique permettant d'obtenir des épaisseurs supérieures a souvent conduit à l'apparition de désordres.

Type de complexe d'étanchéité	Asphalte monocouche	Asphalte bicouche	Feuille préfabriquée monocouche	Feuille préfabriquée + asphalte	FMAS/SEL	Moyens à haute cadence
Caractéristiques						
Réglementation applicable	Apparenté au Fascicule 67-I du CCTG (§ 7.1.2)	Fascicule 67-I du CCTG (§ 7.1.1)	Fascicule 67-I du CCTG (§ 7.3.1)	Fascicule 67-I du CCTG (§ 7.3.2)	Fascicule 67-I du CCTG (§ 8.3.2)	Mise à jour STER 81 et PAQ entreprise
Épaisseur (mm)	Env. 15	30 à 35	4-6	30 à 35	2 à 3	25 /60
Adaptation à la géométrie en plan du support	Tous types de géométrie	Tous types de géométrie	rectangulaire de préférence	rectangulaire de préférence	Tous types de géométrie	Adapté à l'utilisation d'un finisseur
Pente maximale pour la mise en œuvre	Non spécifié	Maximum 10 % (risque de fluage)	Pas de pente maximum	Maximum 10 % (risque de fluage de l'asphalte gravillonné)	Fonction de la thixotropie de la résine	Pente compatible avec une mise en œuvre homogène de la membrane bitumineuse
Texture superficielle (PMT ¹)	PMT ≤ 1,5 mm	PMT ≤ 1,5 mm	PMT ≤ 1,5	PMT ≤ 1,5	PMT ≤ 1	PMT ≤ 1.5 voire légèrement supérieure
Délai minimum entre bétonnage du support et étanchéité	28 jours	15 jours	15 jours	15 jours	28 jours	Non spécifié
Moyens matériels de mise en œuvre	Lourds	Lourds	Légers ou lourds (application à la machine)	Lourds	Légers ou lourds (application à la machine)	Très lourds (atelier routier complet)
Niveau de qualification du personnel	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Très élevé	Élevé
Sensibilité aux Conditions météo	Sensible	Peu sensible	Sensible	Sensible	Très sensible	Peu sensible
Possibilité de circulation de chantier (hors mise en œuvre des couches de roulement)	Oui	Oui (légère)	Adhérente : Oui (légère) Semi-indépendante : Non	Oui (si protégée par l'asphalte)	Non	Oui

Tableau 1. Quelques caractéristiques comparées des complexes d'étanchéité à la mise en œuvre

1. PMT : Profondeur Moyenne de Texture – Communément appelée hauteur de sable (HS).

Type de complexe d'étanchéité	Asphalte monocouche	Asphalte bicouche	Feuille pré-fabriquée monocouche	Feuille pré-fabriquée semi-indépendante	Feuille pré-fabriquée + asphalte	FMAS / SEL	Moyens à haute cadence	
EN SERVICE	Étanchéité du raccord avec les joints de chaussée	Problèmes peu importants	Problèmes peu importants	Problèmes peu importants	Problèmes peu importants	Problèmes peu importants	Sans problèmes	Problèmes potentiels importants
	Risque de gonflement	Possible	Faible	Fort	Faible	Fort	Nul	Faible
	Résistance globale à la fissuration	Bonne	Faible à moyenne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Moyenne à très bonne	Moyenne à bonne
	Risque de circulation d'eau entre chape et support	Très faible	Très important	Très faible	Très important	Très faible	Nul	faible
	Risque de glissement de l'étanchéité sur le support	Faible	Élevé (semi-indépendance)	Très faible	Important	Très faible	Nul	Faible
	Risque de glissement de la couche de roulement sur l'étanchéité	Faible	Faible	Nul	Faible	Très faible	Élevé	Faible
	Possibilité d'entretien spécifique de la couche de roulement ²	Délicat	Possible	Délicat	Très délicat	Possible	Délicat	Délicat
	Possibilité de réparation locale de l'étanchéité	Extrêmement délicat	Facile	Assez facile	Délicat	Assez facile	Très délicat	Délicat

Tableau 2. Quelques caractéristiques comparées des complexes d'étanchéité en service

2. Le renouvellement complet des couches de chaussée sans réfection de la chape d'étanchéité est déconseillé (chapitre 4).

4. Les étanchéités des ponts de par le monde

Le présent paragraphe vise à donner une vue globale des techniques utilisées dans les autres pays.

Il n'est pas question, ici, de faire un tableau exhaustif de ce qui se fait en terme d'étanchéité des ponts dans le monde. Pour le lecteur intéressé, nous renvoyons au rapport du Comité des ponts de l'AIPCR (6) qui fait la synthèse d'une large enquête au niveau mondial et qui, malgré son ancienneté, reste encore valable dans ses grandes lignes.

La pratique de l'étanchéité sur les ponts routiers est-elle généralisée ou non ? Si l'on se limite au cas des pays industrialisés et développés, il semble que la majorité de ces pays pratique l'étanchéité sur les ponts. Seuls certains états des États-Unis et du Canada anglophone ne font pas d'étanchéité sur leurs ponts et protègent leurs structures par d'autres approches.

Si l'on se focalise sur l'Europe, la pratique de l'étanchéité est assez systématique. Hors de l'Europe, le Japon réalise des étanchéités sur ses ponts.

Les techniques utilisées par les différents pays sont assez variées. Par exemple, l'Espagne réalise des étanchéités assez minimalistes à base de feuilles préfabriquées bitumineuses avec ou sans armatures.

L'Italie utilise beaucoup les feuilles préfabriquées bitumineuses à base de liant bitume modifié par des polymères APP (polyphthalamides).

Le Royaume-Uni fait appel aux deux techniques que sont les feuilles préfabriquées bitumineuses et les films minces adhérant au support, souvent avec une protection de l'étanchéité par une couche de 2 à 3 cm d'un « sand asphalt » dont la formulation est très proche d'un sable enrobé. D'après certaines informations, il semblerait que la technique FPM serait plus réservée aux petits ouvrages et la technique FMAS/SEL aux grands ouvrages.

La Belgique utilise les mêmes techniques que la France à l'exception des MHC.

L'Allemagne, suivie par la Suisse alémanique et les pays comme la République tchèque, la Slovaquie, la Slovénie ou la Pologne, utilisent les techniques bicouches asphalte, les FPM ainsi que les FMAS/SEL mais systématiquement recouvertes par une couche d'asphalte gravillonné de 25 mm d'épaisseur. L'Allemagne a été le précurseur dans l'utilisation des bouche-pores à base de résines ou époxydiques.

Les pays nordiques (Suède et Finlande) réalisent leur étanchéité de pont par des techniques FPM et FMAS/SEL. Le Danemark semble se singulariser en utilisant, en outre, des systèmes un peu spécifiques à base de mortier de résine sur lesquels on circule directement.

Le Japon reste assez traditionnel avec des FPM, des FMAS/SEL et des asphaltes (formulation non précisée) mais sous des couches de roulement assez peu épaisses qui semblent être à l'origine d'un certain nombre de désordres.

Au niveau de l'Europe, il convient de signaler la mise en place d'une normalisation sur des produits d'étanchéité des ponts : la norme NF EN 12970 de qualification de l'asphalte (7) ; les normes sur les feuilles préfabriquées avec le marquage CE au travers de la norme NF EN 14695 (8) ; l'Agrément technique européen (ATE) et le marquage CE via l'ETAG 033 (8bis) pour les systèmes FMAS/SEL.

En conclusion, on peut estimer que les techniques utilisées en France se retrouvent sous une forme ou une autre, parfois avec des variantes techniques, dans la plupart des pays industrialisés et développés. La technique MHC fait un peu exception car elle est relativement récente et a été surtout développée en France mais d'assez nombreux ouvrages à l'étranger ont fait l'objet d'une application de cette technique.

On notera qu'à travers l'Europe, le marquage CE aura un effet d'uniformisation indéniable d'ici les prochaines années même si chaque pays gardera une certaine liberté d'adaptation des techniques à son propre contexte.

5. Le référentiel technique

Ce paragraphe a pour objet de présenter les principaux documents traitant de la mise en œuvre des chapes, de leur contrôle, de leur réparation et de leur surveillance. Il peut s'agir de textes réglementaires, informatifs ou de guides techniques.

5.1 Mise en œuvre et contrôle des chapes

Titre du document	Date	Objet, Domaine d'application	Portée du document
Fascicule 67 titre I du CCTG (9)	1985	S'applique à l'exécution des travaux d'étanchéité (neufs, entretien ou de réparation) sur les ponts routes. Précise les exigences sur les matériaux et produits à spécifier dans les marchés. Précise les modalités d'exécution des travaux (support, mise en œuvre, réception).	Réglementaire
STER 81 (10)	1981	Traite de certains équipements des tabliers : - Surfaçage : note d'information sur les moyens d'actions possibles tant au stade du projet que de celui de la mise en œuvre du béton frais et de la préparation du béton durci, des propositions d'articles de CCTP... - Étanchéités : posées en semi-indépendance avec des produits à base d'asphaltes, posées en adhérence, en film mince, comprenant l'utilisation de feuilles préfabriquées... - Couches de roulement : indications sur les différents types de couches de roulement utilisables et sur le choix de solutions spécifiques...	Guide
STER 81, mise à jour n° 1 (11)	1990	Fournit des éléments d'information sur des procédés MHC non prévus par le fascicule 67 titre I du CCTG ou par le STER 81. Décrit le principe et les dispositions à mettre en œuvre pour la réalisation de telles étanchéités.	Guide
fiche MEMOAR n° 19 « Mise en œuvre des chapes d'étanchéité » (12)	2010	Destinée aux maîtres d'œuvre, traite des différents types de complexes d'étanchéité et du contrôle de leur mise en œuvre.	Informatif
Guide « Assainissement des ponts-routes - Évacuation des eaux, perrés, drainage corniches-caniveaux » (13)	1989	Généralités, descriptions, dispositions constructives et règles de dimensionnement. Propose de donner des conseils pour projeter et réaliser le réseau d'évacuation des eaux d'un pont.	Guide
Guide « Joints de chaussée des ponts route » et sa mise à jour n° 1 (14)	1986	S'intéresse aux joints de chaussée et traite aussi des problèmes d'étanchéité (du pont et du joint).	Guide
Note d'information n° 25 du Sêtra/CTOA (15)		Précise les domaines respectifs des techniques adaptées à l'étanchéité de surface d'un tablier de pont par rapport à celles destinées à assurer une protection des parements du béton.	Informatif

Titre du document	Date	Objet, Domaine d'application	Portée du document
Avis techniques du Sétra (16)		Spécifiques à un procédé donné, donnent des informations sur la composition du complexe, les essais de caractérisation et de performance ainsi que l'avis de la commission sur le procédé.	Informatif
Guide de conception des ponts mixtes acier-béton bipoutres (17)	1985	Destiné aux maîtres d'œuvre et aux projeteurs, ce document traite des ponts mixtes acier-béton.	Guide

Tableau 3. Référentiel technique - Mise en œuvre et contrôle des chapes

5.2 Surveillance, prévention et réparation des chapes

Titre du document	Date	Domaine d'application	Portée du document
Fascicule 21 de l'IT-SEOA (18)	2010	Destiné aux visiteurs et gestionnaires d'ouvrages d'art. Traite de la protection contre les eaux, des revêtements, des joints de chaussée et de trottoirs, des garde-corps et dispositifs de retenue.	Guide
STER 81, mise à jour n° 2 (19)	2001	Destiné aux projeteurs, gestionnaires, maîtres d'œuvre et entreprises. Donne des recommandations pour l'exécution de réfections localisées des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art.	Guide
Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'art (Thème : Protection contre l'eau) (20)	1998	S'adresse aux gestionnaires et aux inspecteurs d'ouvrages d'art. Présente les différentes pathologies affectant l'étanchéité et l'assainissement des ouvrages d'art et leur mode de traitement. Donne des recommandations pour améliorer la conception des ouvrages d'art.	Guide
Guide Technique « <i>Entretien des complexes d'étanchéité / couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art. Cas des ouvrages comportant un renformis</i> » (21)	2006	Destiné aux maîtres d'œuvre, aux maîtres d'ouvrages, aux organismes chargés du contrôle extérieur et aux entreprises. Concerne la réhabilitation du complexe « étanchéité / couche de roulement » lorsque l'ouvrage comporte un renformis en béton sur le tablier.	Guide
Guide « Ponts routes en maçonnerie / protection contre l'action des eaux, étanchéité, assainissement, drainage... » (22)	1992	Après avoir rappelé l'importance de la protection contre l'action des eaux et les conséquences vis-à-vis de la structure, ce guide décrit les différentes techniques d'étanchéité avec les conseils et les avantages ou inconvénients de chacune d'entre elles.	Guide
Guide STRRES (23)	2010	Entretien et réparation des équipements d'ouvrages : étanchéités.	Guide

Tableau 4. Référentiel technique - Surveillance, prévention et réparation des chapes

6. Bibliographie

- [1] « *La place de l'asphalte coulé en France et dans le monde* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 189 de janvier février 1994, référence 3797, Situation actuelle et évolution faces aux autres types d'étanchéité par Zündel Ph.
- [2] « *Ponts routes en maçonnerie - protection contre l'action des eaux, étanchéité, assainissement, drainage* », collection Guide technique, Sétra, mai 1992 (réf. F9231).
- [3] Perronet J.-R., « *Construire des ponts au XVIII^e siècle* », pages 87-90.
- [4] Conclusions de l'étude sur ce type de chape dans le Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées par Bicheron G. et Ajour A.-M., n° 96 de juillet-août 1978.
- [5] Fascicule 67 titre I du CCTG « *Étanchéité des ponts routes support en béton de ciment* », avril 1985 (téléchargeable sur le site <http://www.btp.equipement.gouv.fr>)
- [6] Rapport du Comité des ponts routiers (CT11) au XVIII^e Congrès mondial de la Route à Bruxelles (13-19 septembre 1987).
- [7] Norme EN 12970, « *Asphalte coulé pour étanchéité - Définitions, spécifications et méthodes d'essai* », décembre 2002
- [8] Norme NF EN 14695, « *Feuilles souples d'étanchéité – Feuilles bitumineuses armées pour l'étanchéité de ponts et autres surfaces en béton circulables par les véhicules – Définitions et caractéristiques* », avril 2010 (8bis) ETAG033, Kits d'étanchéité liquide pour tablier de pont, téléchargeable sur le site de l'EOTA www.eota.be.
- [9] Fascicule 67 titre I du CCTG « *Étanchéité des ponts routes support en béton de ciment* », avril 1985 (téléchargeable sur le site <http://www.btp.equipement.gouv.fr>)
- [10] STER 81, « *Surfaçage, étanchéité et couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art* », collection Guide technique, Sétra, référence F8210, juillet 1981 et les guides antérieurs de 1966, de la mise à jour de 1967 et de 1974.
- [11] STER 81, mise à jour n° 1, « *Complexes d'étanchéité mis en œuvre par des moyens à haute cadence* », Sétra, juillet 1990.
- [12] fiche MEMOAR (Memento pour la Mise en œuvre sur les Ouvrages d'art), fiche n° 19, « *Mise en œuvre des chapes d'étanchéité* », Sétra, mars 2005, révision octobre 2007, CD ROM référence 0757CD.
- [13] « *Assainissement des ponts-routes - Évacuation des eaux, perrés, drainage, corniches-caniveaux... Généralités, descriptions, dispositions constructives et règles de dimensionnement* », collection Guide technique, Sétra, référence F8940, juin 1989.
- [14] « *Joints de chaussée des ponts route* », collection Guide technique, Sétra, référence F8737, Juillet 86, révision prévue fin 2011, téléchargeable sur le site du Sétra.
- [15] Note d'information Ouvrage d'art n° 25, « *Ne pas confondre étanchéité de surface de tablier et protection du béton* », Sétra, référence 0422w, août 2004.
- [16] Avis techniques, « *Étanchéité des ponts-routes avec support en béton ou en tôle d'acier* », Sétra, en cours de validité, téléchargeable sur le site du Sétra.
- [17] « *Ponts mixtes acier-béton bipoutres - Guide de conception* », Sétra, octobre 1985, Réf. F8570.
- [18] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEO) du 19 octobre 1979 et sa révision, gestion et surveillance des ouvrages d'art, fascicule 21, « *Équipements des ouvrages* », Sétra, 2010.
- [19] STER 81, mise à jour n° 2, « *Réfection des étanchéités et des couches d'étanchéité des couches de roulement des tabliers d'ouvrage d'art – réparations localisées* », Sétra, référence F0112, mai 2001.
- [20] « *Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'art - Thème : Protection contre l'eau* », catalogue de fiches destinées à contribuer à une amélioration de la conception des ouvrages d'art, collection Guide technique, Sétra / LCPC, référence F9817, décembre 1998.

[21] « *Entretien des complexes d'étanchéité /couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis* », collection Guide technique, LCPC, référence LCPC n° C1502448 RENFORMIS, août 2006.

[22] « *Ponts routes en maçonnerie - protection contre l'action des eaux, étanchéité, assainissement, drainage* », collection Guide technique, Sétra, référence F9231, mai 1992.

[23] « *Équipements d'ouvrages, Entretien et réparation des équipements d'ouvrages* », FAEQ 2, collection Guide technique, Étanchéité, STRESS, décembre 2009.

CHAPITRE 2

DÉFAILLANCE DES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ / ORIGINES ET CONSÉQUENCES



L'absence, la défaillance ou le dysfonctionnement d'une chape d'étanchéité peut avoir de graves conséquences sur la pérennité de la structure sous-jacente mais également sur la tenue de la couche de roulement.

D'une manière générale, les défaillances peuvent avoir pour origine des erreurs de conception, des défauts de mise en œuvre ou bien encore un vieillissement naturel ou prématuré des matériaux. Des causes « accidentelles » peuvent également être à l'origine de détériorations (lors d'une réfection de la couche de roulement par exemple).

Dans la suite du chapitre, la défaillance des chapes d'étanchéité sera abordée selon qu'elles jouent un rôle de protection contre les venues d'eau ou un rôle en terme de support et d'interface avec la couche de roulement.

1. L'étanchéité, une protection contre les venues d'eau

La fonction première d'une chape est d'assurer une protection du tablier contre la pénétration des eaux.

Ces eaux pures, ou plus ou moins chargées d'éléments agressifs, les conditions climatiques et les conditions d'exploitation de la route, nécessitant en hiver le répandage de sels de déverglaçage, peuvent altérer les matériaux constitutifs de l'ouvrage et, à terme, son comportement structurel.

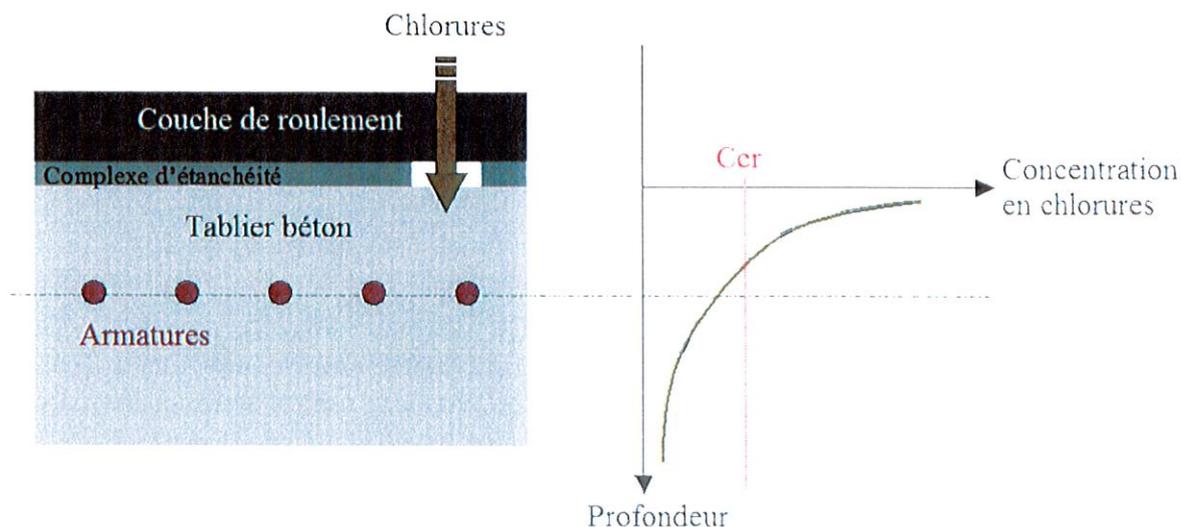
La défaillance de l'étanchéité favorise les infiltrations d'eau. Les éléments agressifs sont alors véhiculés au cœur des éléments en béton (tablier, corniche, longrine, etc., figure 20) et provoquent leur dégradation (corrosion puis éclatement du béton par exemple). À terme ces dégradations peuvent altérer l'intégrité des structures (perte de section ou d'adhérence des armatures par exemple). L'effet conjugué des chlorures et des cycles de gel-dégel est également très pénalisant.

Trois cas de figure de défaillance peuvent se présenter :

- le tablier ne dispose pas d'étanchéité,
- il existe des défauts d'étanchéité en section courante ou au niveau des points singuliers,
- l'étanchéité est insuffisante au droit des équipements.

Même s'ils ne relèvent pas de l'étanchéité à proprement parler, les défauts concernant les dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux, qui jouent un rôle fondamental dans la protection des ouvrages contre l'eau, sont également à prendre en compte.

Il ne faut pas confondre étanchéité et retenue des eaux sur l'ouvrage. C'est pourquoi il est indispensable que l'ouvrage comporte des dispositifs efficaces d'évacuation des eaux externes (pentes, caniveaux, fils d'eau, etc.) et interne (drains) qui permettent d'évacuer les eaux de ruissellement le plus rapidement possible.



Ccr : Concentration critique d'initiation de la corrosion

Figure 20. Phénomène de pénétration des ions chlorures issus des sels de déverglaçage (véhiculés par l'eau) à l'origine de la corrosion des armatures du tablier en cas de défaillance de la chape

1.1 Les défauts d'étanchéité en section courante

1.1.1 Absence d'étanchéité sur le tablier

38

Certains ouvrages en béton armé et précontraint anciens ont été réalisés sans chape d'étanchéité (figure 21). C'est le cas également de certains petits ouvrages (cadres préfabriqués par exemple). Le plus souvent, les dimensions jugées petites conduisaient à sous-estimer l'intérêt de l'étanchéité.

Dans le cas des ouvrages précontraints, la précontrainte était considérée comme une technique permettant d'éviter la fissuration du béton (première génération des ponts à poutres VIPP par exemple) ; l'étanchéité semblait donc inutile. Il existe ainsi une forte probabilité d'absence de chape d'étanchéité sur les ponts en béton précontraint construits avant 1964-66 (tableau n° 5). Toutefois, compte tenu de la période concernée, il est probable que ces ouvrages aient fait l'objet de travaux, du fait de l'apparition de problèmes.

La dégradation du béton et des aciers consécutive à cette absence d'étanchéité peut entraîner une réduction de la capacité portante du tablier. Évidemment, les conséquences sont un enjeu de sécurité, d'exploitation, économique, environnemental et d'exploitation.



Figure 21. Exemple d'ouvrages sans étanchéité, conséquences en intrados

1940 à 1945	Absence de chape d'étanchéité, « le béton comprimé étant réputé parfaitement étanche ».
1946 à 1952	Durant cette période et comme précédemment, les tabliers en béton précontraint étaient réputés étanches (cas des ponts d'Esblly sur la Marne) et ne recevaient donc pas de chapes d'étanchéité.
1953 à 1964	C'est le 1 ^{er} Octobre 1953 qu'apparaît le premier règlement français de béton précontraint, qui visait essentiellement le béton totalement comprimé tout en laissant une ouverture vers les constructions partiellement précontrainte. En complément des instructions de 1953, le Service Central d'Études Techniques (S.C.E.T.) a fait paraître la note technique datée du 24 novembre 1964 sur les hypothèses de calcul des dalles en béton précontraint. Cette note autorisait, par dérogation à l'article 11 des instructions provisoires de 1953, la fissuration du béton des dalles sous réserve que les armatures de précontrainte demeurent entièrement dans les zones comprimées du béton sous l'effet des charges B. Les tractions n'étaient pas reprises par des aciers passifs. Les chapes (mastic d'asphalte) commencent à être utilisées mais leur épaisseur ne dépasse pas 10 à 15 mm.
1965 à 1982	La circulaire n° 44 du 12 août 1965 relative à l'instruction provisoire pour l'emploi du béton précontraint dite I.P. 1. a remplacé la circulaire de 1953. La précontrainte totale restait de rigueur mais sans réserve de compression. En 1966, paraît la directive provisoire sur l'exécution des ponts en béton précontraint. Elle modifiait la partie exécution de l'I.P. 1. et insistait notamment sur l'obligation d'une chape d'étanchéité.

Tableau 5. Ponts en béton précontraint – Historique des dispositions constructives relatives à l'étanchéité avant la publication du STER 81

1.1.2 Absence d'étanchéité sous trottoirs

Fréquemment, notamment sur des ouvrages anciens ou de conception ancienne, l'étanchéité du tablier s'arrête au niveau de la longrine servant de contre-bordure aux bordures de trottoirs ou de support des glissières de sécurité. Dans ce cas, il faut considérer que le revêtement de surface du trottoir, bien qu'à base de matériau d'étanchéité (asphalte par exemple) n'assure pas l'étanchéité de la partie trottoir. En effet, le vieillissement de ce matériau non protégé, l'absence de continuité avec l'étanchéité sous chaussée, l'utilisation des trottoirs pour le passage des réseaux sont autant de facteurs qui nuisent à l'efficacité d'une étanchéité de surface du trottoir.

Ceci favorise les infiltrations d'eau dans le remplissage du trottoir qui se comporte alors comme une réserve d'eau. Cette eau peut alors s'infiltrer progressivement dans le tablier sous-jacent et avoir les conséquences vues précédemment, notamment dans le cas de poutres de rive de VIPP (figure 22).



Figure 22. Absence d'étanchéité sous trottoir, cas des poutres de rive d'un VIPP

1.1.3 Défaut d'étanchéité de la chape

Les chapes peuvent présenter des désordres de types fissures, trous, porosité, blessures suite au rabotage de la couche de roulement par exemple. Tous ces défauts sont autant de passages préférentiels pour l'eau.

Ces défauts peuvent avoir plusieurs origines :

- ▶ liées à la conception : chape inadaptée à l'ouvrage (trafic, pente, etc.) par exemple ;
- ▶ liées à la mise en œuvre :
 - chape inadaptée à la qualité du support (perforation par les aspérités du béton) ;
 - non-respect des exigences de mise en œuvre de la chape.
- ▶ liées à l'entretien : endommagement de la chape lors d'opérations d'entretien (renouvellement de la couche de roulement par exemple) ou par la mise en œuvre de fixation d'éléments (ancrage de panneaux de signalisation par exemple) ;
- ▶ liées à la durabilité des matériaux : vieillissement naturel de la chape.

L'eau chemine plus ou moins en fonction du type d'étanchéité et s'infiltré à travers le tablier par les points de passages privilégiés que sont les fissures, les reprises de bétonnage, les joints entre voussoirs préfabriqués, la porosité naturelle du béton ou les ancrages de câbles relevés en travée.

L'apparition des désordres sur l'ouvrage est alors progressive :

1. tâches d'humidité en sous-face de tablier, suintements à travers les fissures, efflorescences, stalactites (figure 23a) ;
2. corrosion des aciers entraînant, par gonflement, des éclatements du béton et la mise à nu des armatures (figure 23b) ;
3. délamination du béton sous l'effet du trafic et des cycles de gel-dégel, à terme désagrégation du béton et formation de trous dans le tablier (figure 23c).



Figure 23. Altérations du béton armé dues à une défaillance de l'étanchéité

Le schéma suivant (figure 24) illustre le caractère évolutif de la dégradation par corrosion ayant pour origine une défaillance de l'étanchéité. On notera que, dans une première phase, le processus peut ne pas se manifester par des désordres visibles.

La défaillance de l'étanchéité entraîne à terme la corrosion des armatures du béton. Elle peut également dans certains cas initier, développer et accélérer des pathologies spécifiques du béton. Pour les tabliers dont le béton constitutif est susceptible de développer une réaction de gonflement interne (RGI), telle que la réaction sulfatique interne (RSI) ou l'alcali réaction, les infiltrations d'eau sont en effet intolérables puisqu'elles peuvent activer ou réactiver la réaction pathologique (figure 25).

Dans d'autres cas, le défaut d'étanchéité peut initier un phénomène d'altération par délamination et à terme une désagrégation du béton. L'exemple suivant illustre les conséquences ultimes d'un tel phénomène (figure 26).

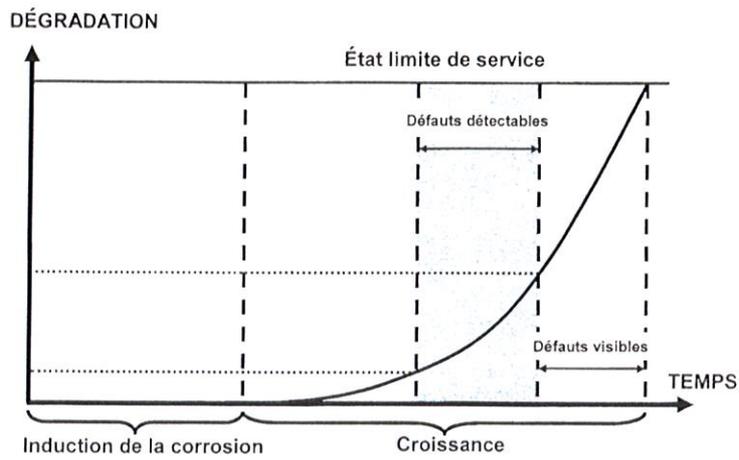


Figure 24. Les étapes du processus de corrosion des armatures



Figure 25. Développement d'une réaction de gonflement interne favorisé par un défaut d'étanchéité du tablier



Figure 26. Phénomène de « pourrissement des dalles de tablier de pont » observé sur plusieurs ouvrages en Belgique (source (1) : BLPC n° 232 – Mai / juin 2001)

Dans le cas des ouvrages en béton précontraint, et plus particulièrement celui des ouvrages VIPP présentant des conduits de précontrainte relevés en travée, une défaillance de la chape d'étanchéité peut avoir des conséquences graves sur la structure : l'eau peut rentrer dans les conduits (ancrages relevés), cheminer sur de longues distances et provoquer une corrosion, voire la rupture de fils ou de torons, sans que ces désordres soient nécessairement visibles.

1.2 Les défauts d'étanchéité au droit des points singuliers

1.2.1 Défaut de relevés d'étanchéité

Il est fréquent de constater des défaillances de l'étanchéité ayant pour origine une absence ou une faiblesse des relevés d'étanchéité sur les bords (figure 27). Le plus souvent, cette défaillance est liée à une mauvaise conception de projet, à une réalisation/réfection mal conduite ou à un défaut d'entretien :

- dégradations occasionnées lors de la pose des bordures de trottoir ;
- mauvaise exécution de l'étanchéité dans la zone du relevé d'étanchéité ;
- absence ou mauvaise réalisation de l'engravure (contournement du relevé par l'eau) ;
- niveau haut de la couche de roulement supérieur au niveau haut du relevé (contournement du relevé par l'eau) ;
- défauts d'entretien favorisant le développement de végétation.



a)



b)

Figure 27. Mauvaise conception (a) ou absence (b) du relevé d'étanchéité

L'absence ou la présence de défauts de conception ou d'exécution du relevé d'étanchéité provoque l'infiltration de l'eau dans la structure, principalement au point bas du profil en travers.

Les conséquences d'un tel défaut sont aggravées quand l'étanchéité est posée en semi-indépendance. En effet, dans ce cas, il peut y avoir circulation de l'eau entre celle-ci et le support. Cette problématique peut également se rencontrer de manière limitée avec d'autres procédés dits adhérents : dégradation du primaire d'accrochage (polyuréthane par exemple) ou réduction de l'adhérence en présence d'eau (vernis de feuille préfabriquée par exemple) ou bien encore en présence d'un reprofilage.

D'une manière générale, une défektivité locale peut avoir des conséquences pouvant affecter une surface plus ou moins importante en fonction du type d'étanchéité.

L'absence ou la défectuosité du relevé d'étanchéité provoque l'infiltration de l'eau dans la structure et entraîne l'apparition des désordres mentionnés à l'article 1.1.3 (figure 28).

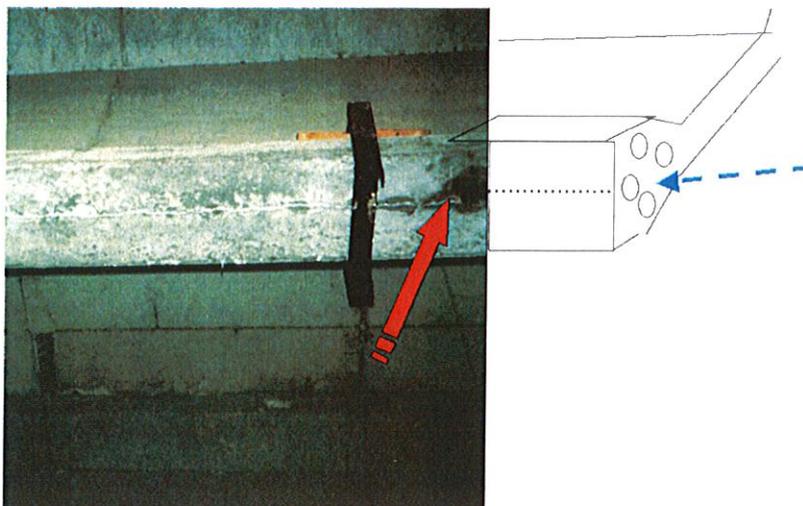


Figure 28. Infiltration d'eau dans une gaine de précontrainte consécutive à un défaut de relevé d'étanchéité (note : ce désordre peut apparaître dans d'autres situations)

1.2.2 Défaut d'étanchéité au raccordement avec les points d'évacuation des eaux

Les venues d'eau autour d'un point d'évacuation ont pour origine principale un défaut de connexion entre la chape d'étanchéité et le dispositif assurant l'évacuation de l'eau au-dessus du tablier du pont. Parfois, le dispositif d'évacuation peut être en cause par suite de corrosion, de rupture ou de déboîtement.

Dans le cas de système d'évacuation « vertical », le tuyau traversant la dalle de béton est équipé d'une collerette sur laquelle le raccordement à l'étanchéité est effectué (guide STER 81). Si cette jonction n'est pas bien exécutée ou est modifiée lors de travaux de reprise des couches de roulement, on peut observer un contournement de l'étanchéité et des suintements à proximité du tuyau (figure 29). Une gargouille aux dimensions inadaptées peut aussi en être la cause.

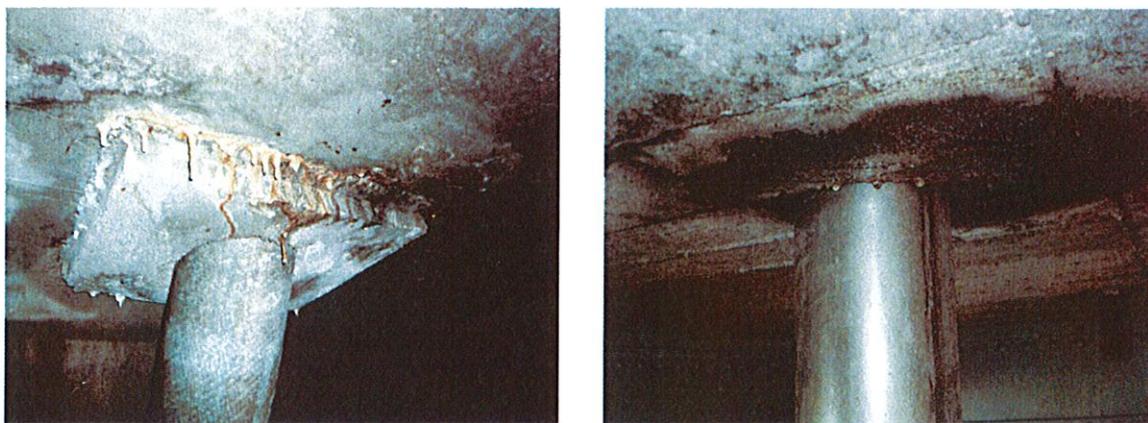


Figure 29. Défaut de continuité de l'étanchéité au droit du système d'évacuation

Il est important de vérifier que les drains mis en place dans la couche de roulement sont bien reliés au dispositif d'évacuation des eaux et que ce dernier dispose d'ouvertures au niveau de l'interface étanchéité/couche de roulement pour assurer cette fonction d'évacuation

(figure 30). Les conséquences de l'absence de jonction sont des venues d'eaux en surface et une désagrégation de l'enrobé.

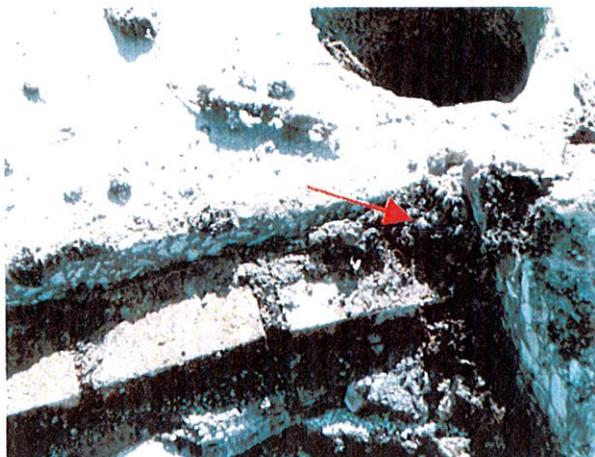


Figure 30. Drain mal positionné, obstrué et non raccordé à l'avaloir

Dans le cas de système d'évacuation « horizontal » vers des corniches caniveau, le traitement de la jonction entre l'étanchéité courante, le relevé d'étanchéité et le dispositif d'évacuation est important. Tout défaut à ce niveau provoquera des venues d'eaux sous l'étanchéité et sous l'avaloir.

1.2.3 Défaut d'étanchéité contigu aux joints de chaussée

Il s'agit en général d'un défaut de fermeture entre l'étanchéité de l'ouvrage et le joint de chaussée ainsi que d'un défaut de drainage de cette zone au point bas.

Les défaillances peuvent également avoir pour origine des reprises d'enrobé mal exécutées, une défaillance du drain ou de son exutoire qui provoque des remontées d'eau en surface (figure 31), des interventions sur le joint de chaussée sans avoir pris en considération la jonction (pour de faux prétextes de délais, de conditions de chantier, etc.) ou être la conséquence de mauvaises dispositions constructives.



Figure 31. Remontée d'eau en surface au droit d'un joint de chaussée

1.2.4 Défaut d'étanchéité des joints de chaussée et de trottoirs

Il s'agit ici non pas de l'étanchéité de l'ouvrage mais de l'étanchéité du joint et ceci doit être vu en fonction du type de produit, de sa conception, notamment au niveau de l'étanchéité.

Cet aspect sort donc du domaine du présent guide, mais peut être nécessaire au diagnostic et doit alors faire l'objet d'une analyse par un spécialiste « joint de chaussée » (2) et (2bis).

En effet, l'étanchéité d'un joint est une exigence de base dans les avis techniques (et dans le futur marquage CE en cours de préparation). Pour aboutir à cet objectif, diverses techniques sont mises en œuvre : joint étanche par lui-même, dispositif de recueil des eaux en dessous du joint, etc.

Souvent, les défaillances d'étanchéité ne sont pas intrinsèques au joint en section courante mais peuvent provenir de défaut ponctuel en un point singulier de ce joint (relevé par exemple). On observe, aussi, des défauts d'étanchéité qui peuvent provenir d'un défaut de fonctionnement de la structure : ouverture excessive du joint par déplacement de l'ouvrage sur ses appuis, par ex.

C'est pourquoi, une fois l'observation du défaut d'étanchéité sous le joint effectuée, il convient de consulter le dossier d'ouvrage et d'examiner le type de joint en place et l'ensemble de ses caractéristiques (par exemple en consultant les avis techniques du Sétra (3)) afin d'essayer de préciser l'origine de ce défaut.

On peut citer, à titre d'exemple, les cas de figures suivants :

- le joint de chaussée d'un modèle ancien n'est pas étanche ou le dispositif de recueil des eaux sous le joint a été omis. Le remplacement du produit en place par un joint étanche ou la mise en place du dispositif de recueil des eaux s'impose ;
- rupture du dispositif d'étanchéité (profilé ou dispositif de recueil des eaux sous le joint) par le vieillissement, le percement ou la déchirure du matériau constitutif ou la destruction du joint ;
- défaut consécutif à une mise en œuvre du profilé d'étanchéité en plusieurs tronçons sans jonction (ce qui est prohibé par les avis techniques). Il faut procéder au remplacement du profilé en un seul tronçon sans coupure ;
- réglage du souffle inadapté ayant pour conséquence une ouverture excessive avec décompression du profilé ;
- mauvais étanchement entre les éléments (profilés) constitutifs du joint ;
- défaut d'entretien du dispositif de recueil des eaux qui s'encrasse ou s'use (poids des gravats, déchirure par fatigue au droit des points d'attache par exemple ou par frottement dû au battement sous trafic, rupture des pièces de fixation, etc.).

Nota : S'assurer que, dans le cas d'un dispositif de recueil des eaux sous le joint, l'évacuation est correctement effectuée.

Au niveau des joints de trottoir, la problématique est nettement plus complexe car, souvent, on confond joint de surface et joint de structure sous le trottoir. Le premier, le plus souvent mis en œuvre par le poseur du joint de chaussée par dessus, n'a pas une fonction d'étanchéité puisqu'il est au niveau du revêtement de trottoir qui n'est pas supposé être le niveau étanche de la structure. C'est au niveau de la structure et de la chape d'étanchéité sous trottoir que le second joint devrait être étanche. Il faut bien convenir que le traitement de cette zone est souvent délaissé et/ou négligé, souvent par manque de concertation entre les intervenants (figure 32). Or, c'est à ce point particulier que l'eau peut passer après avoir circulé sur l'étanchéité sous trottoir.

➤ Les défauts de joints de chaussée et de trottoir peuvent avoir des conséquences non négligeables comme, par exemple :

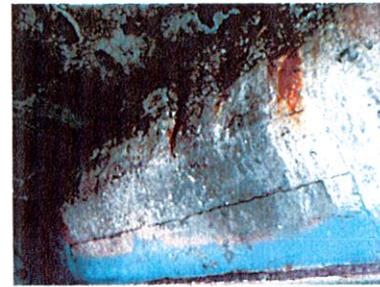
- la dégradation des capots et des ancrages des câbles de précontrainte (figure 33a) ;
- la dégradation du béton armé (corrosion des aciers, éclatements du béton) (figure 33b) ;
- la corrosion des éléments de structures métalliques ;
- le vieillissement accéléré des appareils d'appui ;
- la dégradation des sommiers des culées qui ne sont pas étanchés des coulures inesthétiques sur les murs de culées.



Figure 32. Joint de trottoir, absence du joint de surface et du joint de structure



a) Ruissellement sur un capot d'ancrage de précontrainte en l'absence de cachetage de protection



b) Dégradation du béton armé sous un joint de chaussée défectueux

Figure 33. Conséquences d'un défaut de joint de chaussée ou de trottoir

Les conséquences sont d'autant plus graves que les parties de structures concernées sont situées dans des zones difficilement accessibles.

1.2.5 Défaut au droit des autres points singuliers

1.2.5.1 Les corniches préfabriquées

Il est courant de constater des fuites entre les éléments préfabriqués de corniches (4). Elles ont généralement pour origine une absence ou une mauvaise qualité des joints entre éléments. Ces défauts ont pour conséquence des ruissellements d'eau sur les parements de la structure sous-jacente (figure 34) qui ne comportent pas d'étanchéité. Ceci est particulièrement problématique lorsque les poutres de rive sont situées à proximité immédiate (exemple : parties latérales de poutres précontraintes par prétension).



Figure 34. Fuites entre éléments préfabriqués de corniches

Dans un premier temps, il ne s'agit que de désagréments esthétiques mais à terme ces ruissellements peuvent conduire à une altération du béton armé (corrosion des aciers, éclatements du béton) et éventuellement dans certains cas à une dégradation des éventuelles armatures de précontrainte transversale présentes dans les encorbellements.

1.2.5.2 Les corniches-caniveau

Certaines corniche-caniveaux (4) ont été et sont encore réalisées en béton armé. Certaines sont conçues sans étanchéité, ce qui n'est pas recommandé. Lorsqu'une étanchéité est prévue, la complexité de la zone à traiter rend difficile la mise en œuvre de certains types de produits (par exemple à base de feuille préfabriquée). Il est ainsi courant de constater la mauvaise tenue des systèmes mis en œuvre (décollement par exemple) entraînant un défaut d'étanchéité et par conséquent un défaut de protection du béton.

À terme, cette défaillance peut entraîner la corrosion des aciers, l'éclatement du béton et la chute de morceaux de béton ou de corniches.

Si la corrosion atteint les armatures de liaison de la corniche à la structure, elle peut provoquer la rupture de celle-ci et la chute d'éléments de corniche sur la voie inférieure, et donc la mise en danger des usagers de la route (figure 35).



Figure 35. Chute d'un élément de corniche-caniveau

1.2.5.3 L'absence de larmiers

Le larmier est un élément essentiel de l'assainissement de l'ouvrage. En l'absence de larmiers (figure 36), les eaux de pluie et de ruissellement cheminent en sous-face d'encorbellements et coulent sur l'intrados des tabliers. Il est par exemple rare de trouver des larmiers sur les bords latéraux des encorbellements (notamment au droit des TPC) et en abuts de tabliers alors qu'il existe souvent des ruissellements d'eau à ces endroits. Il est important de noter que, même en présence de corniche, les infiltrations d'eau sont possibles (joints entre éléments de corniche, absence ou défaut d'étanchéité à la jonction corniche / contre-corniche).



Figure 36. Absence de larmiers, ruissellement le long du parement

Dans un premier temps, les conséquences de ces défauts ne sont qu'esthétiques (humidité, efflorescences, coulures, etc.), mais à terme, les ruissellements d'eau sur le parement peuvent conduire à une altération du béton de la structure (corrosion des aciers, éclatements du béton). Le phénomène de dégradation est accéléré en présence d'eau chargée en sels de déverglaçage et de cycle de gel / dégel.

1.2.5.4 Les trappes d'accès

Il peut s'agir par exemple de regards d'accès à des emplacements de minage destinés à recevoir des charges explosives ou de trappes d'accès à l'intérieur de caissons. Ces dispositifs sont souvent à l'origine de défauts d'étanchéité. En effet, ils constituent des chemins de passages préférentiels pour la pénétration de l'eau dans les tabliers : défaut d'étanchéité autour des plaques qui recouvrent les regards ou au niveau du raccord avec l'étanchéité générale. D'une manière générale, le raccordement entre ces éléments et l'étanchéité du tablier est trop souvent négligé (figure 37a). L'eau réussit donc souvent à s'infiltrer dans ces zones. Les conséquences ne sont qu'esthétiques dans un premier temps, mais peuvent conduire à terme à des désordres majeurs de la structure (figures 37b et 37c).



a) Infiltration d'eau en intrados de tablier



b) Ruissellement le long de l'âme d'une poutre



c) Corrosion des fils de précontrainte

Figure 37. Exemples de défauts d'étanchéité au droit d'une trappe d'accès

1.3 Autres défauts d'étanchéité

1.3.1 Les ancrages traversant la chape

Il existe des équipements (barrières de sécurité, panneaux de signalisation, candélabres, etc.) qui sont fixés à la structure par l'intermédiaire de tiges d'ancrages scellées dans le béton ou traversant la dalle. Le raccordement à l'étanchéité de ces fixations doit être réalisé de telle sorte que l'eau ne puisse passer sous la chape d'étanchéité et nuire ainsi à son efficacité.

En général, les infiltrations ont pour origine des mauvaises dispositions constructives ou des défauts de mise en œuvre. Le traitement de l'étanchéité au niveau de ces points singuliers est en effet délicat et parfois négligé. Il nécessite notamment l'intervention de l'étancheur après la mise en place des dispositifs d'ancrage et entraîne donc le plus souvent une coactivité défavorable à une bonne qualité d'exécution.

Les conséquences de tels défauts concernent aussi bien l'efficacité de la chape d'étanchéité que l'intégrité et la pérennité des dispositifs de fixation des équipements concernés (corrosion des pièces métalliques les constituant).

La corrosion peut entraîner la rupture des tiges filetées. Il y a donc un risque vis-à-vis de la sécurité des usagers.

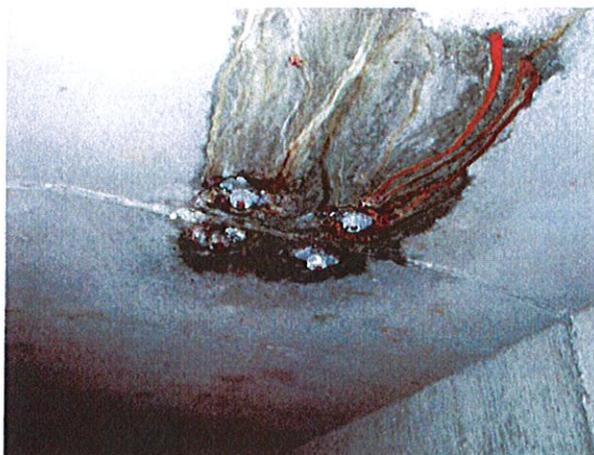


Figure 38. Déficit d'étanchéité au droit d'un ancrage traversant la chape

1.3.2 La jonction corniche béton – contre-corniche

La fissuration liée à la reprise de bétonnage entre les éléments de corniche et la contre-corniche (retrait) tend à s'amplifier dans le temps et favorise la pénétration des eaux chargées en sel de déverglaçage. L'eau finit par ruisseler sur les parements des tabliers. Le risque majeur est bien évidemment la corrosion des aciers de fixation des éléments de corniche sur le tablier pouvant entraîner leur chute.

La mise en œuvre d'un revêtement ou l'injection de la fissure permet de traiter ce risque.

1.4 Les défauts des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux

Le rôle de l'étanchéité est de protéger le tablier contre les infiltrations d'eau. L'étanchéité joue le rôle d'une barrière retenant l'eau en partie supérieure de tablier et sous la couche de roulement. Le système d'étanchéité ne peut donc se concevoir sans un dispositif permettant de récupérer cette eau et de la rejeter en dehors de l'ouvrage, en utilisant des drains (5, 6) et en respectant la législation relative aux rejets des eaux dans le milieu environnant.

Les dysfonctionnements de ce dispositif au même titre que les défauts d'étanchéité sont très souvent à l'origine d'une dégradation prématurée de l'ouvrage.

Par exemple, la stagnation d'eau sur les tabliers favorise la dégradation de la couche de roulement et le développement de la végétation dans les zones non circulées, outre les risques pour les usagers. À terme, la chape d'étanchéité peut être altérée, d'où l'intérêt d'évacuer l'eau rapidement.

De même, les défauts d'évacuation des eaux sous les tabliers (gargouille affleurant le béton de l'intrados, absence de dispositif permettant d'évacuer l'eau présente sur les sommiers de culée, etc.) peuvent entraîner des ruissellements sur les parties verticales de la structure et les âmes des ponts-caisson. À terme, la corrosion des aciers et les éclatements du béton sont à craindre.

2. L'étanchéité, à l'interface entre le tablier et la couche de roulement

On l'oublie souvent mais la chape d'étanchéité, hormis son rôle de protection contre les venues d'eau, constitue également le support de la couche de roulement. Elle doit notamment supporter les contraintes liées au trafic transmises par la couche de roulement.

Dans le cadre de cette fonction, les chapes d'étanchéité sur les ouvrages en service sont ainsi susceptibles de présenter des défaillances qui peuvent provoquer et/ou favoriser la dégradation de la couche de roulement. Concernant le confort et la sécurité des usagers de la route, il s'agit d'un enjeu qu'il convient de ne pas négliger.

Les principaux types de dégradations affectant la couche de roulement et provenant *a priori* d'un mauvais comportement des chapes d'étanchéité sont présentés dans les paragraphes suivants.

2.1 Rappel sur le comportement et les dégradations des couches de roulement

Une couche de roulement sur un pont est mise en œuvre dans des conditions particulières et subit des contraintes en service différentes de celles en section courante. Il est intéressant de rappeler ces données particulières, car elles vont expliquer certains phénomènes de comportement dans le temps, en service (7).

Une couche de roulement, que ce soit sur ouvrage ou en section courante, doit satisfaire, de manière durable, aux caractéristiques suivantes :

- a) présenter un bon uni ;
- b) offrir de bonnes caractéristiques antidérapantes, quelles que soient les conditions atmosphériques ;
- c) résister à la fatigue ;
- d) avoir une bonne résistance à l'orniérage ;
- e) résister au désenrobage ce qui suppose une faible perméabilité qui, *a priori*, est peu compatible avec de bonnes caractéristiques antidérapantes.

Sur un ouvrage d'art, les paramètres qui vont influencer sur la durabilité et le comportement des couches de roulement sont décrits ci-après.

2.1.1 Présence d'eau à l'interface étanchéité / chaussée

Les couches de roulement, quelle que soit leur nature, ne peuvent être considérées comme une surface étanche. Les eaux percolant dans la chaussée cheminent jusqu'à la

chape d'étanchéité et, contrairement à ce qui se passe en section courante, se trouvent alors arrêtées et ne s'éliminent que très difficilement et très lentement par cheminement à l'interface étanchéité/chaussée, en suivant les pentes.

La partie inférieure de la couche de roulement se trouve donc être fréquemment le siège d'une saturation en eau. Sous les pressions générées au passage des véhicules, cette eau va entraîner un désenrobage des granulats, accentué par les phénomènes de gel/dégel, d'où l'intérêt d'un bon drainage de cette zone.

2.1.2 Contraintes de traction

Certaines parties d'ouvrage, principalement les sections sur appui intermédiaire, sont le siège de contraintes de traction (en variation ou même en valeur absolue). Ces contraintes sont transmises, en partie au moins, aux couches de chaussée sus-jacentes où elles sont amplifiées avec leur épaisseur.

2.1.3 Souplesse des structures porteuses

Exploitant au mieux les matériaux, les structures sont devenues relativement souples et amortissent mal les vibrations (beaucoup moins que les structures de chaussée sur remblais), d'où une fatigue plus importante et plus rapide des couches de roulement dont les constituants résistent mal à la fatigue.

Comme les ouvrages sont de mauvais amortisseurs, il est également possible qu'une partie de l'énergie de compactage à la mise en œuvre soit absorbée par vibration de la structure, notamment dans le cas des ouvrages mixtes.

2.1.4 Liaison avec la chape d'étanchéité

La qualité de la liaison couche de roulement / étanchéité influe sur la qualité du compactage et donc la compacité des enrobés (7). Dans le cas d'ouvrages courbes, en pente ou situés sous un trafic lourd et canalisé, les revêtements transmettent à l'interface enrobé/étanchéité des sollicitations parfois importantes et, en cas de mauvaise liaison, un phénomène de glissement peut s'initier.

2.1.5 Gradients de température

Thermiquement moins bien isolés et de moindre inertie, les ponts subissent des gradients de températures beaucoup plus importants que les structures de chaussée en section courante. Il en découle des risques supplémentaires de rupture de la couche de roulement par retrait, ou de fluage par des températures élevées. Pour la même raison, les ponts constituent, d'une façon générale et plus particulièrement ceux franchissant des zones humides ou ventées, des zones préférentielles d'apparition de verglas, d'où l'intérêt de disposer d'un revêtement à bonne rugosité superficielle.

De même, cette plus faible inertie thermique des ouvrages par rapport aux sections adjacentes peut provoquer un refroidissement plus rapide des bétons bitumineux dès la mise en œuvre et donc une compacité plus difficile à obtenir.

La compacité des rives de chaussée est également plus délicate à obtenir à proximité de bordures, longrines et/ou dispositifs de retenue, etc. soit par difficulté d'accès soit par l'utilisation de matériels non adaptés.

Les points évoqués ci-dessus sont des explications plausibles aux constatations effectuées par divers laboratoires qui feraient apparaître une légère perte de compacité entre l'ouvrage et ses accès immédiats pour une formule de béton bitumineux et des conditions de mise en œuvre identiques.

2.1.6 Inversion des modules d'élasticité

Le module d'élasticité du béton du tablier est toujours supérieur au module d'élasticité du matériau constitutif de la couche de roulement ; ce dernier n'est d'ailleurs pas constant mais, en raison du caractère viscoélastique des matériaux bitumineux, il varie en fonction de la température et de la vitesse d'application de la charge. Cette « inversion de module », que l'on ne rencontre que très rarement en section courante (quand le matériau de base est une grave traitée), entraîne une concentration de contraintes, surtout de contraintes horizontales, en partie inférieure de la couche de roulement.

2.1.7 Épaisseurs

Sur les ouvrages, les épaisseurs des couches de roulement ont une incidence directe sur le dimensionnement de la structure porteuse. Cependant, ces épaisseurs ne peuvent pas être réduites sans prendre en compte les exigences liées à la tenue sous trafic, à la mise en œuvre et à la durabilité du complexe étanchéité / couche de roulement.

Pour ne pas surcharger la structure porteuse, on va, d'une part, chercher à limiter le poids des couches de roulement et par conséquent leur épaisseur, et d'autre part chercher à bénéficier de l'effet répartiteur de la couche de roulement dans le calcul de la résistance au poinçonnement, ce qui conduit à ne pas admettre, en général sur les hourdis minces, des épaisseurs trop faibles.

Par ailleurs, pour un bon comportement d'une chape d'étanchéité, notamment pour se prémunir contre la formation de gonfles, il est prévu une épaisseur minimale d'enrobé sur toute chape d'étanchéité qui est de 7 cm et de 5 cm sur les chapes épaisses avec des formulations adaptées (8). Dans le cas d'une application des enrobés en deux couches au-dessus des FPM, la première couche doit avoir une épaisseur minimale de 5 cm pour assurer le collage avec l'étanchéité. En outre, il est essentiel de réaliser les enrobés dans les délais les plus courts et de ne jamais laisser la chape ou cette première couche de chaussée sans protection en période de forte insolation.

Nota : La quantité de chaleur apportée par la mise en œuvre de l'enrobé est nécessaire à une bonne liaison entre une chape d'étanchéité à base de feuille préfabriquée bitumeuse (type FPM) et la couche de roulement.

Enfin, il y a le rechargement pour entretien ou pour prendre en compte les déformations différées. Ces rechargements sont, dans une certaine mesure, pris en compte dans les hypothèses de dimensionnement des éléments de structure mais il est fréquemment constaté des rechargements excessifs sur les ouvrages pouvant conduire, entre autres, au contournement par l'eau des relevés d'étanchéité (figure 39).

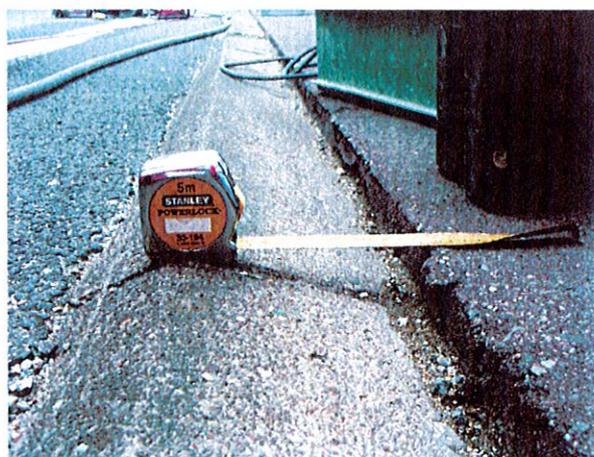


Figure 39. Rechargement excessif de la couche de roulement, risque de contournement du relevé d'étanchéité par l'eau

Ces contraintes révèlent que l'épaisseur de l'enrobé sur une chape est un savant compromis et que divers cas de figure sont possibles en fonction du contexte.

2.1.8 Tolérances d'exécution des ouvrages

Les cotes théoriques des extrados ne sont respectées par les constructeurs qu'avec une imprécision parfois de plusieurs centimètres. Lorsque celle-ci se conjugue avec la nécessité d'assurer à la surface de la couche de roulement un uni compatible avec le profil en travers de la chaussée, il en résulte que l'épaisseur réelle de cette couche varie fortement et est, en général, différente de celle prévue au projet. Ceci explique que l'on trouve une compacité hétérogène des enrobés de la couche de roulement. Ceci se retrouve également en cas de compensation locale de défauts géométriques de l'extrados du tablier, par exemple sur les ouvrages mixtes bipoutre ou de type PRAD ou VIPP, ou de défauts de surface, par exemple en présence de reprofilage.

2.1.9 Synthèse

Il résulte des différentes circonstances et conditions évoquées une aggravation des risques de dégradation par :

a) accumulation de déformations permanentes dans la couche de roulement : orniérage, fluage, glissement... notamment pour les ouvrages :

- soumis à des températures ambiantes extrêmes ;
- supportant une importante circulation de poids lourds ;
- sur lesquels se produisent des arrêts, freinages et démarrages fréquents de véhicules, notamment des poids lourds ;
- urbains dans le cas où les voies étant très étroites (< 3 m), le trafic y est canalisé (voies réservées aux autobus par exemple) ;
- présentant des dévers importants ou de très fortes pentes ;
- à plus de deux voies par sens de circulation, à très fort trafic et pour lesquels les voies de droite ne reçoivent guère qu'un trafic continu de poids lourds ;

b) désenrobage de la couche de roulement.

2.2 Principales dégradations de la couche de roulement dues à la défaillance des chapes d'étanchéité

La couche de roulement évolue et se dégrade essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent peuvent être liés à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre ou à un mauvais comportement de leur support.

Les dégradations rencontrées sur les couches de roulement d'ouvrages d'art peuvent ainsi se classer en deux catégories :

- les dégradations « structurelles » qui prennent naissance au sein du support de la couche de roulement (et qui peuvent notamment avoir pour origine une défaillance de l'étanchéité) ;
- les dégradations « superficielles » qui prennent naissance au sein même de la couche de roulement.

Pour les dégradations dites « superficielles » on se reportera à la méthode d'essais LPC n° 52 (9). À noter que la terminologie utilisée dans la suite de ce paragraphe est conforme à celle de ce document de référence.

Les dégradations « structurelles » de la couche de roulement d'un ouvrage d'art ayant pour origine une défaillance de la chape d'étanchéité peuvent se manifester sous quatre formes principales : les déformations, les fissures, les arrachements et les remontées.

2.2.1 Les déformations

Ornière à petit rayon : déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est inférieure à 80 cm. Elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement.

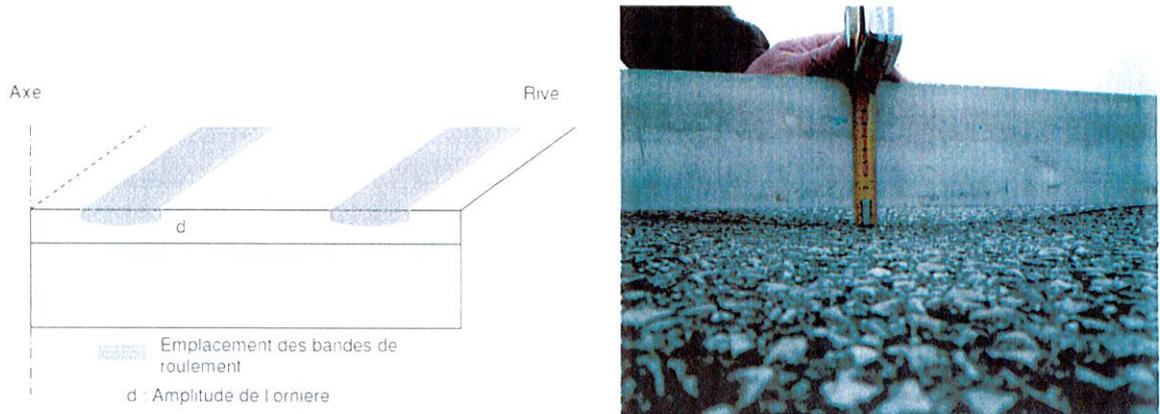


Figure 40. Ornière à petit rayon ; schéma de principe et mesure à la règle de l'ornière au droit de la bande de roulement

Affaissement : enfoncement ponctuel, prononcé, le plus souvent localisé dans l'une ou les deux bandes de roulement. L'affaissement prend le nom de « flache » lorsqu'il a une forme circulaire.

54

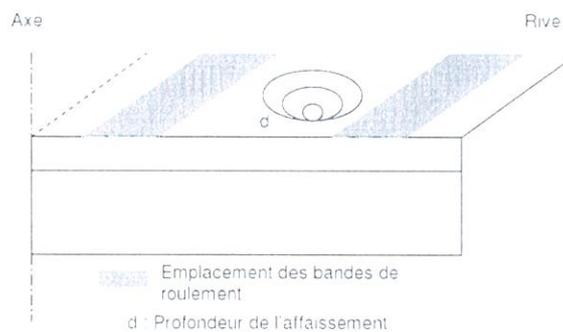


Figure 41. Affaissement

Gonfle : soulèvement ponctuel, le plus souvent circulaire, de la chaussée.

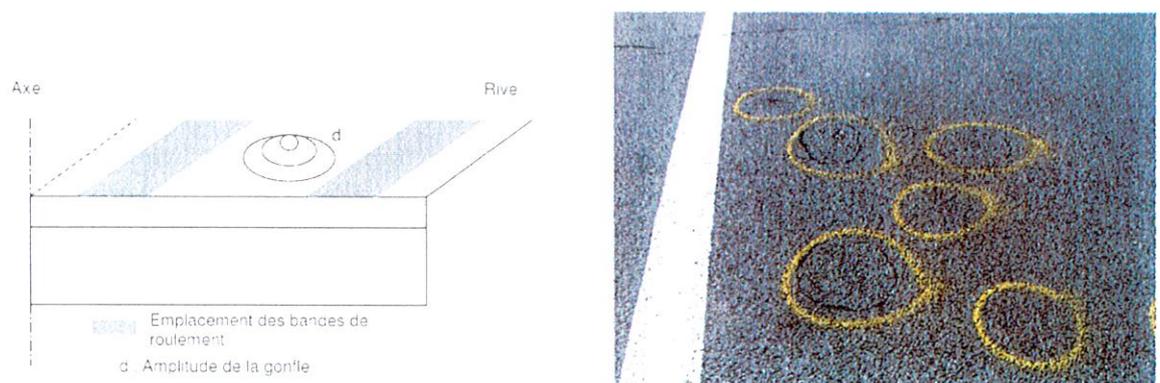


Figure 42. Gonfle

Bourrelet transversal : renflement linéaire apparaissant de manière sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

Tôle ondulée : ondulation régulière et rapprochée perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

2.2.2 Les fissures

Une fissure est une ligne de rupture qui apparaît à la surface de la chaussée.

Fissures transversales : fissures sensiblement perpendiculaires à l'axe de la chaussée, rectilignes ou en arc de cercle au droit des bandes de roulement.

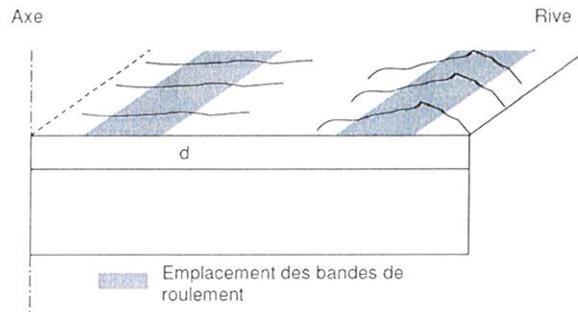


Figure 43. Fissures transversales

Faiénçage étendu : ensemble de fissures entrelacées ou maillées (mailles fines inférieures à 30 cm) formant une série de polygones. Ce faiénçage peut être localisé dans les bandes de roulement.

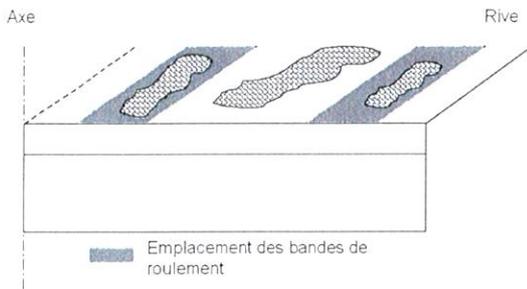


Figure 44. Faiénçage étendu

Faiénçage circulaire : ensemble de fissures entrelacées ou maillées (mailles fines inférieures à 30 cm) formant une série de polygones apparaissant ponctuellement et affectant une zone de forme sensiblement circulaire dont le diamètre est généralement inférieur à 1 m.

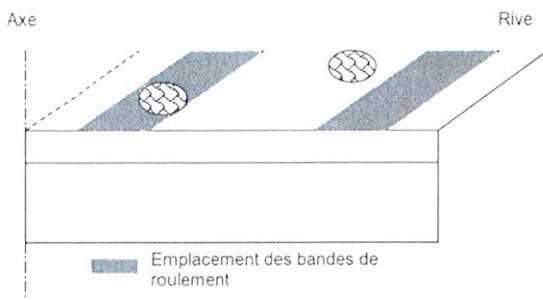


Figure 45. Faiénçage circulaire

2.2.3 Les arrachements

Nid-de-poule : cavité sensiblement circulaire créée dans la couche de roulement par départ de matériaux.



Figure 46. Nid-de-poule

Désenrobage : action de l'eau stagnante par défaut de drainage de la couche de roulement (défaut souvent observé aux abords des joints de chaussée). À terme, évolue vers une dégradation de type « nid-de-poule ».

2.2.4 Les remontées

On peut observer :

a) des remontées de bitume : ressuage/percolation du liant qui enrobe les matériaux constitutifs de la chaussée (figure 47). Elles se manifestent dans ce cas par des plaques noires en surface particulièrement glissantes. Elles se produisent sous l'effet du roulage combiné avec de fortes chaleurs et ont pour origine une formulation inadaptée de l'enrobé. Ces remontées de bitume peuvent également provenir de la chape d'étanchéité elle-même (cas des chapes asphalte notamment).

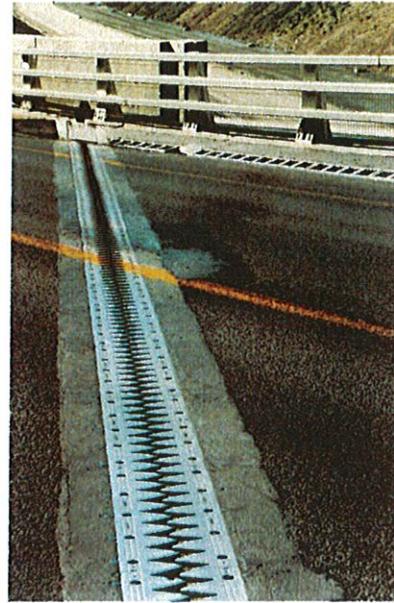


Figure 47. Remontée de bitume

b) des remontées d'eau : en général, il s'agit d'un défaut de drainage de la couche de roulement (figure 48b). Mais dans certains cas particuliers, il peut s'agir d'eau piégée sous la chape d'étanchéité et s'échappant par des perforations de cette dernière (figure 48a). Ces remontées peuvent être chargées en liant hydraulique ou en fines pouvant provenir du support béton sous-jacent.



a) présence d'eau sous l'étanchéité



b) défaut de drainage à l'interface étanchéité / joint de chaussée

Figure 48. Remontées d'eau

2.3 Phénomènes à l'origine des dégradations structurelles de la couche de roulement

Seuls les phénomènes susceptibles d'être liés à une défaillance de la chape d'étanchéité ou de son support sont traités ici.

2.3.1 Les glissements

Ils se produisent principalement dans le sens longitudinal de l'ouvrage et se traduisent par des fissurations transversales rectilignes ou en arc de cercle au droit des passages de roues. Dans le cas d'une pente transversale ou d'une courbure en plan prononcée de l'ouvrage, le glissement peut également être orienté transversalement et se traduire par un orniérage sans fissuration.

En général, le phénomène de glissement apparaît lorsque localement le complexe « étanchéité / couche de roulement » n'a pas résisté aux contraintes tangentielles liées au trafic (freinage, force centrifuge dans les virages).

Le phénomène a pour origine une perte d'adhérence ou une adhérence insuffisante entre le support et la chape d'étanchéité (cas de chapes en semi-indépendance par exemple) ou entre la chape d'étanchéité et la couche de roulement. Cette dernière situation est plus souvent rencontrée dans le cas des chapes FMAS / SEL pour lesquelles la liaison nécessaire entre chape et couche de roulement est significativement plus difficile à obtenir que pour les autres types de chape. À noter que, très rarement, un feuilletage peut se produire entre deux couches de la chape FMAS / SEL.

Dans le cas de chapes bitumineuses de type FPM, FPA, asphalte, l'adhésion avec la couche de roulement est bonne en général et la pathologie n'a alors pour origine que des erreurs de mise en œuvre :

- application d'une couche d'accrochage entre l'étanchéité et l'enrobé alors qu'il n'en faut pas (hormis le cas particulier des FMAS/SEL) ;
- chape poussiéreuse ou humide ;

- défaut de collage dû à un apport de chaleur insuffisant (épaisseur d'enrobé trop faible ou température d'enrobé insuffisante).

Pour les chapes FMAS/SEL, la mauvaise liaison avec la couche de roulement est généralement liée aux conditions de réalisation de la couche superficielle gravillonnée non conforme aux recommandations de l'avis technique correspondant.

Remarque :

Des dégradations peuvent être constatées en amont des joints de chaussée pour lesquels le drain transversal (à l'amont du joint) ne fonctionne pas correctement. Ce dysfonctionnement peut entraîner la formation d'un film d'eau entre la chape et la couche de roulement à l'origine d'un phénomène de glissement (voir chapitre 2, § 2.1.1).

2.3.2 Les gonflements

Ce phénomène affecte tous les types de chapes bitumineuses en adhérence totale au support et à un degré moindre les chapes en semi-indépendance. Le phénomène est particulièrement fréquent sur les ouvrages neufs si la chape subit de fortes chaleurs et un ensoleillement pendant plusieurs jours. L'intérêt de réaliser la couche de roulement dans les plus brefs délais n'est plus à démontrer (à défaut de mise en œuvre d'une protection temporaire).

Le gonflement est provoqué par un dégagement de vapeur d'eau provenant du support béton (figure 49) ou parfois par un dégazage tardif du solvant présent dans le vernis d'imprégnation (séchage insuffisant). C'est un phénomène complexe et mal maîtrisé, généralement accentué dans certaines conditions : béton jeune, forte humidité du support, forte porosité, rugosité, bullages/cavités superficielles du support, excès de couche d'imprégnation, mauvais séchage de la couche d'imprégnation, mauvaise adhésion de la chape au support, etc. Le phénomène est aggravé en cas d'épaisseur insuffisante de la couche de roulement (10).

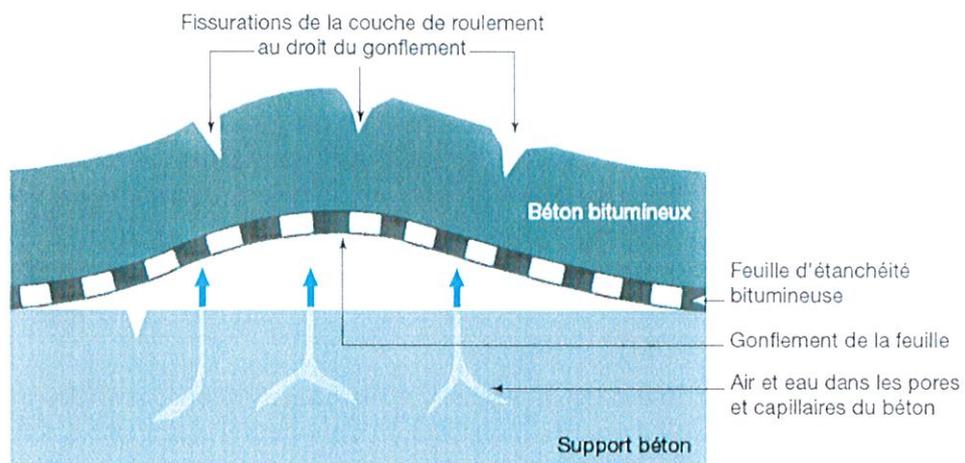


Figure 49. Processus de formation d'une gonfle

Le phénomène peut se produire dans les jours suivant la réalisation de la chape d'étanchéité ou lors de la réalisation de la couche de roulement, voire même l'été suivant la réalisation de celle-ci. Le phénomène est généralement cyclique et atteint son apogée en fin d'après-midi chaud et ensoleillé. Le gonflement peut alors atteindre plusieurs dizaines de centimètres en plan.

Le gonflement induit des contraintes de traction dans la couche de roulement. Il est néfaste au bon fonctionnement et à la tenue de celle-ci. Sous l'effet du trafic elle se fissure (fissuration circulaire ou en étoile) et dans certains cas, le phénomène donne naissance à la

formation de nids-de-poule. On arrive alors rapidement à la ruine locale de la couche de roulement et de l'étanchéité.

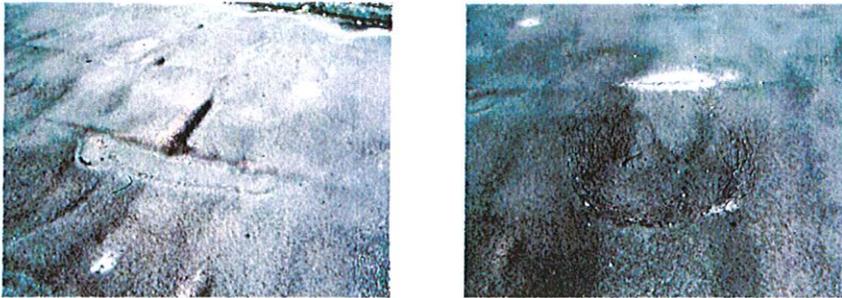


Figure 50. Exemples de gonfles

À noter que des dégradations à tendance circulaire par fissuration évoluant jusqu'au nid-de-poule peuvent également avoir pour origine un effondrement du complexe « étanchéité / couche de roulement » provoqué par une dégradation du support constitué d'un renformis ou d'un reprofilage situé entre le support béton et la chape (11).

Le phénomène de gonflement est particulièrement gênant pour la sécurité des usagers et l'exploitation de l'ouvrage. Il nécessite des réparations locales immédiates. S'il est généralisé, il peut conduire à la réfection complète du complexe « étanchéité / couche de roulement » sur tout ou partie de l'ouvrage.

2.3.3 Fluage, orniérage

Ce phénomène se rencontre principalement avec les FPA et les chapes épaisses en asphalte si leur consistance aux températures de service en été est insuffisante (la température à l'interface entre la chape et la couche de roulement peut aisément atteindre, voire dépasser 40 °C) (12, 13, 14). Cette caractéristique de consistance s'exprime dans les spécifications de produit par la valeur mesurée à l'essai d'indentation. Cette propriété a une grande importance sur le plan fonctionnel et doit avoir fait l'objet d'une attention particulière dans le cadre des contrôles effectués lors de la mise en œuvre de la chape (figure 51).

Ce phénomène se traduit le plus souvent par un orniérage (chapitre 2 § 2.2.1). L'amplitude de l'orniérage peut être accentuée par des surépaisseurs d'asphalte et ce d'autant plus que celui-ci aura une consistance plus molle. À l'inverse, l'amplitude peut être réduite lorsque l'épaisseur de la couche de roulement est plus élevée que la normale (effet de protection thermique). Dans certains cas, l'orniérage est accompagné d'un réseau de fissures longitudinales (figure 52).



Figure 51. Fluage de l'asphalte



Figure 52. Orniérage accompagné d'un réseau de fissures longitudinales dans la couche de roulement

Le plus souvent, le phénomène est la conséquence de la concomitance de plusieurs causes : indentation trop forte de l'asphalte, surépaisseur de la couche d'asphalte, sous-épaisseur de la couche de roulement, trafic poids lourds canalisé, etc.

Ce phénomène peut également avoir pour origine un défaut de formulation, de compactage ou de désenrobage des granulats (dû à la présence d'eau) dans le cas d'une étanchéité de type MHC par exemple.

Remarque : l'orniérage peut également être dû à une anomalie de la couche de roulement (propriété intrinsèque du béton bitumineux). Il peut en outre prendre naissance au niveau d'un éventuel renformis ou reprofilage sous la chape d'étanchéité (11).

2.3.4 L'altération du support de la chape d'étanchéité

Des dégradations observables sur la couche de roulement peuvent avoir pour origine une altération des couches sous-jacentes à l'étanchéité.

Cette altération peut concerner :

- › l'extrados du tablier en béton : délaminations, désagrégation, éclatements dus à la corrosion ou à une pathologie spécifique (réaction de gonflement interne par exemple) ;
- › la couche de reprofilage éventuelle (à base de produits bitumineux) : fluage, défaut de compactage, désenrobage des granulats (dû à la présence d'eau), formulation inadaptée, etc. ;
- › le renformis en béton ou la contre-chape éventuelle : décollements, délaminations, éclatements, etc.

Dans la plupart des cas, cette altération (qui peut être initiée ou favorisée par une circulation d'eau sous la chape d'étanchéité) se traduit par un défaut de portance de la couche de roulement qui à terme entraîne sa dégradation se manifestant par des affaissements, de l'orniérage, des zones de faïençage, des fissures circulaires ou en étoile ou des nids-de-poule. Ces dégradations sont le plus souvent d'abord visibles sur les bandes de roulement.

2.4 Synthèse

Parmi l'ensemble des dégradations évoquées dans les paragraphes précédents, il convient dans le cadre du diagnostic (chapitre 3) de distinguer celles qui résultent d'un désordre intrinsèque à la couche de roulement de celles qui peuvent provenir de l'étanchéité sous-jacente ou signifier un grave problème de structure.

À ce titre, les tableaux de synthèse suivants apportent quelques éléments complémentaires qui peuvent être utiles :

Le tableau n° 6 précise, pour chaque dégradation observée sur la couche de roulement, la cause probable du phénomène quand la chape d'étanchéité ou son support peuvent en être à l'origine.

Le tableau n° 7 rappelle, à titre indicatif, les risques d'occurrence des pathologies en fonction des types de chapes. Ce tableau est donné à titre indicatif et il est rappelé que les anomalies constatées font généralement intervenir plusieurs causes selon un scénario pouvant être complexe, et ne peuvent donc être restreintes uniquement à la nature de la chape d'étanchéité.

Type de dégradation	Nature de la dégradation	Cause probable quand l'étanchéité ou le support sous-jacent peut en être à l'origine
Déformation	Ornière à petit rayon	Fluage de la chape d'étanchéité (FPA, chapes épaisses en asphalte / chapitre 2 § 2.3.3). Orniérage (MHC par exemple / chapitre 2 § 2.3.3). Sous-dimensionnement ou altération des couches sous-jacentes à l'étanchéité (éventuel reprofilage ou renformis / chapitre 2 § 2.3.4).
	Affaissement	Altération localisée des couches sous-jacentes (éventuel reprofilage ou renformis, support en béton / chapitre 2 § 2.3.4)**
	Gonfle	Phénomènes de gonflement de la chape d'étanchéité / chapitre 2 § 2.3.2).
	Bourrelet transversal	Fréquemment le résultat d'un glissement de la couche de roulement sur l'étanchéité. Il peut s'agir également d'un glissement de la chape d'étanchéité sur son support / chapitre 2 § 2.3.1). Il peut apparaître quand ce glissement de la chaussée vient en butée sur un élément fixe (effet de la pente, zone de freinage, etc.). Ce bourrelet peut aussi être consécutif à une étanchéité asphalte comportant un excès de mastic ou dont la première couche est en surépaisseur.
	Tôle ondulée	Action mécanique des véhicules (voir bourrelet transversal). Cas d'une étanchéité par feuilles préfabriquées posées transversalement au sens du trafic.
Fissure	Fissure transversale	Phénomène de glissement (chapitre 2 § 2.3.1). Mouvement/déformation du tablier ** Absence ou mauvais fonctionnement du joint de dilatation du tablier (joint sous revêtement ou de type à revêtement amélioré).
	Faiénçage étendu	Fluage de la chape d'étanchéité (FPA, chapes épaisses en asphalte / chapitre 2 § 2.3.3). Sous-dimensionnement ou altération des couches sous-jacentes (éventuel reprofilage ou renformis / chapitre 2 § 2.3.4).
	Faiénçage circulaire ou fissure circulaire ou en étoile	Phénomène de gonflement de la chape d'étanchéité entraînant une altération par fatigue de la couche de roulement (chapitre 2 § 2.3.2) Sous-dimensionnement ou altération localisée des couches sous-jacentes (éventuel reprofilage ou renformis, support en béton / chapitre 2 § 2.3.4)**.
Arrachement	Désenrobage	Action de l'eau stagnant par défaut de drainage de la couche de roulement (défaut souvent observé aux abords des joints de chaussée).
	Nid de poule	Action de l'eau stagnant par défaut de drainage de la couche de roulement (voir « désenrobage »). Évolution d'une dégradation de type « faiénçage circulaire ». Ce type de défaut est souvent la conséquence d'une gonfle.
Remontée	Eau	Défaut de drainage de la couche de roulement.
	Liant	Remontée du liant de la couche d'étanchéité ou du support sous-jacent.

Tableau 6. Tableau résumant les causes probables des désordres en liaison avec l'étanchéité ou son support

** S'il est généralisé ou de grande ampleur, le phénomène peut avoir pour origine une déformation globale du tablier ou une altération majeure du tablier en béton. Dans ce cas une observation de l'alignement et du nivellement des équipements (garde-corps par exemple) doit être conduite. Une visite de l'intrados du tablier s'impose.

Nature de la pathologie	Chape asphalte		Chape en feuille				FMAS/SEL	MHC
	Bicouche épais 8+22	Monocouche sur bouches-pores	Feuille préfabriquée monocouche (FPM)	Sur bouches-pores	Semi-indépendance	Avec protection asphalte (FPA)		
Glissement	+	0/+	0	0/+	+	0	++	0
Gonflement	+	+	++	+	+	++	0	0
Fluage, orniérage	++	++	0	0	+ à ++ (1)	++	0 (2)	+
Circulation d'eau à l'interface entre chape et support béton (3)	++	0/+ (4)	0/+ (4)	0/+ (4)	++	0/+ (4)	0	+
Remontée de liant de l'étanchéité	+	+	0	0	0	+	0	++

Tableau 7. Tableau résumant les risques d'occurrence des pathologies en fonction des types de chapes

Rappel : en pratique les anomalies constatées font généralement intervenir plusieurs causes selon un scénario pouvant être complexe, et ne peuvent être restreintes à la nature de la chape d'étanchéité.

0 pas (ou peu) de risque

+ risque avéré

++ risque important

(1) Fonction de la nature de la couche de protection (asphalte ou béton bitumineux)

(2) Ne sont pas pris en compte les éventuels glissements transversaux

(3) En cas de perte d'étanchéité de la chape -- La circulation d'eau sous l'étanchéité peut être favorisée en cas de couche de reprofilage

(4) A priori nul mais cotation 0/+ pour les différencier du cas (FMAS/SEL) ou la cotation ne peut être que 0

3. Bibliographie

[1] Demars P. et Dondonne E., « *Dégradation des dalles de tablier de ponts en Belgique. Étude d'une pathologie complexe* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 232, mai / juin, 2001, pp. 73 à 83.

[2] « *Joints de chaussée des ponts route* », collection Guide technique, Sétra, référence F8737, juillet 86, révision prévue fin 2011, téléchargeable sur le site du Sétra.

[2bis] « *Le contrôle des travaux de joints de chaussée et de trottoirs sur ouvrages neufs et en réparation* », collection Guide technique, LCPC, référence JOINCH, juin 2006.

[3] Avis Techniques « *Joints de chaussée des ponts-routes* », Sétra, en cours de validité.

[4] « *Inspection, diagnostic et réparation des corniches en béton armé* », collection Guide technique, Ifsttar, 2011 (à paraître).

[5] « *Assainissement des ponts-routes - Évacuation des eaux, perrés, drainage, corniches-caniveaux... Généralités, descriptions, dispositions constructives et règles de dimensionnement* », collection Guide technique, Sétra, référence F8940, juin 1989.

- [6] « *Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'art - Thème : Protection contre l'eau* », catalogue de fiches destinées à contribuer à une amélioration de la conception des ouvrages d'art, collection Guide technique, Sétra / LCPC, référence F9817, décembre 98.
- [7] STER 81, « *Surfaçage, étanchéité et couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art* », collection Guide technique, Sétra, référence F8210, juillet 1981, et les guides antérieurs de 1966, de la mise à jour de 1967 et de 1974.
- [8] Avis techniques, « *Étanchéité des ponts-routes avec support en béton ou en tôle d'acier* », Sétra, en cours de validité, téléchargeable sur le site du Sétra.
- [9] « *Catalogue des dégradations de surface des chaussées* », collection Techniques et méthodes des LPC, méthode d'essai LPC n° 52, complément à la méthode d'essai n° 38-2, LCPC, référence 502 376, mars 1998.
- [10] Benneton J.-P. et Fragnet M., « *Chapes d'étanchéité de pont : Point sur les problèmes de gonflement des chapes d'étanchéité et les procédés bouche-pores* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 240, pp 95-99.
- [11] « *Entretien des complexes d'étanchéité /couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis* », collection Guide technique, LCPC, référence LCPC n° C1502448 RENFORMIS, août 2006.
- [12] Mme Bicheron Lefèvre G., « *Constatations concernant une chape d'étanchéité de pont* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 40 de septembre-octobre 1969, dans le BLPC n° 40.
- [13] Mme Bicheron Lefèvre G., « *Chapes d'étanchéité en brai époxy* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 47, 1968.
- [14] Sors M. et Nury J.-C., « *Résultats d'un an de relevés thermométriques au niveau d'une chape d'étanchéité* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 63 de janvier-février 1973.

CHAPITRE 3

AIDE AU DIAGNOSTIC SUR L'ÉTAT ET L'EFFICACITÉ DES CHAPES D'ÉTANCHÉITÉ



1. Introduction

1.1 Généralités

La connaissance de l'état de la chape est nécessaire pour apprécier son degré de vieillissement et son aptitude à assurer ses fonctions.

La difficulté de l'appréciation du bon état et du bon fonctionnement d'une chape d'étanchéité résulte de son positionnement entre deux parties distinctes : le tablier et la couche de roulement et que son examen direct n'est pratiquement jamais possible (sauf en quelques points particuliers comme sous les trottoirs « caniveaux » ou certains relevés).

Malgré cette difficulté, on dispose heureusement d'un certain nombre de moyens pour être renseigné sur la chape, son existence et son état. Ces moyens sont visuels en passant par l'examen direct de la couche de roulement, par des visites de l'intrados du tablier et font parfois appel à des moyens d'investigations spécifiques.

L'étape de diagnostic (et donc la mise en œuvre de ces moyens) est fondamentale puisqu'elle permet notamment de définir la stratégie de réparation :

- certains ouvrages ne comportent pas de chape d'étanchéité mais leur état rend souhaitable l'existence d'une protection : la mise en œuvre d'une chape est à prévoir ;
- l'étanchéité s'avère défectueuse ponctuellement ou sur toute sa surface : il faut refaire une étanchéité valable, par reprises locales ou réfection générale ;
- les couches de roulement sont soumises à l'action du trafic ; comme toutes les couches de roulement, elles s'usent et il devient nécessaire de procéder soit à des opérations d'entretien (enduisage, rapiéçage), soit à des réfections partielles ou totales.

1.2 Quand doit-on programmer un diagnostic ?

Le plus souvent, le diagnostic est enclenché suite à la détection visuelle d'une anomalie au niveau de la couche de roulement ou de la sous-face du tablier. Le diagnostic permet alors de déterminer l'origine de l'anomalie, son étendue, sa gravité et de proposer des solutions de traitement adaptées.

En l'absence d'anomalie, le diagnostic peut également être initié par un gestionnaire souhaitant connaître l'état de l'étanchéité de son ouvrage. Il s'agit dans ce cas de faire un « bilan de santé » de l'étanchéité dans le cadre d'une gestion préventive de l'ouvrage (anticipation et optimisation des coûts d'entretien) ou dans le cadre de la mise au point d'un projet plus global de réparation ou de renforcement de l'ouvrage.

Des événements tels qu'un déversement accidentel d'hydrocarbure ou un incendie de véhicule doivent donner lieu à un diagnostic permettant d'évaluer l'éventuelle dégradation de la chape d'étanchéité.

Le diagnostic peut enfin être initié préalablement à une opération de renouvellement de la couche de roulement ou en fin de période couverte par la garantie particulière (le cas échéant) ou par la responsabilité décennale.

1.3 Comment réaliser le diagnostic ?

Le diagnostic doit être réalisé par une entité compétente, qualifiée et ayant des références dans le domaine des ouvrages d'art et plus particulièrement en étanchéité. Il est recommandé de constituer une équipe mixte associant des compétences en ouvrages d'art et des compétences en chaussées (voir § 2.1 ci-après). Le diagnostic doit faire l'objet d'un cahier des charges et d'un programme. Il doit répondre à un besoin clairement identifié.

L'évaluation de l'étanchéité d'un ouvrage d'art intègre trois processus de défaillance qui semblent distincts mais qui sont en réalité souvent interdépendants, ce qui peut rendre le diagnostic difficile :

- › la défaillance intrinsèque au système d'étanchéité (en section courante ou au niveau des points singuliers) ;
- › la dégradation du système d'étanchéité due à un mauvais comportement de la couche de roulement ;
- › les dégradations de la couche de roulement dues à un mauvais comportement du système d'étanchéité.

En tout état de cause, il y a lieu, lors du diagnostic, de considérer de manière concomitante ou non le fonctionnement de la chape d'étanchéité, de la couche de roulement et des points singuliers.

Le diagnostic de l'étanchéité d'un ouvrage d'art est conduit selon les modalités suivantes :

- › une analyse sommaire du dossier d'ouvrage ;
- › un prédiagnostic visuel s'appuyant sur l'examen de la couche de roulement et de la « fonction étanchéité » ;
- › une analyse approfondie du dossier d'ouvrage ;
- › le déploiement éventuel d'investigations complémentaires (non destructives dans un premier temps, puis destructives dans un deuxième temps si nécessaire) ;
- › la formulation d'un diagnostic explicitant l'origine, l'étendue et la probabilité d'évolution des dégradations et identifiant les solutions possibles de leur traitement.

2. Le prédiagnostic visuel

Le prédiagnostic visuel comprend l'examen de la couche de roulement (§2.1) et l'évaluation de la fonction « étanchéité » (§ 2.2). Il doit être précédé d'une analyse sommaire du dossier d'ouvrage permettant de recueillir les informations essentielles à la bonne compréhension du contexte, à l'organisation et à la conduite de la visite. Il s'agit notamment du type et des dimensions de l'ouvrage, des moyens d'accès aux différentes parties de l'ouvrage, du type d'étanchéité et du dernier rapport d'inspection détaillée (ou autre visite périodique).

2.1 L'examen visuel de la couche de roulement

L'examen visuel de la couche de roulement est mené en s'appuyant sur la méthode d'essai n° 52 du LCPC (1). En complément éventuel, l'évaluation de l'état de la couche de roulement pourra être conduite selon les modalités de la méthode d'essai n° 38-2 du LCPC (2). Dans certains cas, il s'avèrera utile d'associer un spécialiste du domaine des chaussées ; notamment dans le cas de doute sur la nature et l'origine de la dégradation observée sur la couche de roulement.

À l'occasion de cet examen, l'équipe de diagnostic doit essayer de distinguer les dégradations qui résultent d'une défaillance intrinsèque à la couche de roulement de celles qui peuvent provenir de l'étanchéité sous-jacente.

Dans le cas où les dégradations sont présentes aussi bien sur l'ouvrage qu'en section courante hors ouvrage, il est fort probable que leur origine est intrinsèque à la couche de roulement. *A contrario*, si ces dégradations sont localisées uniquement sur l'ouvrage, il est alors généralement difficile de différencier une défaillance de la chape de celle de la couche de roulement. À noter que le désordre sur une couche de roulement peut intervenir prématurément sur l'ouvrage compte tenu des conditions particulières de mise en œuvre et de fonctionnement.

Nota : la mise en œuvre des enrobés sur l'ouvrage et ses abords immédiats fait souvent partie du marché de réalisation de l'ouvrage, ce qui est plus rarement le cas des enrobés en section courante : il est donc fort probable que la formulation, les épaisseurs, la compacité... soient différentes.

Les dégradations principales à repérer sont les déformations, les fissures, les arrachements et les remontées (chapitre 2 § 2). Pour formuler les premières hypothèses du diagnostic, on pourra s'aider des tableaux n° 6 (causes probables des désordres en liaison avec l'étanchéité ou son support) et n° 7 (risque d'occurrence des pathologies en fonction des types de chapes) du chapitre 2 (§ 2.4).

L'examen visuel de la couche de roulement permet de formuler un prédiagnostic et donc d'identifier un certain nombre d'hypothèses sur l'origine probable des éventuelles dégradations constatées.

2.1.1 S'agit-il d'un phénomène de glissement ?

Si l'on observe des désordres tels que des bourrelets transversaux, de la tôle ondulée, des fissures transversales...

L'examen visuel est nécessaire mais insuffisant car l'accès à la zone d'origine du désordre est impossible. Il s'agit d'un problème (perte ou insuffisance) d'adhérence entre la couche de roulement et la chape d'étanchéité ou entre cette dernière et le support béton.

L'identification du complexe d'étanchéité (par l'analyse du dossier d'ouvrage) est la première étape de la démarche car elle permet d'émettre une hypothèse sur l'interface à l'origine du glissement.

Exemples :

- procédés en semi-indépendance ou résine : défaut d'accrochage de l'enrobé sur la chape ;
- introduction d'une couche d'accrochage sur une étanchéité bitumineuse.

Pour confirmer cette hypothèse, il sera souvent utile de pratiquer une ou plusieurs fenêtres de reconnaissance (chapitre 3 § 3.4). La technique RADAR (chapitre 3 § 3.3.3), sensible à des variations d'épaisseurs supérieures à 1 cm, pourra permettre dans certains cas d'implanter ces fenêtres.

2.1.2 S'agit-il d'un phénomène de gonflement ?

Si l'on observe des désordres tels que des gonfles, des faïençages circulaires, des fissures circulaires ou en étoile, des nids-de-poule...

Dans le cas où les dégradations sont peu importantes (gonfles, faïençage), l'efficacité de l'examen visuel est variable en fonction des conditions ambiantes (température, ensoleillement). Il est conseillé, en cas de doute, d'organiser une visite complémentaire par températures élevées afin d'observer d'éventuels soulèvements localisés de la couche de roulement.

Il peut être alors utile de compléter l'examen visuel par un repérage des zones « sonnantes creux » au moyen d'un bâton ou d'une massette ou bien d'utiliser des moyens d'investigation spécifique qui confirmeront ou non la présence de gonfles ou de décollement : si les conditions sont favorables, la thermographie infrarouge constitue par exemple un outil intéressant pour localiser et estimer l'étendue du phénomène dans la perspective d'une réparation (chapitre 3 § 3.3.4). En dernier ressort, des fenêtres de reconnaissance peuvent être envisagées.

Dans le cas où les dégradations sont avancées (nids-de-poule), il convient d'examiner avec attention l'intégrité de la chape d'étanchéité si elle est visible.

Bien évidemment, l'analyse préalable du dossier d'ouvrage, notamment pour identifier le type de chape en place, est indispensable : le phénomène de gonflement dans le cas d'une chape FMAS / SEL est exceptionnel par exemple.

2.1.3 S'agit-il d'un phénomène de fluage, orniérage ?

Si l'on observe des désordres tels que des ornières, du faïençage dans les bandes de roulement...

L'analyse du dossier d'ouvrage est une étape importante dans ce cas : les caractéristiques de la couche de roulement, le type de chape d'étanchéité, les résultats d'essais d'indentation (dans le cas d'une étanchéité comportant une couche d'asphalte), l'âge de la couche de roulement, etc. sont autant d'éléments qui aideront à formuler le diagnostic.

À titre indicatif, les systèmes à base d'asphalte (FPA, bicouche asphalte), les MHC et les systèmes semi-indépendants sont particulièrement sensibles à ce phénomène.

Quand le doute subsiste, il est recommandé, pour ce type de dégradation, d'ouvrir des fenêtres de reconnaissance (chapitre 3 § 3.4) en zone non déformée (référence) et en zone déformée afin de comparer les épaisseurs respectives de chacune des couches du complexe étanchéité/couche de roulement et éventuellement d'effectuer des essais de caractérisation (chapitre 3 § 3.5.3) des différents matériaux (essais d'indentation sur échantillon d'asphalte par exemple, caractérisation des enrobés).

Sous certaines conditions, l'ouverture de fenêtres de reconnaissance pourra être précédée par un relevé des épaisseurs de couches sur l'ensemble du tablier par technique RADAR (chapitre 3 § 3.3.3) : permettant ainsi d'identifier de manière non destructive les zones « suspectes ». Au préalable, il pourra être judicieux, dans le cas d'un orniérage, d'effectuer un relevé de la géométrie du profil en travers par la méthode TUS (chapitre 3 § 3.3.2).

2.1.4 S'agit-il d'une altération du support de la chape d'étanchéité ?

Si l'on observe des affaissements, de la fissuration, du faïençage...

La présence d'affaissements localisés peut être symptomatique d'une défaillance du support en béton. Dans le cas d'un renformis, on se reportera au guide technique « Cas des ouvrages comportant un renformis sous la chape d'étanchéité » (3).

L'analyse du dossier d'ouvrage est une étape importante dans ce cas puisqu'elle permet notamment de connaître la présence éventuelle (et leurs caractéristiques) d'un renformis, d'une contre-chape ou d'un reprofilage.

L'examen visuel de la couche de roulement n'est généralement pas suffisant pour conclure et il convient alors dans ce cas de le compléter par des investigations spécifiques.

À noter que certaines techniques d'investigations non destructives (méthode COLIBRI par exemple) sont bien adaptées à la détection des faiblesses mécaniques du support (voir chapitre (chapitre 3 § 3.3.1). Soulignons enfin que, sous certaines conditions, la technique RADAR peut être sensible aux altérations des couches support de la chape d'étanchéité.

On rappelle ici que cette altération du support peut être favorisée par la présence d'eau sous la chape. On cherchera donc, notamment lors de l'examen visuel sur l'étanchéité mais également dans l'analyse du dossier d'ouvrage, à confirmer cette présence d'eau (infiltrations, efflorescences en sous-face de tablier par exemple) et à identifier toute configuration qui pourrait faciliter une circulation d'eau sous l'étanchéité (contournement de relevé d'étanchéité, mauvais raccordement de l'étanchéité au joint de chaussée par exemple). Le paragraphe suivant donne quelques recommandations à ce sujet.

2.2 Évaluation visuelle de la fonction « étanchéité »

Les éléments d'appréciation sont relativement simples : la présence ou non d'humidité en intrados. Lors de l'examen visuel, la détection des zones humides, de suintements à travers des fissures, des stalactites, des traces de calcite... sont autant d'éléments qui doivent faire suspecter une défaillance de l'étanchéité, toujours effective ou passée. Dans le cas où la défaillance de l'étanchéité est plus ancienne, il s'agit plutôt de rechercher des tâches de rouille, des éclatements de béton plus ou moins localisés avec mise à nu éventuelle des armatures (il convient néanmoins de noter que ces défauts peuvent avoir d'autres origines).

À ce stade il convient de noter que l'absence de dégradations visuelles au niveau de la sous-face de tablier n'est pas une indication suffisante pour conclure au bon état de la chape d'étanchéité. En effet, la défaillance de l'étanchéité ne se manifeste pas immédiatement par des symptômes visuels. Il peut ainsi s'écouler quelques années avant d'en voir les premiers signes. La défaillance de l'étanchéité peut ainsi engendrer une altération du tablier sans que cette dernière se manifeste par des désordres au niveau de la couche de roulement ou en sous-face du tablier : processus de corrosion des armatures du tablier par exemple par la pénétration progressive des chlorures issus des sels de déverglaçage. Ces considérations doivent être prises en compte notamment dans le cas des ouvrages sous garantie (figure 53).

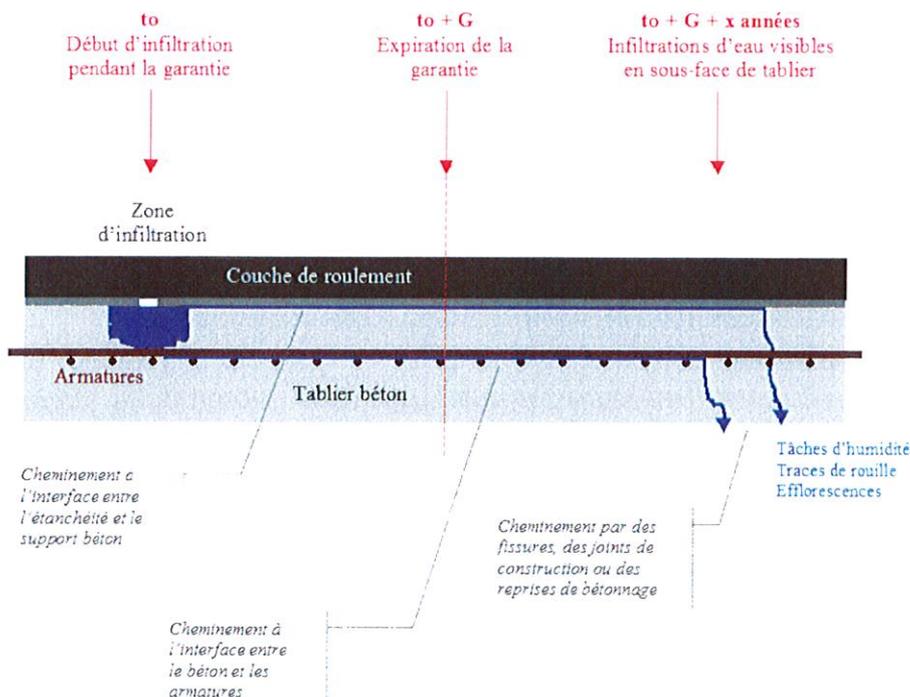


Figure 53. Effet retard d'une infiltration d'eau – Complexité du diagnostic

2.2.1 Les points singuliers

Une attention particulière doit être portée aux points singuliers au niveau desquels le complexe d'étanchéité de l'ouvrage est, soit plus sujet à des anomalies, soit plus sensible : avaloirs, reprises de bétonnage, tiges d'ancrages des platines supports des glissières de sécurité et des lampadaires, joints corniche / trottoir, abouts de tablier (joints de chaussée, ancrages et cachetage des câbles de précontrainte), relevés d'étanchéité (lorsque ceux-ci ne sont pas protégés). L'inspecteur s'appuiera utilement sur le guide « Prévention des pathologies d'ouvrages d'art », sous-dossier « Protection contre l'eau » (4) pour le guider dans son examen visuel.

2.2.2 Les infiltrations d'eau

L'identification de l'origine d'une infiltration constatée en sous-face de tablier peut s'avérer très difficile et nécessiter des investigations longues et coûteuses. Néanmoins, la simple localisation visuelle des infiltrations et des zones humides est une information importante pour la recherche des causes. À titre d'exemples :

- la présence de traces humides uniquement sous les zones de trottoirs doit conduire à vérifier si le trottoir a bien une étanchéité et si elle est efficace ;
- des venues d'eau autour d'un trou d'homme sont un indice de défauts de liaison de l'étanchéité au niveau de ce passage ;
- un passage d'eau au droit des bordures de trottoirs témoigne d'une absence ou d'une défaillance du relevé d'étanchéité sur la contre-bordure.

L'examen visuel précisera l'éventuelle présence de facteurs aggravants : point bas du profil en travers, profil en long de l'ouvrage trop plat qui favorisent l'accumulation et la stagnation d'eau et au final les infiltrations.

- un passage d'eau sur les derniers mètres d'un tablier avant les joints de chaussée est symptomatique d'une mauvaise exécution de la fermeture d'étanchéité du joint ou d'un mauvais fonctionnement du drain (voire de son absence) ;
- un passage d'eau entre le fût d'une gargouille et le support béton correspond généralement à une mauvaise liaison entre la chape d'étanchéité et la platine horizontale de la gargouille.

Les infiltrations d'eau ainsi que les efflorescences et les stalactites doivent être caractérisées par l'inspecteur : actives / inactives. Dans certain cas, il y a lieu de prévoir une visite complémentaire : le passage d'eau est repérable après de fortes pluies en prenant en compte l'effet retard lié au cheminement de l'eau. Pour les efflorescences et les stalactites, il convient de s'assurer, après une période de pluie, qu'elles sont effectivement actives car certaines peuvent être anciennes et antérieures à la mise en œuvre ou à une réhabilitation de la chape d'étanchéité.

Les infiltrations d'eau peuvent être le signe d'une défaillance majeure du système d'étanchéité et il convient d'en préciser la gravité. Celle-ci s'évalue par :

- l'intensité du passage d'eau ;
- par la localisation et la fréquence des fuites (une fuite au droit d'une gargouille sur un encorbellement en béton armé n'a pas la même importance que l'eau suintant d'une fissure d'une pièce précontrainte) ;
- par la présence ou non de traces de rouille.

Le visiteur pourra utilement se servir des catalogues de désordres IQOA (5).

La présence de zones humides en intrados d'un tablier suppose la concomitance de deux défauts : un défaut d'étanchéité et un défaut ou point faible dans la structure qui favorise le passage d'eau (reprise de bétonnage, fissures, zones de ségrégation importante, joints décollés entre voussoirs...). En d'autres termes, on peut avoir une défaillance de l'étanchéité sur un pont sans que cela soit obligatoirement visible à brève échéance en sous-face de tablier.

2.2.3 Le cheminement de l'eau

Il n'y a pas forcément correspondance directe entre la localisation d'une infiltration en intrados et celle de l'entrée d'eau. Il est effectivement très souvent difficile, par simple examen visuel, de remonter à l'origine des infiltrations d'eau. Il est donc important de bien identifier les éventuelles zones de dégradation visibles de la couche de roulement et d'avoir recours à des investigations spécifiques telles que l'essai à l'eau claire ou à l'eau colorée (chapitre 3 § 3.2.1 et § 3.2.2). À noter que, sous certaines conditions, les méthodes d'auscultation RADAR (chapitre 3 § 3.3.3) et neutronique (chapitre 3 § 3.3.5) sont également particulièrement bien adaptées pour la détection d'humidité.

Si l'on excepte le cas d'une chape par film mince adhérent (FMAS / SEL) qui n'a pas résisté à une ouverture de fissure du support (par exemple dalle mince en béton armé) et pour lequel il y a correspondance de localisation entre entrée et sortie d'eau, dans de nombreux cas, une circulation de l'eau est possible entre chape et support ; et plusieurs mètres (voire dizaine de mètres) peuvent séparer les entrées et sorties d'eau :

- cheminement à l'interface chape d'étanchéité / support béton ; ce phénomène est symptomatique dans le cas de chape en semi-indépendance ;
- cheminement dans le plan d'une fissure ; il faut savoir que dans le cas de fissure fine, du fait des rétrécissements et obturations locales, l'eau peut cheminer quelques mètres dans la partie haute ;
- cheminement le long des armatures, dans le cas d'un mauvais enrobage, d'un défaut de mise en œuvre du béton, d'un retrait de ressuage, etc. ;
- cheminement entre un conduit lisse de câble de précontrainte et le béton d'enrobage (exemple des câbles relevés en travée des VIPP) ;
- cheminement entre la feuille d'un relevé d'étanchéité dans l'angle droit rentrant ; il n'est pas rare que celle-ci soit mal soudée au support (difficulté de soudage, géométrie grossière du béton dans l'angle) et ce vide fonctionne alors comme un « drain ».

La potentialité de cheminement est bien sûr fonction du type de chape d'étanchéité : elle est maximum dans le cas de chape en semi-indépendance (asphalte bi-couche classique et FPM et FPA en semi-indépendance), elle est quasi nulle dans le cas de chape FMAS/SEL du fait de leur adhérence parfaite ; elle devrait l'être également pour le cas des chapes FPM mais pour ces dernières cependant, en fonction de leur âge (sensible perte d'adhérence) et de leur état vis-à-vis du « gonflement », des cheminements locaux sont possibles. À noter que le cheminement peut se faire également au sein d'un éventuel renformis ou reprofilage sous la chape d'étanchéité.

Ces cheminements possibles sont à prendre en compte pour le diagnostic et pour implanter avec pertinence les fenêtres de reconnaissances le cas échéant et les autres techniques d'investigation.

3. Les investigations complémentaires

3.1 L'analyse approfondie du dossier d'ouvrage

3.1.1 Documents à consulter

Les documents pouvant être consultés dans le cadre d'un diagnostic de complexe d'étanchéité sont les suivants :

- exigences du CCTP en matière d'étanchéité ;
- plans d'exécution et plans de détails ;
- avis technique éventuel du complexe d'étanchéité mis en œuvre sur l'ouvrage (ou copie du PV de résultats des essais de conformité au fascicule 67 titre I) ;

Du prédiagnostic au diagnostic...

Dans de très rares cas seulement, l'analyse sommaire du dossier d'ouvrage et le prédiagnostic visuel suffisent à établir un diagnostic pertinent de l'étanchéité. Dans la plupart des cas, au regard de la complexité des processus de dégradations concernés, le déploiement d'investigations spécifiques s'avère indispensable pour compléter l'analyse.

Dans un premier temps, ces investigations doivent être « documentaires » (analyse approfondie du dossier d'ouvrage).

De manière générale, on essaiera de limiter au maximum le recours aux techniques d'investigations destructives qui, même si elles sont mises en œuvre avec soin, restent « traumatisantes » pour l'étanchéité. Toutefois, dans certaines situations, on ne pourra pas s'en affranchir.

On privilégiera donc, lorsque c'est pertinent, les techniques d'auscultation non destructives adéquates.

Le programme d'investigations doit être l'aboutissement d'un processus de réflexion intégrant l'ensemble des informations recueillies à l'occasion de l'analyse du dossier d'ouvrage, de l'examen visuel de la couche de roulement, de la sous-face du tablier et des points singuliers. Dans la plupart des cas, il faudra envisager une combinaison de plusieurs techniques.

- plan qualité « étanchéité » et procédures d'exécution ;
- rapports de contrôles intérieurs et extérieurs (notamment la validation du complexe, du support et de sa mise en œuvre) y compris procès verbaux d'essais (indentation, etc.) ;
- fiches de non-conformité et procédures de traitement des non-conformités ;
- rapports d'inspection détaillée périodique ;
- procès verbaux de visite IQOA.

3.1.2 Informations minimales à recueillir

L'examen et l'analyse de ces documents doivent permettre de recueillir les informations minimales suivantes :

- âge du complexe d'étanchéité ;
- nature du complexe d'étanchéité (Asphaltes, FPA, FPM, FMAS/SEL, etc.) ;
- dispositions constructives (liaison aux avaloirs, raccordement aux joints de chaussée, relevé d'étanchéité, ancrages traversant, etc.) ;
- modalités d'intervention de l'entreprise : réalisation phasée, réfections partielles, etc. ;
- technique, phasage et conditions de mise en œuvre ;
- présence éventuelle d'un renformis, d'un reprofilage ou d'une contre-chape (dans le cas des ouvrages anciens) ;
- conformation des trottoirs et présence de réservations pour réseaux divers ;
- historique des interventions sur la couche de roulement et sur l'étanchéité.

3.1.3 Importances des éléments recueillis

Ces éléments sont très importants car ils permettront entre autres de cadrer la suite du diagnostic :

- orientation des examens visuels complémentaires qui pourront être ciblés ;
- choix d'investigations spécifiques si elles sont nécessaires... zonages / densité...

À noter que la simple connaissance du complexe en place permet d'identifier en amont les risques de dégradations probables, privilégiées ou prévisibles de la chape d'étanchéité (tableau n° 7 du chapitre 2).

3.2 Les essais à l'eau

Lorsque l'examen visuel a montré des traces d'infiltrations d'eau (suintements, efflorescences, stalactites, humidité par exemple), le diagnostic doit aider à préciser les points de passage de cette eau. Les essais à l'eau, relativement simples à mettre en œuvre, doivent dans ce cas être privilégiés dans un premier temps.

3.2.1 Essai à l'eau claire

Il s'agit d'une technique couramment utilisée en bâtiment. Elle se transpose aisément au cas des ouvrages d'art (6). La méthode consiste à couvrir la surface par une pellicule d'eau. Au droit de la zone de passage d'eau (infiltration en intrados du tablier), on met en place une cloche dans laquelle on envoie de l'air sous faible pression (pour ne pas soulever la chape et le revêtement). Il suffit alors d'observer l'émergence de bulles au niveau de la couche de roulement (figure 54).

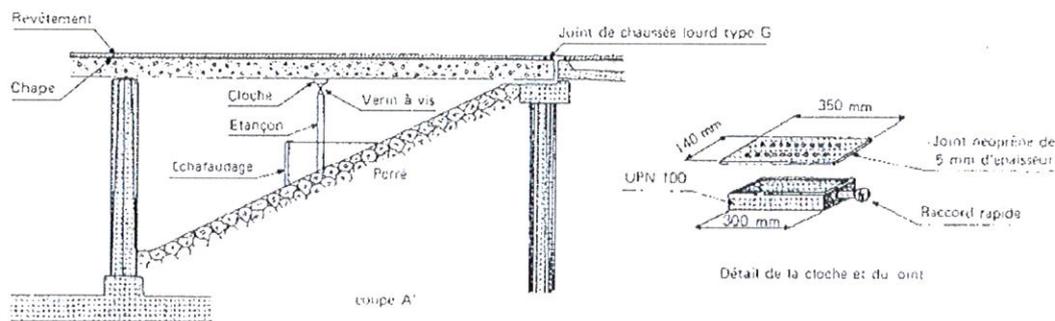
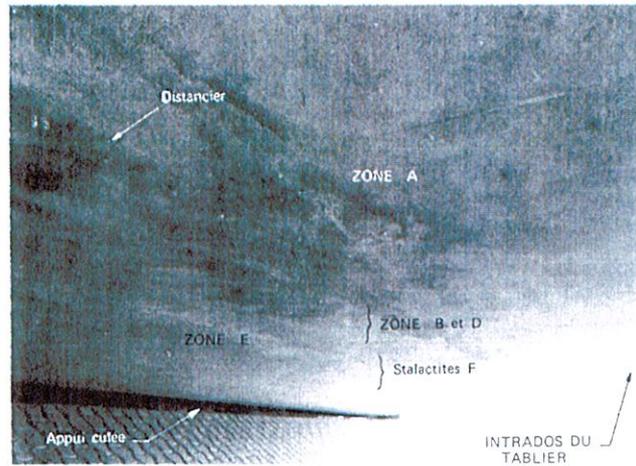


Figure 54. Schéma du dispositif
(source : BLPC n° 68, nov.-déc. 1973)

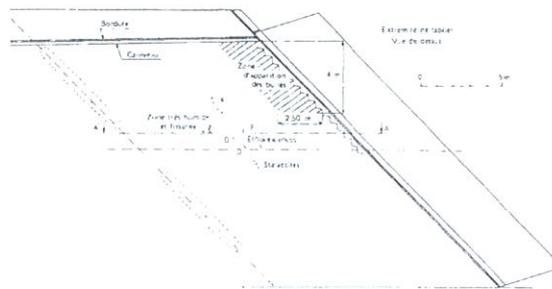
Cette technique est particulièrement bien adaptée au cas où des infiltrations ont été constatées en intrados de tablier et qu'aucune zone particulière d'entrée d'eau en surface n'est suspectée.

Une application sur ouvrage a montré la faisabilité, après 2 heures de soufflage à 1 kg/cm^2 de pression d'air, de détecter une zone suspecte d'entrée d'eau à environ 5 m du point d'injection (connexion de l'étanchéité avec le joint de chaussée). Dans cette application, le dispositif était constitué d'un caisson étanche maintenu appliqué contre l'intrados du tablier grâce à un vérin à vis appuyé sur un massif de réaction.

Une étude préalable de faisabilité (pente de l'ouvrage adaptée, nature de la chape d'étanchéité, zone de sortie d'eau, etc.) est indispensable avant la mise en place d'une telle méthode.



a) Extrémité du tablier, intrados – Photo des désordres (Source : BLPC n° 68, nov.-déc. 1973)



b) Extrémité du tablier, intrados – Schéma de repérage des désordres (Source : BLPC n° 68, nov.-déc. 1973)

Figure 55. Application du procédé sur un ouvrage

3.2.2 Essai à l'eau colorée

La méthode est basée sur l'utilisation de l'eau colorée (eau teintée de fluorescéine ou de fuschine). Elle est intéressante si on suspecte une zone particulière d'être le point de passage de l'eau (figure 56).

L'essai consiste à positionner une enceinte contenant de l'eau colorée au droit des zones d'infiltrations suspectées : au niveau du relevé d'étanchéité ou au droit d'un joint de chaussée par exemple. Les parois latérales de l'enceinte peuvent être confectionnées à l'aide d'un mortier. La confection du système est souvent délicate car l'étanchéité latérale du dispositif doit être assurée. Les zones d'infiltrations d'eau observées sont alors surveillées et les temps d'arrivée de l'eau colorée chronométrés. La mise en place de l'essai et son suivi peuvent être relativement longs et donc nécessiter une interruption de trafic à prendre en compte dans l'organisation de l'opération.

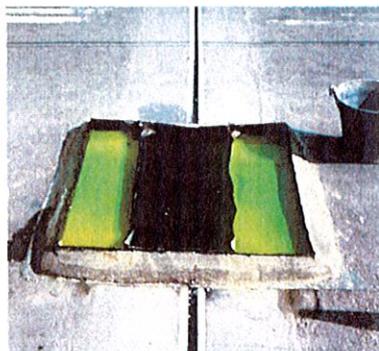


Figure 56. Test à l'eau colorée au niveau d'un joint de chaussée

Son déploiement doit notamment être envisagé dans le cas où le prédiagnostic a identifié les possibilités d'infiltration suivantes :

- contournement du relevé d'étanchéité ;
- défaut de continuité de l'étanchéité au raccordement avec les joints de chaussée et les avaloirs ;
- dégradation de la couche de roulement avec perforation probable de l'étanchéité.

3.3 Les techniques d'auscultation non destructive

En fonction du type de pathologie rencontré et/ou de l'importance de l'ouvrage, il convient dans certains cas d'envisager l'utilisation de méthodes d'investigations non destructives à plus ou moins grand rendement qui peuvent apporter des informations globales et continues (zonage) décisives pour la formulation du diagnostic et le dimensionnement des réparations éventuelles.

En fonction de la problématique rencontrée, le diagnostic peut donc être affiné par la mise en œuvre de ces techniques d'auscultation. Ces dernières peuvent permettre d'obtenir trois types d'informations :

- la constitution du complexe étanchéité/couche de roulement (nombre et épaisseur des couches) ;
- les propriétés mécaniques et physico-chimiques du complexe étanchéité/couche de roulement ;
- l'étendue des dégradations.

Le choix des techniques dépend des résultats de l'analyse du dossier d'ouvrage et du diagnostic visuel de la couche de roulement et de la sous-face de tablier. On notera que la structure du complexe étanchéité/béton peut, dans certains cas, conditionner l'utilisation de certaines techniques : des épaisseurs de couches (roulement, étanchéité) trop faibles par exemple limitent l'utilisation de la méthode RADAR. De même, les conditions d'intervention peuvent rendre impossible le déploiement de certaines techniques : utilisation de la méthode infrarouge par temps de pluie ou en dehors des périodes optimales d'ensoleillement et de gradient thermique par exemple.

Pour exploiter au maximum leur apport et leur intérêt, il convient le plus souvent de les combiner (certaines techniques sont complémentaires) et de les coupler à des essais destructifs (étalonnage).

Enfin, ces auscultations doivent être réalisées par des équipes spécialisées et supervisées par l'entité responsable du diagnostic.

3.3.1 Méthode COLIBRI

Le champ d'application de cette technique concerne la détection d'hétérogénéités du support telles que les décollements, la désagrégation ou la délamination du béton support et d'une manière générale les défauts d'interface.

Il s'agit d'une technique « routière » basée sur l'analyse de la propagation et de la réflexion dans le corps de chaussée d'ondes mécaniques générées à l'aide d'un marteau.

Plus précisément il s'agit d'une méthode d'auscultation dynamique par méthode d'impact (méthode vibratoire). L'appareil COLIBRI exerce un impact sur la chaussée et mesure à la fois la force appliquée et l'accélération verticale à l'aide d'un accéléromètre maintenu par un système masse-ressort.

Le rendement de cette technique est faible puisque les mesures sont réalisées ponctuellement. Le déploiement de cette technique peut être envisagé lorsqu'une altération du support de la chape d'étanchéité est suspectée et que ces zones d'altération probables ont été localisées au préalable par une autre technique (chapitre 3 § 3.3.3).

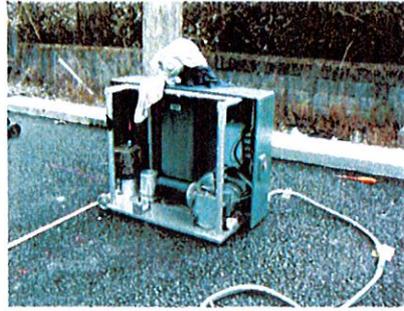


Figure 57. Appareil COLIBRI

3.3.2 Méthode TUS

Il s'agit d'une technique « routière » couramment utilisée pour la détection des déformations de la couche de roulement (affaissement et orniérage principalement) : relevés géométriques de profils transversaux conformément à la méthode d'essai LPC n° 49 (7).

L'appareil de mesures est embarqué sur un véhicule. La mesure, basée sur la propagation et la réflexion d'ondes ultrasonores, est sans contact. L'ensemble permet de réaliser l'auscultation sous trafic. Il s'agit d'une technique à grand rendement (figure 58).

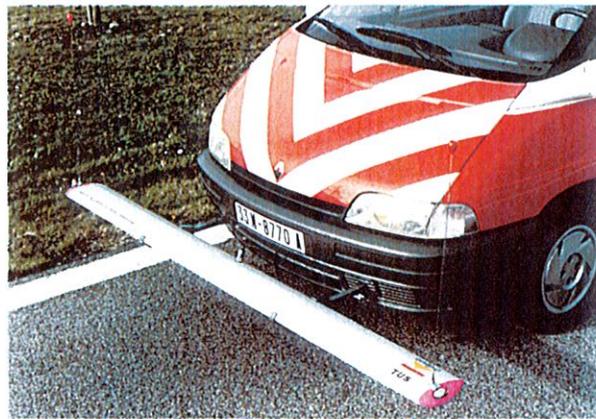


Figure 58. Véhicule équipé du système TUS

Le dispositif est constitué d'une règle support de capteurs positionnée à l'avant de tout type de véhicule, d'un boîtier d'alimentation, d'un boîtier de distance et d'un logiciel permettant l'acquisition, le traitement et l'édition de résultats (figure 59).

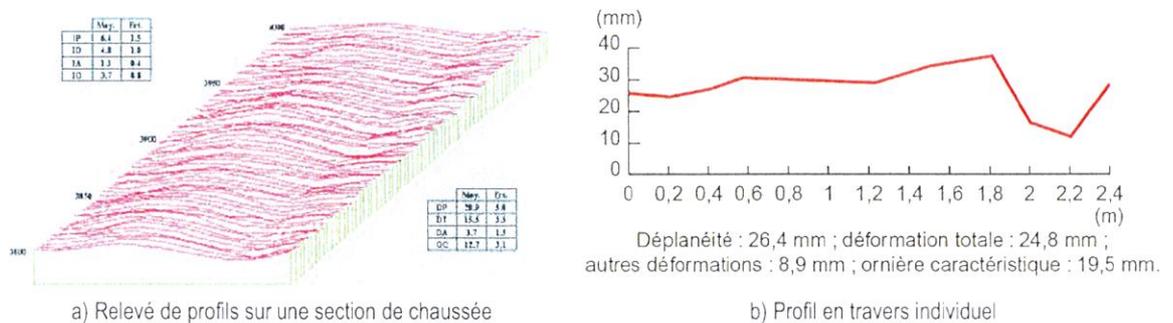


Figure 59. Exemple de résultats d'une auscultation par méthode TUS

Le déploiement de la méthode TUS peut être envisagé lorsque l'examen visuel de la couche de roulement a révélé la présence d'orniérage ou d'affaissement. Lorsque ces désordres sont susceptibles d'être liés à une défaillance de la chape ou de son support, il est avantageux

de compléter l'investigation par une auscultation RADAR qui permettra de disposer de l'épaisseur des différentes couches de chaussée.

L'orniérage et l'affaissement peuvent également être relevés manuellement conformément à la méthode d'essai LPC n° 38-2 (2). Dans la plupart des cas, le relevé doit être complété par l'ouverture d'une fenêtre de reconnaissance dans les conditions présentées au § 3.4.

3.3.3 Méthode RADAR

Le principe de la méthode RADAR ainsi que ses modalités d'application sont décrits en détail dans l'annexe 2.

Moyennant l'utilisation d'une antenne de fréquence adaptée, le déploiement de cette technique est particulièrement intéressant pour mesurer les épaisseurs des différentes couches du complexe « reprofilage / étanchéité / couche de roulement » (figure 60). On peut donc envisager le déploiement de la méthode dans les situations suivantes :

- défaillance de l'étanchéité pouvant avoir pour origine une sur ou sous-épaisseur d'une ou des couches du complexe ;
- recherche de la présence d'un renformis, d'une contre-chape ou d'un reprofilage ;
- réglage du rabotage dans le cas d'un renouvellement de la couche de roulement.

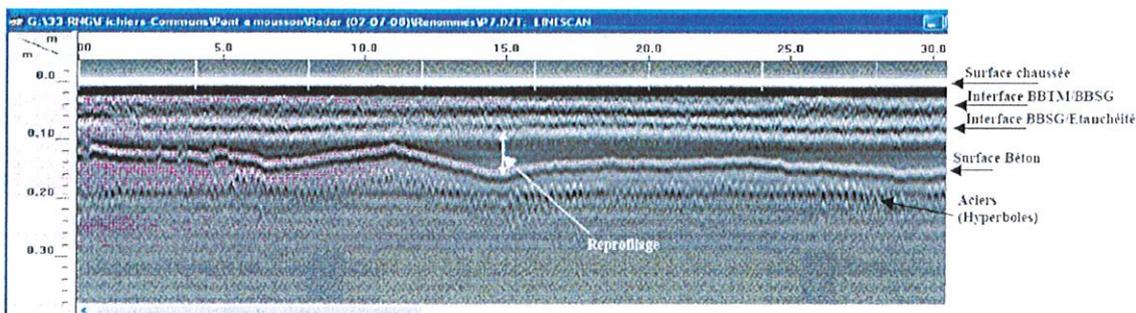


Figure 60. Exemple d'une « coupe-profondeur » radar avec visualisation des différentes couches de la chaussée

Cette technique est également particulièrement bien adaptée à la mesure de l'enrobage des armatures du tablier (relevé statistique sur l'ensemble du tablier par exemple) : cette donnée est fondamentale dans le cadre de la problématique de corrosion des armatures.

Sous certaines conditions (nature de la chape notamment, couplage avec une autre technique, variation d'épaisseur du complexe), le déploiement de la méthode pourra s'appliquer pour la détection d'humidité et d'altération dans le support de la chape d'étanchéité (figure 61).

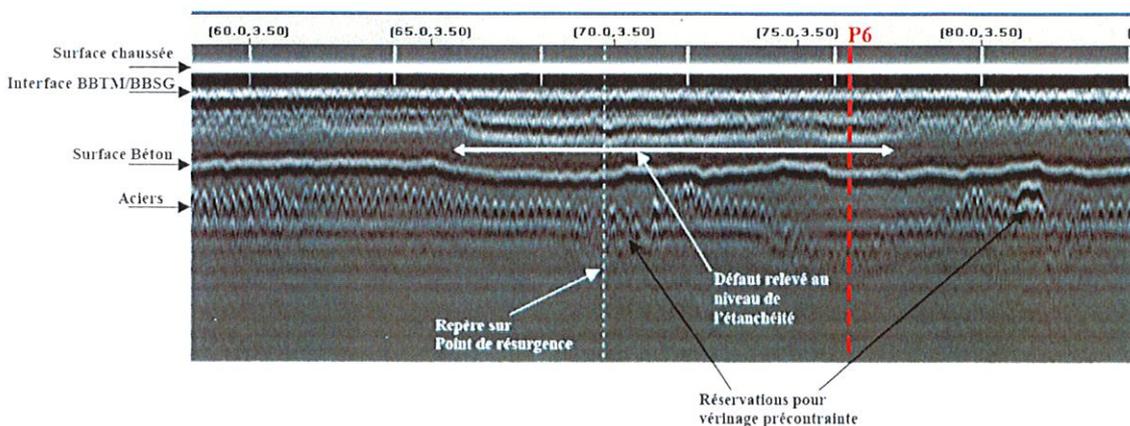


Figure 61. Exemple de « coupe-profondeur » radar - Visualisation d'une anomalie dans la couche de reprofilage sous le système d'étanchéité - Anomalie symptomatique d'une présence d'eau

Une exploitation relative des mesures sous forme de cartographie isovaleur permet notamment d'identifier des zones spécifiques où des fenêtres de reconnaissance pourront être envisagées (figures 62 et 63).

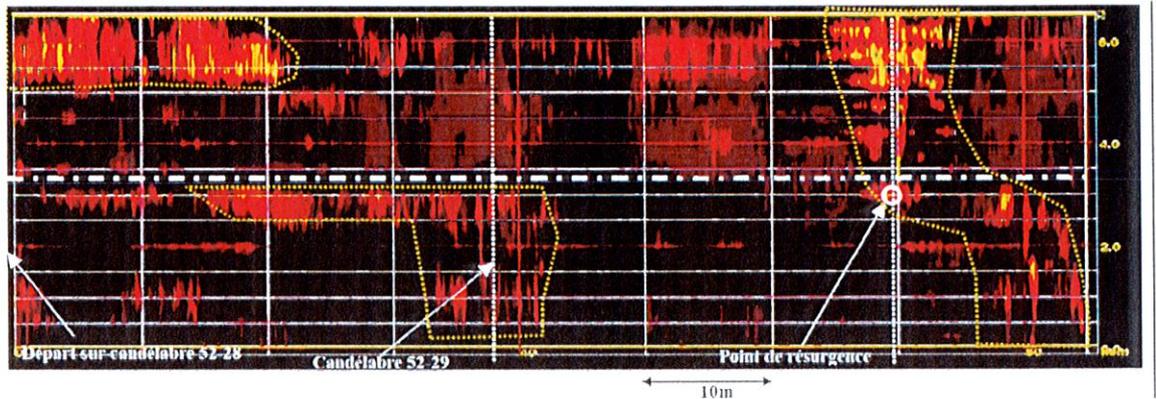


Figure 62. Exemple de cartographie des amplitudes radar dans la couche de reprofilage - Auscultation 24 h après un épisode pluvieux

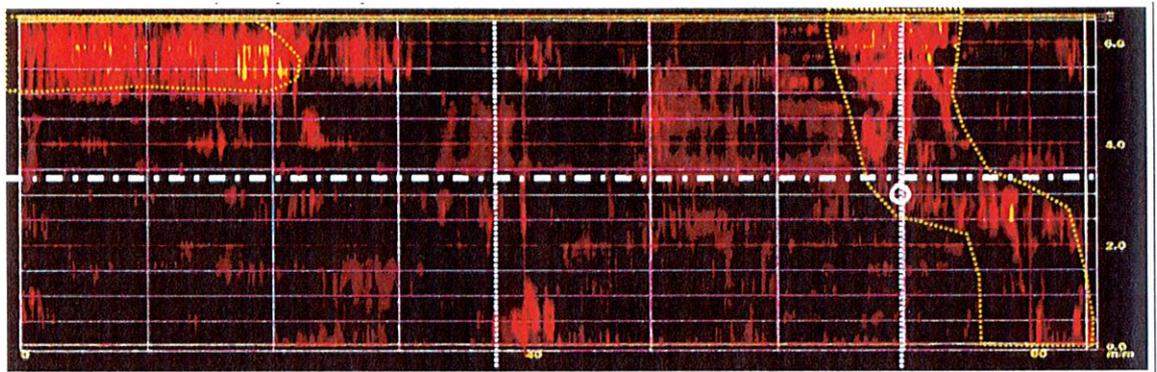


Figure 63. Exemple de cartographie des amplitudes radar dans la couche de reprofilage - Auscultation 6 jours après l'épisode pluvieux

L'antenne RADAR peut être embarquée sur un véhicule (ou autre dispositif roulant, figures 64 et 65). Dans certaines conditions l'auscultation peut se faire sous trafic. Il s'agit d'une technique à grand rendement.



Figure 64. Antenne portée sur véhicule



Figure 65. Antenne posée sur chariot

3.3.4 Thermographie infrarouge

Le principe de la thermographie ainsi que ses modalités d'application sont décrits en détail dans l'annexe 3.

Basée sur le principe de la détection du flux thermique émis par la surface observée et sa transformation sous forme d'une image visible, cette technique permet de déterminer la présence d'hétérogénéités révélatrices d'une conductivité thermique différente des matériaux constitutifs de la structure auscultée.

Des applications récentes ont montré l'intérêt de la thermographie infrarouge dans le contrôle de la mise en œuvre et de la réception des chapes d'étanchéité (feuilles préfabriquées notamment) : détection de défaut de soudage ou de recouvrement dans les détecteurs de gonfles (7) et (7bis).

Sous certaines conditions (conditions de températures et d'ensoleillement, épaisseur de la couche de roulement notamment), la thermographie infrarouge pourra également être utilisée pour le diagnostic de l'étanchéité d'ouvrages en service : détection de gonfles et de décollements (figure 66).

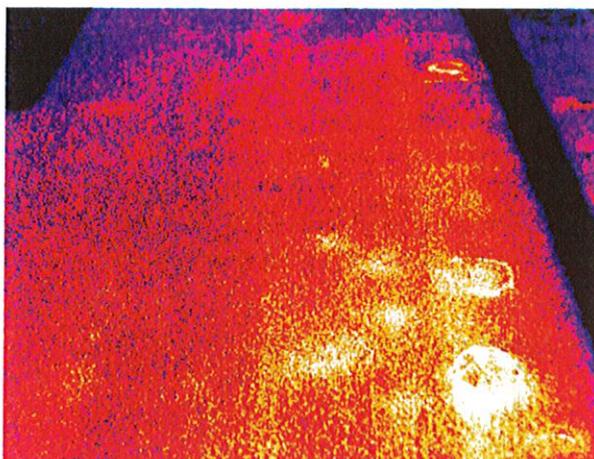


Figure 66. Détection de gonfles par thermographie infrarouge

Le déploiement de la méthode nécessite une caméra infrarouge (figure 67). Cette dernière peut être embarquée sur un véhicule (ou un autre dispositif roulant). Il s'agit d'une technique à grand rendement.

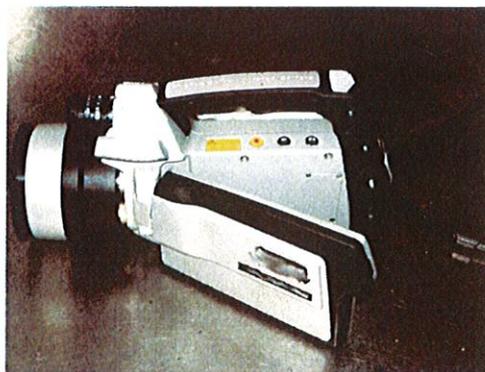


Figure 67. Exemple de caméra infrarouge

Une cartographie des défauts peut ainsi être réalisée *in situ* ou *a posteriori* et conduire à la réalisation d'investigations ciblées telles que, par exemple, l'ouverture de fenêtres de reconnaissance afin de caractériser plus précisément la nature de l'anomalie rencontrée.

3.3.5 Radiographie neutronique

Le principe de la radiographie neutronique ainsi que ses modalités d'application sont décrits en détail dans l'annexe 4.

Cette technique est essentiellement utilisée pour les diagnostics d'étanchéité des toitures/terrasse. Sous certaines conditions, son application sur ouvrages d'art peut être envisagée pour la détection de zones humides sous la chape d'étanchéité.

Le matériel se compose de deux éléments (figure 68) : un système de production d'énergie et un système de réception. L'énergie d'émission provient d'une source neutronique (l'Américium 41). Cette émission produit une réaction atomique avec l'hydrogène présent dans les matériaux exposés. Plus l'énergie est absorbée, plus il y a d'hydrogène, donc d'eau (cf. bibliographie - 7tri).

La méthode est techniquement valable mais comporte quelques inconvénients :

- les mesures sont comparatives et leur interprétation délicate ;
- l'emploi d'une source radioactive nécessite des mesures de radioprotection spécifique ;
- la méthode mesure l'humidité des matériaux sous la sonde, il est donc difficile de différencier l'eau dans la couche de roulement de celle sous la chape – sauf à faire des mesures depuis la sous-face du tablier.

Certains matériels permettent d'effectuer, en plus des mesures d'humidité, des mesures de densité (source de photons) de la couche de roulement et du support béton. Cette application présente un intérêt lorsqu'une défaillance de la couche de roulement est suspectée ou bien qu'un doute sur l'intégrité du support béton de la chape a été identifié. Les mesures sont ponctuelles et nécessitent un temps d'acquisition compris entre 15 et 60 secondes. Il s'agit donc d'une technique à moyen rendement.



Figure 68. Sonde neutronique

Les résultats sont généralement représentés sous forme de cartographie isovaleur permettant d'identifier les zones susceptibles de présenter de l'eau sous la chape d'étanchéité. L'auscultation neutronique doit ainsi conduire à la réalisation d'investigations ciblées telles que, par exemple, l'ouverture de fenêtres de reconnaissance afin de caractériser plus précisément la nature des anomalies détectées.

Il est recommandé de ne pas utiliser cette technique seule mais de la coupler avec une auscultation RADAR (chapitre 3 § 3.3.3).

3.4 Les fenêtres de reconnaissance

Avant toute ouverture de fenêtre, il convient d'étudier attentivement les modalités de réparations en particulier celles de la chape d'étanchéité et de ne pas improviser sur place dans des conditions souvent difficiles (la nuit, durée d'interruption de trafic quelques fois très limitée, etc.). Le chapitre 4 donne à ce sujet un certain nombre de recommandations.

L'ouverture de fenêtres de reconnaissance (figures 70 et 71) est l'une des investigations que l'équipe de diagnostic doit envisager en dernier lieu, notamment lorsque des doutes subsistent sur l'origine des dégradations observées sur la couche de roulement, pour confirmer la localisation d'une entrée d'eau ou pour valider ou caractériser les anomalies détectées par les techniques non-destructives.

La technique consiste à ouvrir une fenêtre d'environ 50 cm de côté si possible au niveau d'une zone saine et d'une zone dégradée. L'emplacement des ouvertures est à définir en fonction de la nature des dégradations observées, du type de chape d'étanchéité et des éléments du dossier d'ouvrage. Cette ouverture peut être pratiquée à la bêche pneumatique après sciage à sec¹.



Figure 69. Ouverture d'une fenêtre de reconnaissance



Figure 70. Fenêtre de reconnaissance - Confirmation de présence d'eau sous la chape d'étanchéité dans le reprofilage

La réalisation de la fenêtre de reconnaissance doit être progressive et soignée pour évaluer successivement la nature et l'état des différentes couches : couche de roulement / étanchéité (figure 72). Cette technique est particulièrement pertinente car elle permet de confirmer la nature et l'épaisseur de la chape d'étanchéité et des couches de chaussée et la présence éventuelle d'un renformis. Elle permet en outre de différencier le cas d'une dégradation de chaussée liée à un mauvais comportement de la couche de roulement et celle d'une dégradation liée à une défaillance de la chape d'étanchéité et/ou de son support.

Les fenêtres de reconnaissance sont particulièrement intéressantes dans le cas de déformation de la couche de roulement et plus particulièrement dans les cas d'orniérage. Dans ce cas, des ouvertures de fenêtres concernant toute l'épaisseur du complexe sont à effectuer au droit d'une (ou plusieurs) ornières, et à titre de référence au droit d'une zone non orniérée. Ces fenêtres de reconnaissance peuvent être judicieusement précédées par des mesures RADAR et TUS permettant d'obtenir la géométrie et les épaisseurs de couches sur le reste de la surface du tablier.

Remarque : cas particulier de l'orniérage

Dans le cas où un phénomène d'orniérage est détecté, la fenêtre de reconnaissance doit intégrer la tête du bourrelet, le fond d'orniérage et l'axe de la chaussée. Sur chacune de ces

1. Le sciage à sec permet la détection d'éventuelles traces d'humidité ou de venues d'eau.

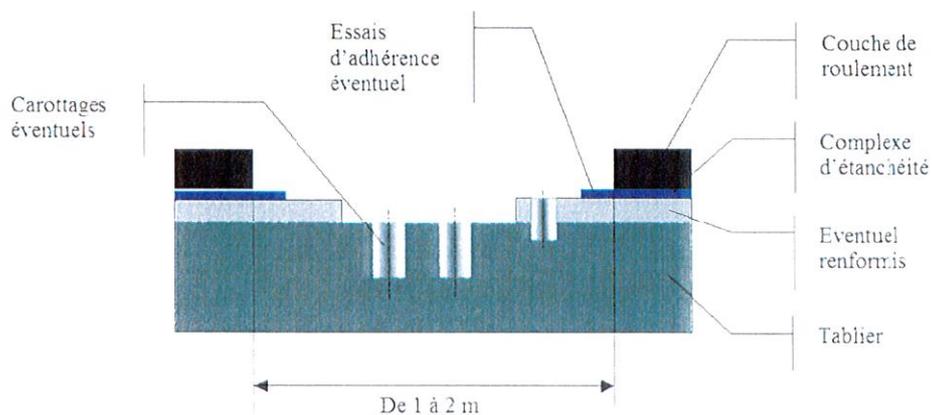


Figure 71. Principe de réalisation d'une fenêtre de reconnaissance

zones, sont alors effectués des prélèvements sur lesquels peuvent être envisagés les essais de caractérisation suivants : épaisseur des différentes couches, analyse granulométrique, teneur et identification du bitume, sensibilité à la température, etc. Ces investigations permettent de savoir si l'orniérage est dû à la couche de chaussée, au complexe d'étanchéité ou à un éventuel renfort ou reprofilage sous-jacent.

Remarque : cas d'une réfection

Outre celles réalisées dans le cadre d'un diagnostic préalable, les ouvertures de fenêtres de reconnaissance sont également recommandées durant la période de préparation des chantiers de réfection de chape d'étanchéité, de façon à permettre à l'entreprise de préciser ses procédures d'exécution (éventuelles difficultés d'enlèvement des différentes couches du complexe étanchéité / couche de roulement par exemple).

3.5 Les prélèvements et essais

3.5.1 Depuis les fenêtres de reconnaissance

Dans le cadre de l'évaluation de l'intégrité superficielle du béton du tablier et afin d'évaluer les risques de corrosion des armatures du tablier, il pourra être judicieux d'effectuer à partir de la fenêtre de reconnaissance, des prélèvements complémentaires par carottages et des mesures d'enrobage des armatures.

Les prélèvements permettent d'une part d'évaluer les propriétés du support (résistance à la compression, porosité, etc.) et d'autre part de réaliser des profils de pénétration des chlorures (issus des sels de déverglaçage par exemple), de mesurer la profondeur de carbonatation et d'obtenir le gradient de teneur en eau. Ces essais permettent d'évaluer de façon indirecte l'efficacité de la chape d'étanchéité (vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs).

Dans le cas où des phénomènes de décollement ou de défaut d'adhésion entre couches sont suspectés, des essais d'adhérence seront envisagés depuis ces fenêtres de reconnaissance.

Une attention particulière devra être portée à la réalisation des carottages pour ne pas endommager les armatures du tablier. Une localisation préalable des armatures est indispensable (pachomètre®, ferroskan®, radar ou système équivalent).

3.5.2 Depuis la couche de roulement

Les carottages effectués directement depuis la couche de roulement (figure 72) sont déconseillés car très difficiles à réparer et les informations recueillies sont moins intéressantes que celles obtenues à partir des fenêtres de reconnaissance (type de chape et épaisseur). La technique présente néanmoins un intérêt lié à sa rapidité de déploiement ; intérêt non négligeable au regard des contraintes d'exploitation de l'ouvrage.



Figure 72. Carottage depuis la couche de roulement

Ils doivent donc uniquement être réservés à la mesure de l'épaisseur des couches de chaussée et au diagnostic de l'intégrité du béton de tablier dans le cas où les contraintes d'exploitation de l'ouvrage ne permettent pas de disposer de suffisamment de temps pour ouvrir des fenêtres de reconnaissance.

Les modalités de réparation des carottages devront être étudiées en amont : le chapitre 4 donne à ce sujet un certain nombre de recommandations.

3.5.3 Essais de caractérisation des produits

À partir des fenêtres de reconnaissance, des prélèvements de matériaux peuvent être effectués. Un certain nombre d'essais physico-chimiques de laboratoire peuvent alors être réalisés. Les essais envisageables dépendent bien évidemment du résultat des investigations préalables mais surtout de la nature du complexe « étanchéité / couche de roulement ».

Cas d'une chape « Asphalte »

L'examen visuel en laboratoire (première étape) des tranches des échantillons prélevés permet généralement de visualiser chacune des couches (aspect et surtout granularité) et d'en mesurer (approximativement) l'épaisseur et surtout ses variations. La deuxième étape consiste à séparer et récupérer chacune des couches d'asphalte pour effectuer un essai d'indentation². Cette récupération se fait par sciage sur des tranches (2 à 3 cm) prélevées (par sciage également) sur l'échantillon primaire. Elle peut s'avérer délicate s'il y a interpénétration des couches d'asphalte et même être impossible en ce qui concerne la 1^{re} couche d'asphalte pur (8 mm) ; elle pose par contre moins de problème pour les couches épaisses (asphalte gravillonné de 22 mm ou monocouche asphalte de 15 mm). Or, ce sont souvent les anomalies de consistance que présentent ces couches qui génèrent les dysfonctionnements de type orniérage.

2. Cet essai est délicat à réaliser *a posteriori*, notamment sur chaque couche d'une bicouche asphalte. On notera que les valeurs obtenues sont habituellement plus faibles que celles d'origine du fait du vieillissement et/ou du reconditionnement de l'asphalte nécessaire à l'exécution de l'essai. Les résultats ne seront donc interprétés que sur la base de comparaison entre zones représentatives (saines / altérées par exemple).

Élément du complexe		Essai	Intérêt, résultats attendus
Couche de roulement (enrobé bitumineux)		Teneur en liant par dissolution à froid : comprenant une mesure de la teneur en bitume, de la teneur en eau et de la granulométrie (NF EN 12697-1(8)) Détermination du grade de bitume : - extraction du bitume (NF EN 12697-3(9)) - essai de pénétrabilité (NF EN 1426 (10)) - température bille anneau (NF EN 1427 (11))	- Interprétation de la tenue à l'orniérage - Teneur et caractéristiques du liant (fissuration, fluage ou ressuage) - Respect de la granulométrie spécifiée au marché
		Détermination de la masse volumique apparente (12)	Qualité du compactage
Chape d'étanchéité ³	Asphalte	Essai d'indentation (NF EN 12970 (13), NF T66-002 (13) et (13bis)) Granulométrie (14) (sur la couche de protection dans le cas d'une étanchéité de type FPA)	Respect des spécifications : tenue à l'orniérage, à la fissuration et au poinçonnement...
	FPM	Essais d'adhérence selon la norme (NF P 98 282 (15))	Adhérence de la feuille, possibilité de formation de gonfles
		Composition Dosage en polymères (spectrométrie IR)	Tenue à la fissuration, fragilisation de la feuille
	FMAS / SEL	Analyse par spectrométrie IR	- Identification du type de produit
MHC	Voir couche de roulement	Voir couche de roulement	
	Dosage en polymères (spectrométrie IR) Perméabilité du complexe à partir de carottage (16)	- Conformité du liant -Vérification des propriétés d'étanchéité	
Couche de reprofilage		Voir couche de roulement	Voir couche de roulement
Tablier béton		Détermination des propriétés du béton : - teneur en eau - porosité accessible à l'eau Évaluation de la pénétration des agents agressifs : - profil de pénétration des chlorures - profondeur de carbonatation Détermination de la probabilité de corrosion : - potentiel d'électrode - vitesse de corrosion	Diagnostic du risque de corrosion des armatures du tablier

Tableau 8. Essais de caractérisation à partir de prélèvements effectués depuis une fenêtre de reconnaissance

4. Recommandations pour le choix des techniques d'investigations

Le tableau n° 9 présente, pour chaque problématique, la pertinence et le degré de « maturité » des différentes méthodes d'investigations pour une application dédiée aux chapes d'étanchéité.

3. Pour les chapes de type « FPA », se reporter aux chapes « Asphalte » et « FPM ».

	Glissement	Gonflement	Déformations	Infiltrations d'eau	Décollement	Altération du béton support	Nature du système d'étanchéité	Caractéristiques géométriques du complexe étanchéité / couche de roulement	Propriétés du complexe étanchéité / couche de roulement
Examen visuel	++	+ (1)	++	++ (2)	0	0	0 (3)	0	0
Fenêtre de reconnaissance	+ (4)	+ (4)	+ (4)	0	+	++	++	++	+ (5)
Sondages carottés	0	0	+ (6)	0	0	+ (6)	+ (6)	+ (6)	+ (6)
Essais de caractérisation	0	0	+ xx	0	+ xx	+ xx	0	0	++ xx
Eau claire	0	0	0	++ xx	0	0	0	0	0
Eau colorée	0	0	0	++ xx	0	0	0	0	0
Analyse du dossier d'ouvrage	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)	++	+ (7)	+ (7)
Méthode RADAR	0	+ (8) 0	0	+ (9) x	+ (9) 0	+ (9) 0	0	++ xx	0
Thermographie infrarouge	0	+ (9) xx	0	+ (9) x	+ (9) x	0	0	0	0
Méthode COLIBRI		0		0	+ 0	+ 0	0	0	0
Méthode TUS	0	0	++ xx	0	0	0	0	0	0
Radiographie neutronique	0	0	0	+ (9) x	0	0	0	0	0

Tableau 9. Pertinence des investigations en fonction de la problématique

0 inadapté 0 recherche et développement
+ adapté x validé
++ très adapté xx éprouvé

(1) Sous réserve que le phénomène soit suffisamment important pour être détecté dans des conditions de températures et d'ensoleillement favorables.

(2) Sous réserve que l'infiltration d'eau se manifeste visuellement, ce qui peut ne pas être le cas systématiquement (« effet retard »).

(3) Sauf à certains endroits (étanchéité sous trottoirs par exemple).

(4) En complément de l'examen visuel et pour confirmer l'origine du phénomène.

(5) Évaluation qualitative de l'aspect visuel des différentes couches de matériaux et/ou produits.

(6) Uniquement si les conditions d'exploitation de la route ne permettent pas la réalisation de fenêtres de reconnaissance.

(7) Dans certains cas, il pourra s'avérer nécessaire de confirmer les données recueillies dans le dossier par des investigations.

(8) Sous réserve d'une étude de faisabilité et que le phénomène soit suffisamment important pour être détecté dans des conditions de températures et d'ensoleillement favorables.

(9) Sous réserve d'une étude de faisabilité préalable portant notamment sur l'épaisseur de la couche de roulement.

(10) Quelque soit la nature de la problématique, l'analyse du dossier d'ouvrage est incontournable.

5. La démarche de diagnostic

La figure 73 présente le synoptique général de la démarche de diagnostic de l'étanchéité d'un ouvrage en service.

La figure 74 précise la démarche dans le cas de l'examen visuel de la couche de roulement.

Enfin, la figure 75 précise la démarche de diagnostic dans le cas de l'évaluation de la fonction « étanchéité ».

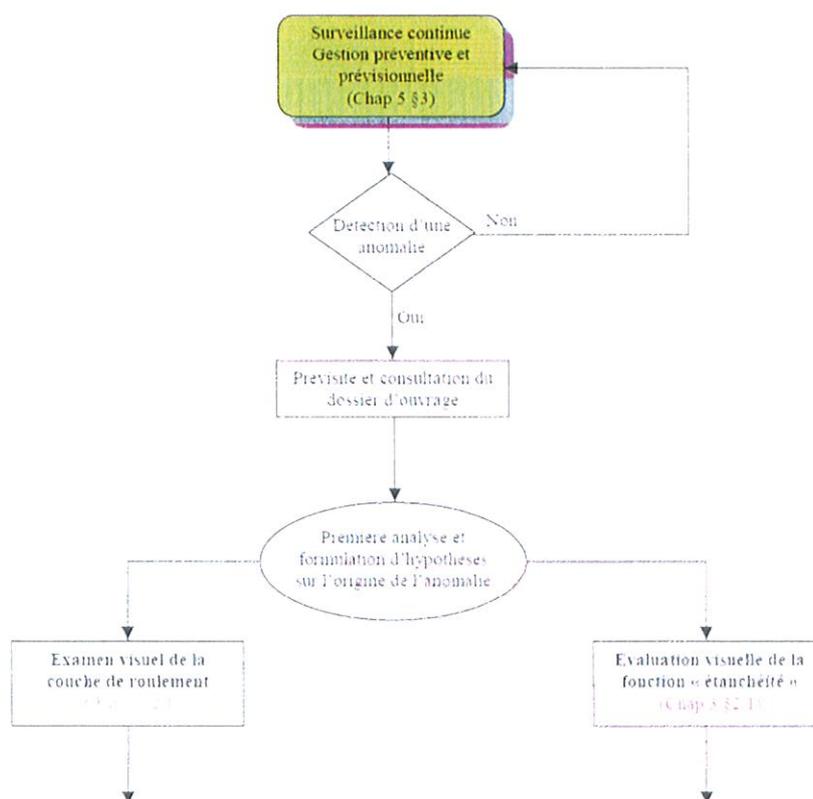


Figure 73. Synoptique général du diagnostic

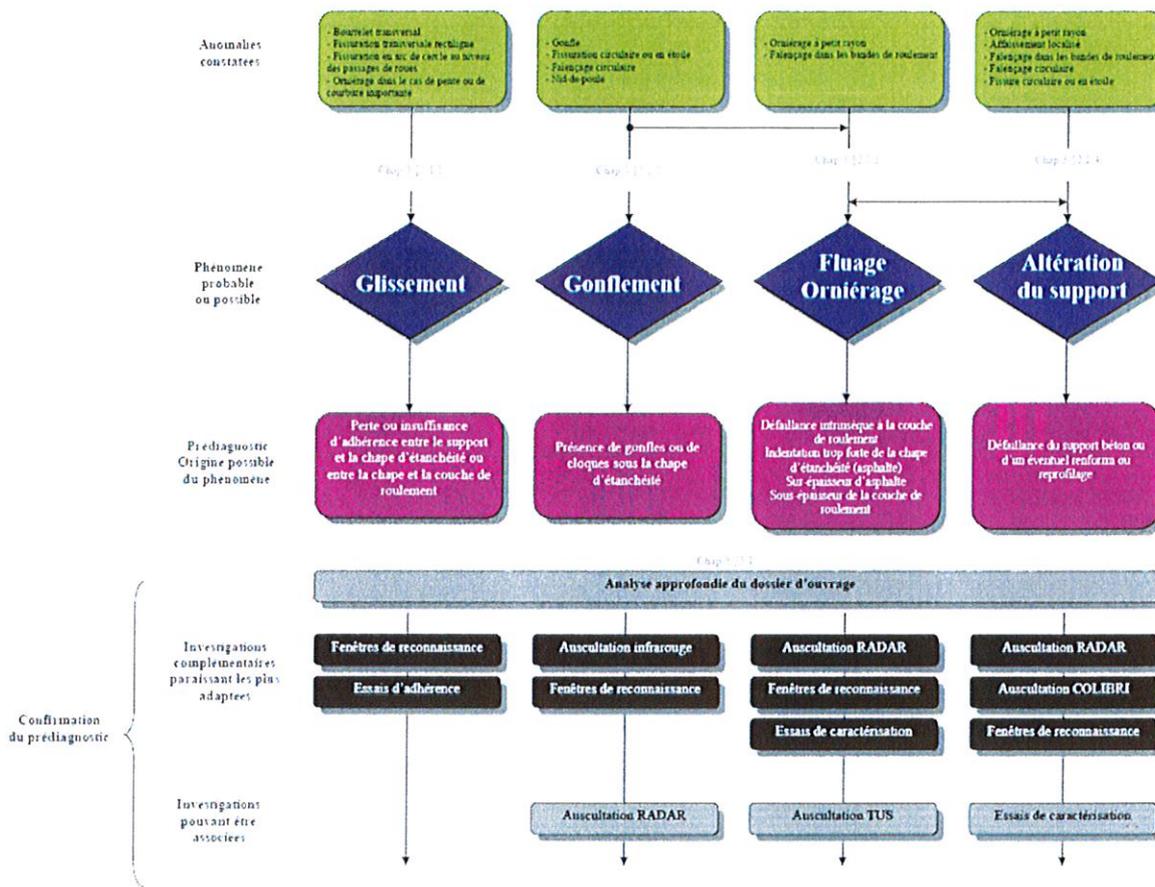


Figure 74. Synthétique du diagnostic dans le cas de l'examen visuel de la couche de roulement

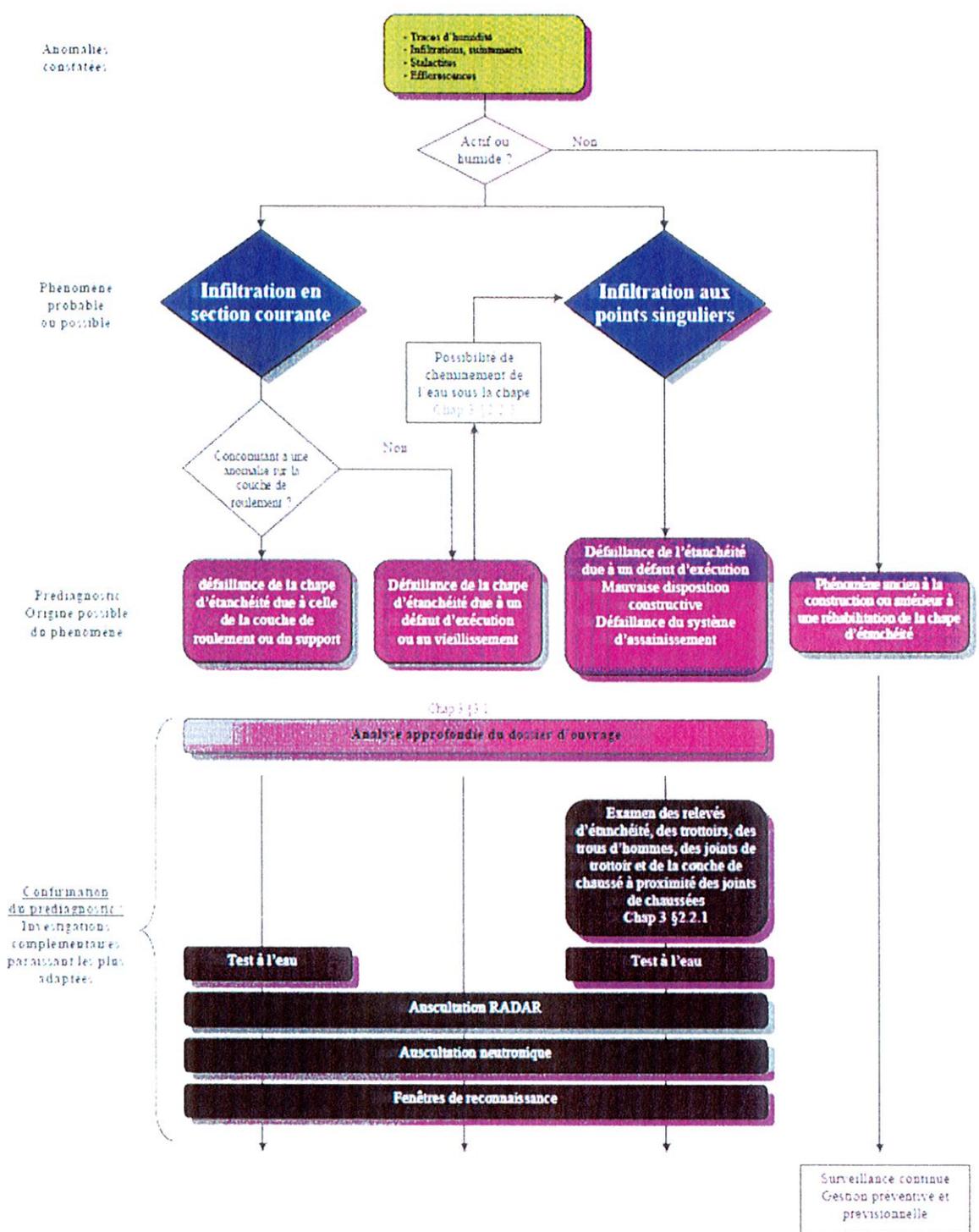


Figure 75. Synoptique du diagnostic dans le cas de l'évaluation visuelle de la fonction « étanchéité »

6. Bibliographie

[1] « Catalogue des dégradations de surface des chaussées », collection Techniques et méthodes des LPC, Méthode d'essai n° 52, complément à la méthode d'essai n° 38-2, LCPC, référence 502 376, mars 1998.

[2] « Relevé des dégradations de surface des chaussées », Techniques et méthodes des LPC, Méthode d'essai LPC n° 38-2, LCPC, mai 1997.

- [3] « *Entretien des complexes d'étanchéité /couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis* », collection Guide technique, LCPC, référence LCPC n° C1502448 RENFORMIS août 2006.
- [4] « *Prévention des pathologies courantes d'ouvrages d'art - Thème : Protection contre l'eau* », Catalogue de fiches destinées à contribuer à une amélioration de la conception des ouvrages d'art, collection Guide technique, Sétra / LCPC, décembre 98, réf. F9817.
- [5] Méthode IQOA, catalogues de désordres.
- [5bis] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, 2^e partie, dispositions particulières, fascicule 01 : dossier d'ouvrage, LCPC / Sétra.
- [6] R. Caron, ingénieur, Laboratoire régional de Lille, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 68, nov.-déc. 1973.
- [7] « *Mesure et interprétation du profil en travers* », collection Techniques et méthodes des LPC, Méthode d'essai n° 49, LCPC, septembre 2001.
- [7bis] « *Le contrôle non destructif de réception des chapes d'étanchéité des ponts routiers par thermographie infrarouge* », Bulletin Ouvrages d'Art du Sétra n° 56, novembre 2007, pp 24-27.
- [7tri] Cahiers techniques du bâtiment, n° 89, avril 1987.
- [8] NF EN 12697-1, *Mélange bitumineux – Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné – Partie 1 : teneur en liant soluble.*
- [9] NF EN 12697-3, *Mélange bitumineux – Méthode d'essai pour mélange hydrocarboné – Partie 3 : récupération des bitumes : évaporateur rotatif.*
- [10] NF EN 1426, *Bitumes et liants bitumineux : Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.*
- [11] NF EN 1427, *Bitumes et liants bitumineux : Détermination du point de ramollissement – Méthode Bille et Anneau.*
- [12] NF EN 12697-6, *Mélanges bitumineux, Méthodes d'essais pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.*
- [13] NF EN 12970, *Asphalte coulé pour étanchéité – Définitions, spécifications et méthodes d'essai.*
- [13bis] NF T66-002, *Essais d'indentation appliqués aux asphaltes.*
- [14] NF EN 12697-2, *Mélanges bitumineux, Méthodes d'essais pour mélange hydrocarboné à chaud, Partie 2 : Granulométrie.*
- [15] NF P 98 282, *Essais relatifs aux chaussées – Produits d'étanchéité pour ouvrages d'art – Mesure d'adhérence des produits au support – Essai en laboratoire ou in situ à vitesse de traction contrôlée.*
- [16] STER 81, mise à jour n° 1, « *Complexes d'étanchéité mis en œuvre par des moyens à haute cadence* », Sétra, juillet 1990.

CHAPITRE 4

SOLUTIONS DE RÉPARATION



1. La démarche de sélection des techniques de réparation

Une fois le diagnostic de la chape d'étanchéité établi (nature, origine, étendue et gravité des désordres), les différentes options de réparations (ponctuelles, particulières ou globales) doivent être envisagées. Le choix des modalités de réparation doit alors prendre en compte divers critères, tels que, par exemple :

- la quantité de défauts et la surface qu'ils représentent sur l'ouvrage. Pour cela il peut être intéressant de les regrouper par famille afin d'avoir une idée des zones incriminées selon le type de défaut, et de rapporter la surface « défectueuse » à celle de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage concernée. Il sera alors possible de déterminer si seule une zone particulière, si plusieurs zones localisées ou si toute la surface concernée par l'étanchéité sont à reprendre ;
- la nature et la localisation des zones concernées par ces défauts (relevés, jonction au joint de chaussée, avaloirs, trottoirs, section courante...);
- les conséquences éventuelles sur les éléments structurels des défauts d'étanchéité ;
- le degré d'urgence des réparations, dans le cas de défauts occasionnant des dégradations d'éléments de structure ;
- l'opportunité d'une phase de travaux programmée (réfection de couche de roulement, changement des joints de chaussée, modification du profil en travers, réfection des trottoirs...);
- la gêne occasionnée par les travaux, qu'elle affecte les usagers (nécessité du maintien de la circulation sur l'ouvrage, existence ou non d'itinéraire de substitution...) ou les riverains en zone urbaine (travaux bruyants et/ou réalisés de nuit) ;
- enfin la possibilité d'obtenir un financement pour les travaux à plus ou moins long terme.

La décision est alors prise, par le maître d'ouvrage gestionnaire, d'effectuer des réparations ponctuelles (traitement symptomatique), des réparations de zones particulières (relevés, avaloirs, trottoirs, points particuliers) ou une réfection générale.

Elle doit résulter d'un diagnostic et d'une réflexion prenant en compte tous les critères précédents. Il ne s'agit pas de retenir par exemple une solution de réparation ponctuelle sur de simples considérations économiques à court terme ; sauf si une réparation urgente s'impose pour le maintien de l'exploitation et la sécurité des usagers et que des travaux conséquents sont prévus à un moyen terme.

2. Les techniques de réparation

2.1 Réparation ponctuelle ou de zones particulières

Il faut différencier les réparations d'investigations destructives qui peuvent être succinctes car, la plupart du temps, temporaires (tout dépend de l'échéance des véritables travaux), des réparations destinées à perdurer.

En effet, cela peut aller du simple « rebouchage » afin de permettre l'exploitation de l'ouvrage, au véritable chantier de réparation.

Ces réparations seront réalisées en utilisant de préférence un procédé d'étanchéité identique, similaire ou compatible à celui existant. Le système d'étanchéité en place doit donc être connu avant de procéder à la réparation. Les réparations improvisées sont souvent inopportunes et finalement inefficaces.

Le tableau suivant présente, à titre indicatif, les possibilités d'association des différentes familles d'étanchéité :

En place \ Réparation	Asphalte	FPA	FPM	FMAS / SEL	MHC
Asphalte	+	+	+	-	
FPA	+	+	+	0	
FPM	-	0	+	0	
FMAS / SEL	-	0	0	+	
MHC					+

(+ : possible, 0 : sous conditions, - déconseillé, les cases vides correspondent à des solutions non envisageables).

Tableau 10. Possibilité d'associations des familles de procédés d'étanchéité

Bien qu'elles soient possibles, certaines associations pourront être délicates ou coûteuses à la réalisation.

Pour ce qui concerne les ouvrages anciens, le tableau précédent reste valable en considérant que certains systèmes sont assimilables aux familles citées : sable asphalte (Asphalte), bitume coulé en place (FPM ou FPA), résine brai-époxy (FMAS ou SEL) par exemple.

Les réfections locales sont rendues plus complexes du fait du raccordement à l'existant et des incertitudes s'y rapportant : état de l'existant après enlèvement de la couche de roulement, choix de la technique permettant un raccordement de bonne qualité. Cette complexité doit donc conduire à une vigilance accrue lors de la réalisation des travaux (§ 3).

2.1.1 Réparation de zone dégradée en partie courante et de fenêtre de reconnaissance

Ce paragraphe traite de la réparation ponctuelle des zones dégradées en partie courante et des fenêtres de reconnaissance (voir chapitre 3).

Les réparations ponctuelles en partie courante sont traitées par zone et par type de chape d'étanchéité dans la mise à jour n° 2 du STER 81 « Réfection des étanchéités et des couches de

roulement des tabliers d'ouvrage d'art – réparations localisées » (1). Ce même document peut être utilisé pour déterminer le principe de réparation des fenêtres de reconnaissance en fonction du type de chape en place. Il décrit, à l'aide de schémas de principe, les différentes phases d'une procédure de réparation.

La réparation provisoire de la couche de roulement peut être réalisée par mise en œuvre d'enrobé à froid (surface très restreinte) ou mieux d'enrobé à chaud même s'il n'est pas mis en œuvre au finisseur et si l'atelier de compactage n'est pas correctement défini. Dans la plupart des cas, le compactage sera assuré par l'utilisation d'une plaque vibrante.

Pour la pérennité de la réparation, le soin apporté à la réalisation de la chaussée doit être identique à celui de l'étanchéité.

Dans le cas d'utilisation d'un procédé d'étanchéité comprenant de l'asphalte (Asphalte ou FPA) et si les quantités à mettre en œuvre ne sont pas inférieures à la capacité d'un pétrin (3 tonnes), l'utilisation de ce matériau pour la reprise de la couche de roulement est envisageable. Cette solution permettra de s'affranchir d'un approvisionnement en enrobé toujours difficile pour des surfaces restreintes.

2.1.2 Réparation des carottages

La technique de réparation à envisager est fonction du diamètre des carottages. Pour les carottages courants (diamètre 80 à 160 mm), la réparation peut être effectuée à l'aide de bitume modifié par des polymères (BmP) en fond de carottage et de mortier sans retrait ou d'enrobé en partie supérieure (figure 76). Cette disposition est comparable à la réparation locale d'un MHC proposée dans la mise à jour n° 2 du STER 81 (1).

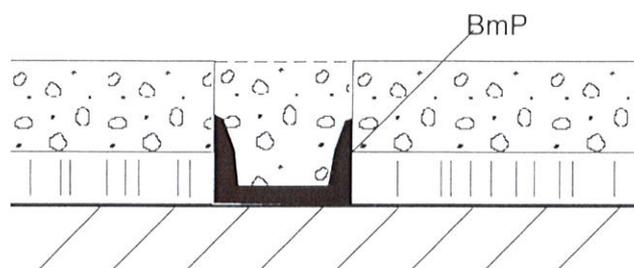


Figure 76. Réparation de carottage (d'après la figure 1.2.5. b) du document « Réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – Réparations localisées », STER 81 - Mise à jour n° 2, Sétra, référence F0112, mai 2001.)

Si la carotte n'est pas utilisée par ailleurs (cas de carottage pour réalisation d'essais d'adhérence ou étalonnage pour mesure d'épaisseur au RADAR par exemple), elle pourra alors être remise en place en utilisant du liant bitume polymère pour le « scellement ». Dans le cas rare de carottages de très grand diamètre, on se référera aux techniques de réparation des fenêtres de reconnaissance (voir § 2.1.1).

2.1.3 Réparation de l'étanchéité de trottoirs

Deux cas de figure se présentent selon la nature des trottoirs :

2.1.3.1 Les trottoirs faisant partie intégrante de la structure

Dans ce cas, l'étanchéité est réalisée de manière à être continue avec celle du tablier, bien qu'elle puisse être de nature différente (attention à la compatibilité entre procédés).

Le relevé est protégé par une bordure, ce qui induit une réduction de l'emprise de chaussée, ou par une cornière (plus fragile) ou tout autre moyen (figure 77).

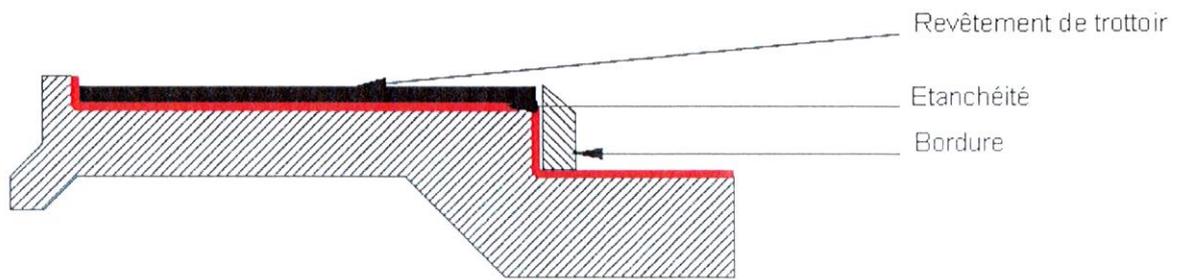


Figure 77. Trottoir faisant partie de la structure

S'il est envisagé de ne traiter les trottoirs que par projection de résine en surface, cette dernière ne peut être réalisée que si l'ensemble de la procédure de traitement, et en particulier l'emplacement des joints (reprises de bétonnage), les solutions d'arrêt du film (ancrage) et les recouvrements entre procédés d'étanchéité, est fixé.

Dans ce cas il y a cumul de fonctions : le revêtement de surface est l'étanchéité (chapitre 1 § 3.4).

La sécurité des piétons doit de plus être prise en compte : la surface en résine projetée devra recevoir un traitement antidérapant approprié. Dans le cas où le trafic piéton serait important, l'étanchéité pourra être réalisée en résine et la couche de circulation pourra être constituée d'asphalte, sous réserve que l'on ait bien pris soin de vérifier la tenue de la résine d'étanchéité à la température par la réalisation d'une convenue avant le début des opérations.

2.1.3.2 Les trottoirs constituant une réservation

Cette réservation permet généralement le passage de réseaux divers.

Si ces derniers sont noyés dans un gros béton, la réservation est comblée, on se retrouve dans le cas cité ci-dessus.

Si la réservation n'est pas comblée, deux cas de figure se présentent :

- On souhaite conserver la conformation exacte du trottoir (maintien de l'obturation du trottoir par des dalles pour la facilité d'accès par exemple) : le traitement sera équivalent à celui décrit dans les schémas ci-dessous.

Selon l'exiguïté, on privilégiera une étanchéité en FMAS / SEL ne nécessitant pas d'engravure (figure 78), ou éventuellement une FPM avec engravure (figure 79) ou solins métalliques (figure 80).

Nota 1 : le traitement des relevés est présenté au § 2.1.5.

Nota 2 : dans le cas où un passage de roue sur les dalles est possible, il est préférable de combler le caniveau afin de protéger les réseaux.

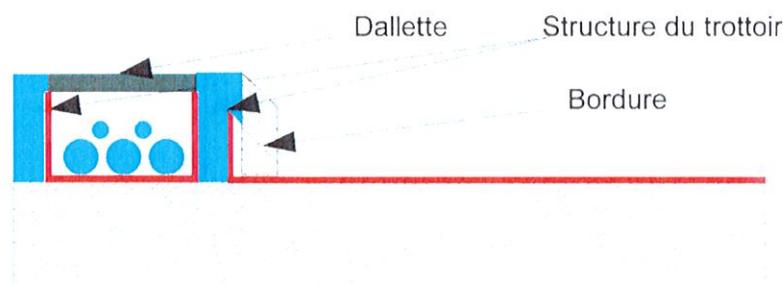


Figure 78. Étanchéité en FMAS/SEL sans engravure

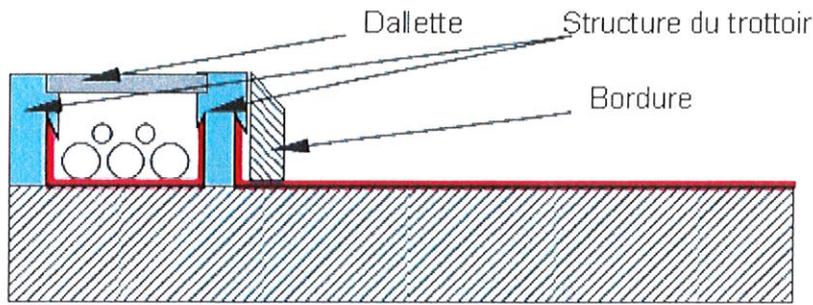


Figure 79. Étanchéité en FPM avec engravure

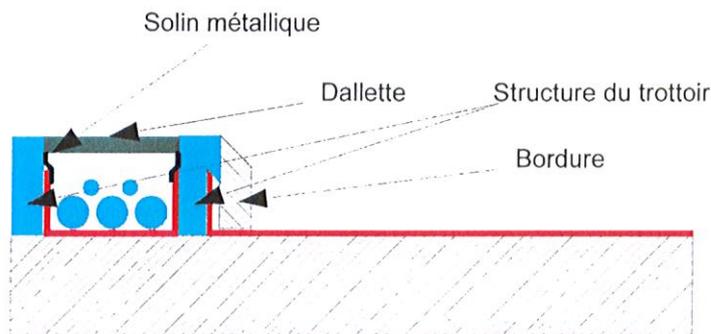


Figure 80. Étanchéité en FPM avec solins métalliques

► À terme, le trottoir sera comblé :

si la contre-bordure peut être éliminée (à n'entreprendre qu'une fois évaluées les répercussions éventuelles sur la remise en place du dispositif de retenue), l'étanchéité sera réalisée sur le tablier jusqu'à la corniche ou contre-corniche avec reconstruction d'une longrine et remplissage du trottoir afin de transmettre les efforts en cas de choc (figure 81). Les contre-bordures étant généralement ancrées, il conviendra de procéder à un traitement spécifique du support (repiquage du béton, recépage des aciers...). Dans le cas contraire, le remplissage est effectué et l'on se réfère au cas où les trottoirs font partie intégrante de la structure (§ 2.1.3.1).

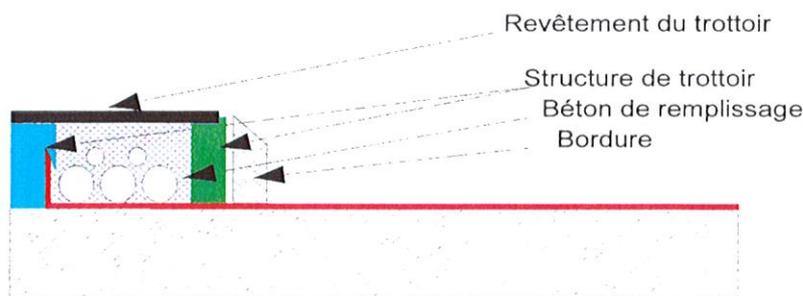


Figure 81. Trottoir constituant une réservation comblée avec étanchéité générale jusqu'à la corniche ou contre-corniche

En complément, le guide du Sétra sur « *Le traitement des trottoirs sur les ouvrages et aux abords immédiats* » (2) donne des indications sur les modalités de traitement des trottoirs.

Enfin, dans le cas où des modifications des dispositifs de retenue ou de leur support (longrine, ou structure de trottoir par exemple) sont nécessaires, les documents relatifs aux barrières de sécurité (3 et 4) pourront être consultés dans la collection du Guide technique GC.



Figure 82. Trottoir avec fourreaux, dont la bordure a été enlevée

2.1.4 Reprise de l'étanchéité au droit du joint de chaussée

2.1.4.1 Principes généraux

100

Le traitement de l'étanchéité et la réalisation de la couche de roulement au droit des joints de chaussée font l'objet de dispositions particulières définies dans des documents types ou dans les avis techniques relatifs aux joints de chaussée considérés (5) et (5bis).

Ces dispositions sont mises en œuvre sous la responsabilité du poseur du joint pour la partie relative au joint de chaussée et par l'entreprise en charge de ce poste pour la partie enrobé.

Lors des réfections partielles des couches du complexe étanchéité/roulement, on doit s'efforcer de reconstituer cet aménagement pour assurer la pérennité des couches de roulement et l'efficacité de l'étanchéité.

Dans le cas d'une réfection complète de l'étanchéité, il est recommandé de remplacer les joints de chaussée.

2.1.4.2 Les exigences au cours de cette intervention

À l'occasion de ces opérations de réparation au droit d'un joint de chaussée, on distinguera les exigences suivantes :

► Précautions lors de l'enlèvement des couches :

L'enlèvement des couches existantes est, le plus souvent, effectué par rabotage. Si cette opération est menée sans précautions compte tenu de la précision des grosses machines utilisées en section courante, le joint en place peut être endommagé (en particulier le solin).

De même, on observe souvent des encrassements entre les éléments du joint par les reliquats de « fraisats » qui peuvent en bloquer le fonctionnement et entraîner des dégradations des profilés néoprène non protégés ou du joint par la lame de la raboteuse.

La conduite et le choix du matériel d'enlèvement doivent donc être adaptés à ce type d'intervention.

► Rétablissement du drain et de la connexion du joint avec l'étanchéité :

L'opération doit aussi permettre de reconstituer d'une part la « fermeture » de l'étanchéité telle qu'elle avait été initialement réalisée, et d'autre part, la fonction de drainage de l'enrobé quand le profil en long de l'ouvrage le rend nécessaire (rappel : la présence d'un drain est fonction de la pente longitudinale de l'ouvrage).

Exigences relatives au nivellement : il est beaucoup plus délicat de caler un revêtement, surtout compacté, au ras d'une arête comme celle d'un joint. Or l'objectif d'aboutir à un nivellement rigoureux du tapis par rapport au joint en place est difficile à atteindre si des procédures spécifiques ne sont pas adoptées (figure 83).

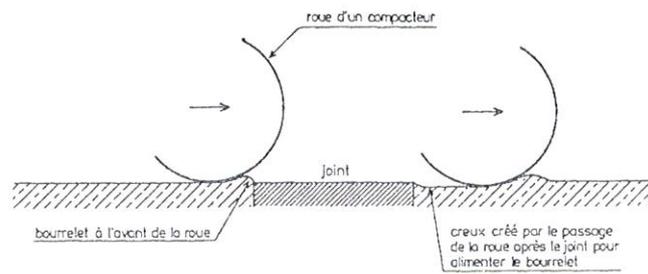


Figure 83. Conséquence du passage d'un compacteur au ras d'une arête

Il est rappelé que, dans ce contexte, l'exigence fixée par le guide « joint » est un calage à ± 2 mm (par rapport à la ligne idéale de la surface du revêtement aux abords).

À ce titre, et c'est la règle en général, la pose des joints doit être effectuée après réalisation de l'étanchéité et de la couche de roulement. On s'efforcera donc de respecter cette règle car c'est la seule qui permette un réglage correct des niveaux entre le joint et son environnement. S'il est impossible de respecter ce phasage, les procédures décrites ci-après peuvent être appliquées.

2.1.4.3 Les procédures proposées

Pour répondre aux exigences répertoriées au § 2.1.4.2, il convient d'adopter et d'imposer dans le marché de réfection des couches de roulement, les étapes suivantes (cas d'un enlèvement total ou partiel des couches) :

► Première étape : enlèvement total ou partiel des couches de roulement

On procède à l'enlèvement des couches de roulement, sur l'épaisseur totale ou sur une partie de l'épaisseur. Ceci avec les moyens adaptés à la section courante. L'opération sera arrêtée à environ un mètre de l'arête du joint ou du solin (figure 84).

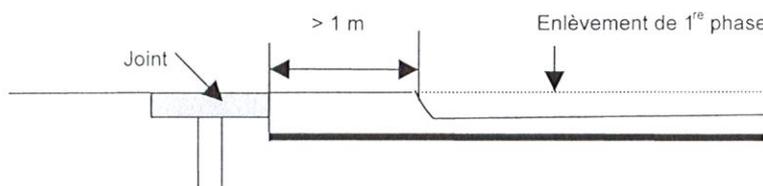


Figure 84. Principe d'enlèvement des couches de roulement à proximité d'un joint de chaussée (étape 1)

Nota : Dans le cas de l'enlèvement total de la couche, on se référera au § 3.1.

► Deuxième étape : rabotage de finition

On vient, à l'aide d'engin plus manœuvrant, raboter la couche restante, voire finir le travail manuellement. Il existe, à cet effet, des raboteuses travaillant en un mètre de large environ (figures 85 et 86).



Figure 85. Exemple de machine de rabotage avec plaque de chauffe en petite largeur

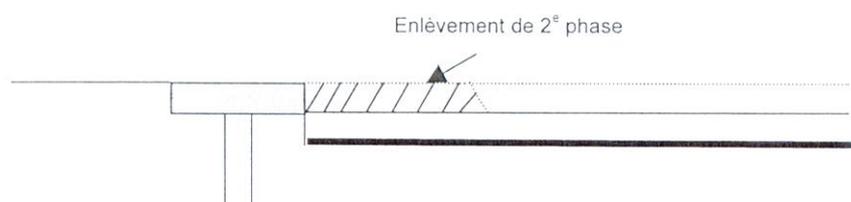


Figure 86. Principe d'enlèvement des couches de roulement à proximité d'un joint de chaussée (étape 2)

► Troisième étape : reconstitution de la fermeture de l'étanchéité

Cette étape n'existe qu'en cas de rabotage de la couche de roulement jusqu'à la fermeture de l'étanchéité (fortement déconseillé sans remplacement du joint de chaussée) et en cas de changement du joint de chaussée.

Par ailleurs, on n'oubliera pas de s'assurer du débouché du drain au travers du joint ou du tablier si l'on veut que celui-ci fonctionne correctement. *A priori*, le raccordement à l'évacuation du drain existant peut être envisagé, si celle-ci n'est pas colmatée.

► Quatrième étape : mise en œuvre de l'enrobé

Enfin, la couche de roulement est réalisée avec un atelier de mise en œuvre de l'enrobé et un atelier de compactage qui permettent de respecter les tolérances fixées ci-dessus (± 2 mm par rapport aux arêtes du joint). Il est conseillé de disposer d'un petit compacteur travaillant parallèlement à l'axe du joint (figure 87).



Figure 87. Exemple de compactage parallèlement à l'arête du joint afin d'éviter la formation du bourrelet à ce niveau

2.1.5 Réparation des relevés

2.1.5.1 Configurations possibles et techniques de réparation correspondantes

Les relevés peuvent être apparents, assez facilement accessibles (derrière une bordure de trottoir) ou inaccessibles (au niveau de la corniche ou de la contre-corniche sous un trottoir rempli (figure 81).

Lorsqu'ils ne sont pas accessibles, le diagnostic et, par conséquent, la technique de réparation sont difficiles à établir.

Les schémas ci-dessous illustrent les types de relevés le plus fréquemment rencontrés.

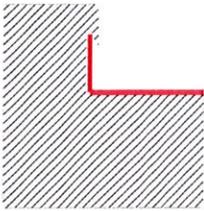


Figure 88. Relevé dans une engravure

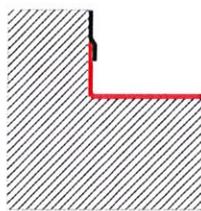


Figure 89. Relevé protégé par une bande de solin métallique

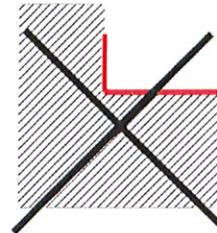


Figure 90. Relevé sans protection

Les relevés représentés en figures 88 et 89 sont conformes. La représentation en figure 90 n'est pas conforme car il n'y a pas de protection du relevé et il y a possibilité d'un passage d'eau à l'interface support/relevé.

D'une manière générale, trois cas de figure se rencontrent selon les types de désordres et/ou de non-conformités observés sur les relevés :

► Absence de protection du relevé (figure 91)

La réalisation d'une protection s'impose. Dans le cas où une réduction de l'emprise de la chaussée est impossible, des solutions alternatives à la mise en place de bordures doivent être envisagées. La mise en place d'une protection métallique peut s'avérer judicieuse dans ce cas. Cette dernière devra être conforme au STER 81 (1).

On gardera à l'esprit que, sur des itinéraires où est réalisée de la viabilité hivernale, une protection trop fragile pourra être endommagée par la lame des engins. À ce titre, un solin métallique (figure 92) ne constitue pas une protection adaptée face aux chocs de roues ou aux lames d'engins de déneigement.



Figure 91. Relevé d'étanchéité non protégé et dégradé

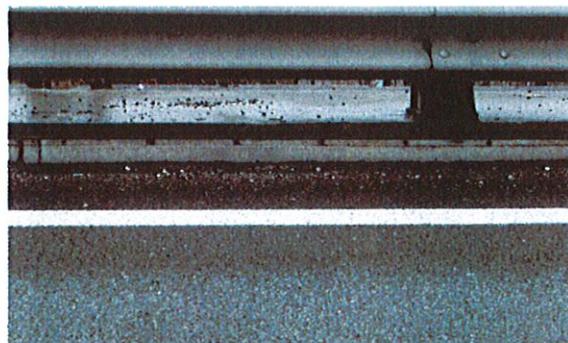


Figure 92. Protection du relevé par cornière métallique

➤ Hauteur insuffisante du sommet de l'étanchéité :

Lorsque le relevé d'étanchéité est de hauteur insuffisante et que l'engravure le permet, il est possible de le rehausser en vérifiant la compatibilité des systèmes (par rajout d'une bande en feuilles préfabriquées, application de résine...).

Lorsque c'est la configuration même de l'engravure qui ne permet pas d'avoir une hauteur de relevé suffisante (erreur de conception), il est possible d'éliminer le becquet par sciage ou remplissage, puis d'effectuer un recouvrement à l'aide d'un FMAS / SEL ou encore de mettre en place un solin métallique de protection en fonction de la hauteur disponible (figure 96). Dans certains cas, ces modifications sont impossibles et nécessitent une réflexion plus approfondie, éventuellement en envisageant un réaménagement de la zone (figure 93).



Figure 93. Relevé inexistant, cunette

➤ Géométrie, état du becquet et/ou état de surfaces inadéquats

Dans le cas d'un état de surface non satisfaisant, on se reportera au § 3.2.1 pour le traitement.

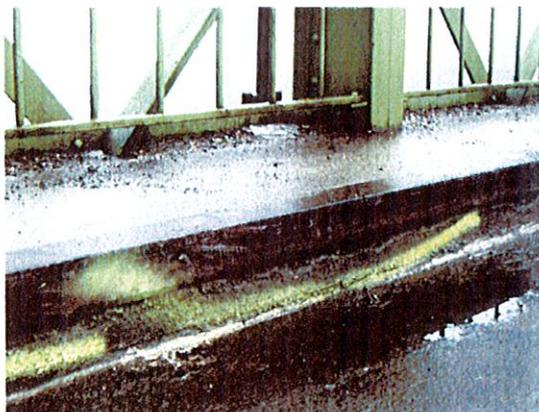


Figure 94. Relevé avant réparation
(présence d'une cornière métallique)

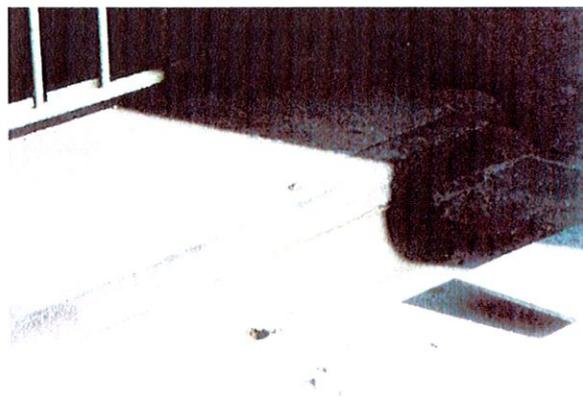


Figure 95. Réparation du relevé
en mortier hydraulique

Si le becquet est dégradé sur un grand linéaire, il est également possible de l'éliminer par sciage ou remplissage, puis d'effectuer un recouvrement à l'aide d'un FMAS / SEL ou encore de mettre en place un solin métallique de protection en fonction de la hauteur disponible (figures 96 et 97).

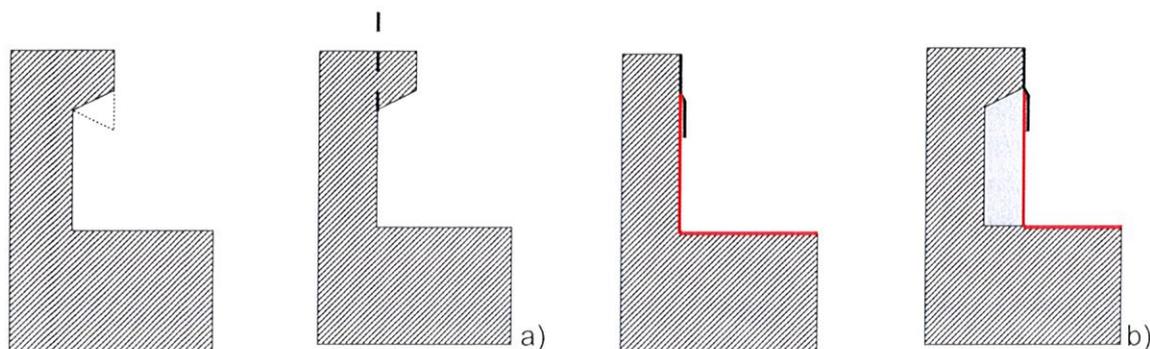


Figure 96. Réparation d'un becquet dégradé par sciage a) ou remplissage b) et mise en place d'un solin métallique

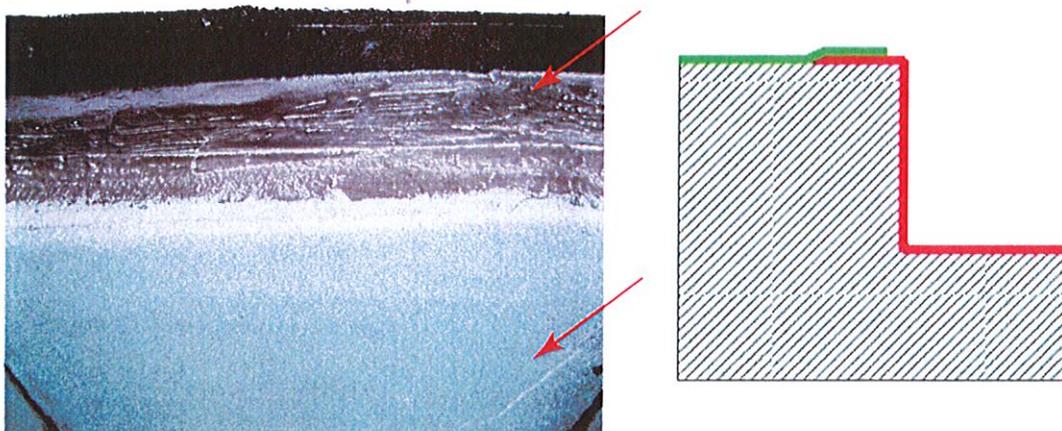


Figure 97. Réparation d'un relevé par sciage du becquet et recouvrement de l'étanchéité en feuille par un FMAS/SEL

Dans le cas où une réparation ponctuelle des relevés s'impose (figure 98), il est possible d'adapter les techniques décrites ci-avant.



Figure 98. Nez d'engravure cassé

2.1.5.2 Modalités de réfection des relevés d'étanchéité à l'arrière de bordures de trottoir

Lorsqu'ils se trouvent derrière une bordure de trottoir, la réfection des relevés comprend les étapes suivantes :

- sciage du mortier de scellement des bordures à l'arrière de celles-ci et entre elles tout en prenant garde de ne pas blesser l'étanchéité et surtout de ne pas entamer le support ;
- réalisation d'un trait de scie dans les enrobés afin de délimiter la zone de recouvrement de la future étanchéité du relevé avec celle en place. La largeur de cette zone est fonction du type de procédé d'étanchéité en place (voir les schémas du document 1) : une zone trop exiguë ne permettra pas la mise en œuvre dans de bonnes conditions d'une FPM par exemple. Le type de remplissage dépendra également de cette largeur ;
- basculement des bordures de trottoir, manuellement ou à l'aide d'une mini-pelle par exemple, afin d'avoir accès au relevé ;
- enlèvement du mortier de scellement ;
- réfection du relevé conformément au § 2.1.5.1 ;
- mise en place des bordures et reconstitution de la zone contiguë : la mise en œuvre d'enrobé est possible mais les quantités sont faibles et le compactage ne sera pas optimal.

La création d'un caniveau asphalté constitue une solution intéressante. La mise en place d'un drain longitudinal contre les enrobés est fondamentale (§ 2.2.1 du document (1)). Lorsque le procédé d'étanchéité est à base de FPM, il convient de mettre en œuvre une première couche d'asphalte de faible épaisseur qui jouera le rôle d'écran thermique lors de la mise en œuvre du complément d'épaisseur d'asphalte (figure 99) ;

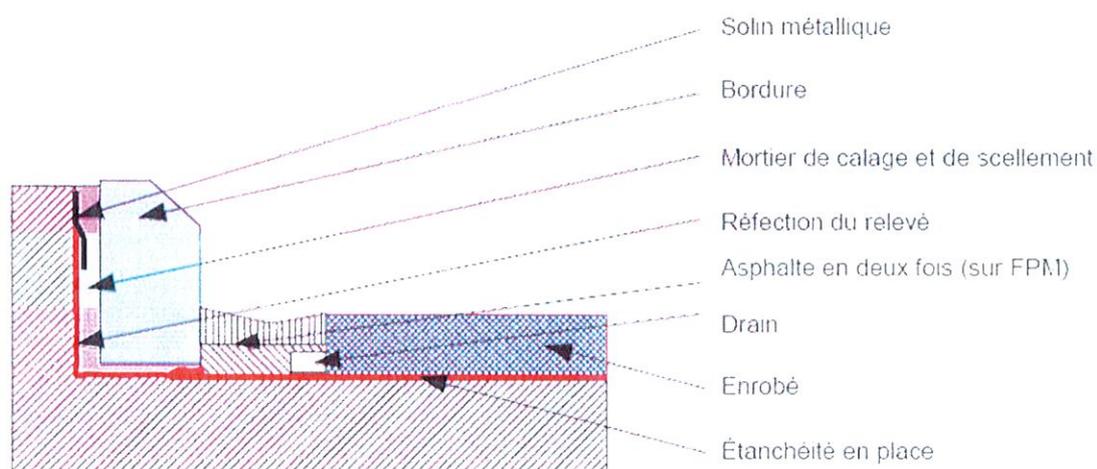


Figure 99. Schéma type de reprise du relevé sur un procédé FPM

2.1.6 Traitement des jonctions aux traversées

Quel que soit le type de traversées d'étanchéité rencontrées (raccordement à une gargouille ou à un avaloir vers une corniche-caniveau), leur traitement s'effectue toujours sur le même principe. Il s'agit de prendre en « sandwich » une platine solidaire de la traversée entre deux couches du procédé d'étanchéité. Ce principe est décrit ci-après dans le cas des descentes d'eau pluviales sur un tablier (figure 100).

La platine est mise en place dans une réservation afin de ne pas faire obstacle à l'écoulement de l'eau (attention au respect des valeurs d'enrobage des armatures dans ces zones).

Dans le cas d'une trappe de visite ou d'accès à une chambre de minage, il convient de s'interroger sur l'intérêt de leur maintien ou de leur obturation.

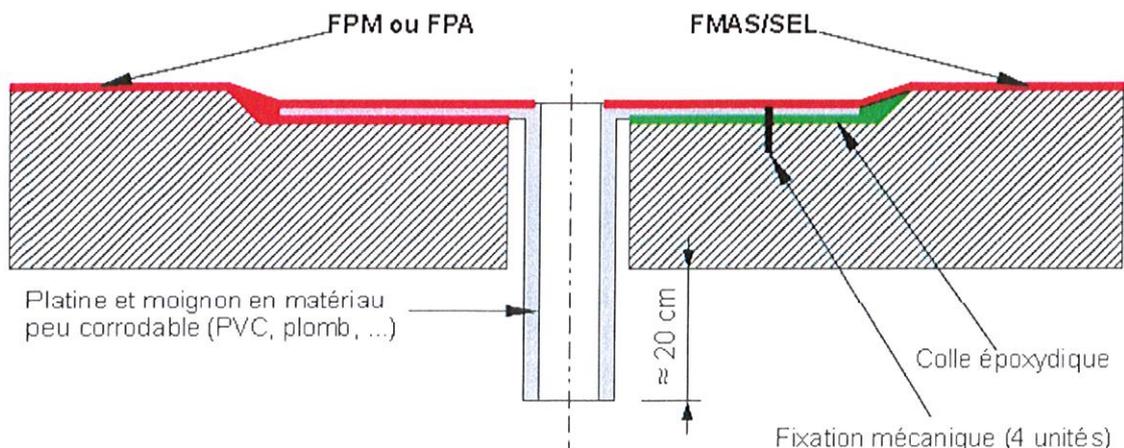


Figure 100. Traitement d'une descente d'eau pluviale sur un tablier

2.2 Réparation globale du complexe

Lorsque la décision est prise de réaliser une réfection globale du complexe « étanchéité / couches de roulement », il s'agit alors d'un projet complet.

Dans le cas où la réfection du complexe s'inscrit dans une intervention beaucoup plus large ou concomitante à d'autres opérations, on veillera à ne pas négliger l'importance de la phase de travaux d'étanchéité, vis-à-vis des autres phases.

Les défaillances de la chape d'étanchéité ne sont souvent révélées que lorsque des dégradations apparaissent sur les couches de roulement ou sur la structure porteuse sous-jacente. Se focaliser uniquement sur la réfection de l'étanchéité peut alors être insuffisant. Il conviendra donc d'intégrer, dans le projet, le traitement des éventuelles dégradations subies par l'ouvrage par ailleurs.

De plus, il pourra être pertinent de profiter des travaux d'étanchéité pour remettre à niveau ou en conformité certains équipements ou autres points particuliers comme par exemple :

- le rehaussement de la hauteur des relevés à l'occasion de la réfection des trottoirs ou de la longrine supportant les dispositifs de retenue ;
- la réparation ou le changement des joints de chaussée à l'occasion du renouvellement des couches de roulement comme le rappelle la note d'information n° 24 du Séttra, « Propositions d'actions pour le remplacement des joints de chaussée sur ouvrages en service » (6).

La réfection de l'étanchéité des ouvrages comportant un renformis constitue un cas particulier pour lequel on se reportera au guide technique du LCPC « *Entretien des complexes étanchéité / couches de roulement sur ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis sous la chape d'étanchéité* » (7).

De nombreux éléments sont à prendre en compte lors de l'établissement du projet de réparation. Ils doivent permettre notamment de statuer sur la nécessité d'entreprendre d'autres travaux et de juger de la pertinence et de la faisabilité de reconduire le complexe « étanchéité / couche de roulement » en place.

2.2.1 Connaissance de l'ouvrage

L'accès à tous les documents pouvant apporter des informations sur l'ouvrage (chapitre 3) est capital. Il peut s'agir d'éléments portant sur :

- sa construction, y compris des modifications qui ont pu y être apportées à ce stade (adaptations, malfaçons, traitements d'anomalies, etc.) ;
- des modifications ultérieures (précontrainte additionnelle, attelage de travées, réparations, renforcements, élargissements, etc.).

2.2.2 Connaissance des contraintes

2.2.2.1 Contraintes liées à l'ouvrage

a) La capacité portante de l'ouvrage

Il convient tout d'abord de s'assurer que l'ouvrage a une capacité portante suffisante. Cette donnée va permettre de déterminer l'épaisseur admissible du complexe étanchéité/enrobé. Deux cas de figure sont possibles :

- la capacité portante de l'ouvrage est adaptée aux épaisseurs du complexe telles que prévues par les textes, les documents et avis techniques (8).
- l'ouvrage, compte tenu de l'emploi de règles de calcul inadaptées lors de la conception ou de défaut de prise en compte de certains effets des matériaux (fluage du béton, relaxation de la précontrainte par exemple), de son âge, des dégradations subies et de l'évolution du trafic, ne peut accepter qu'une certaine épaisseur de complexe « étanchéité / couche de roulement ».

b) Les épaisseurs du complexe « étanchéité / couche de roulement »

Il convient ensuite de déterminer le type et l'épaisseur du complexe en place. Ces éléments conditionneront les moyens d'enlèvement (rabotage, par ex.) ainsi que leur coût. Sur certaines structures, ces épaisseurs peuvent varier sur la longueur de l'ouvrage du fait, par exemple, de rechargements effectués pour reprendre *a posteriori* les déformations différées. C'est, notamment, le cas des ponts à poutres préfabriquées précontraintes de type VIPP ou similaire.

Des imperfections de constructions peuvent aussi avoir conduit, à l'époque de la construction, à la mise en œuvre localisée ou générale d'un reprofilage.

Sur les ouvrages relativement anciens construits avec un profil en travers horizontal et dont la pente transversale était réalisée ensuite par un renformis en béton, il importe de bien connaître son épaisseur et son état afin de définir avec précision le contenu de la réparation : renformis laissé en place, enlevé, selon quelles modalités, etc.

c) L'effet des gradients thermiques

L'effet des gradients thermiques introduits par la mise en œuvre d'enrobé chaud sur l'ouvrage doit également être pris en compte. Cette considération est en général peu contraignante pour une majorité d'ouvrages. Il existe néanmoins une petite population de structures, comme les ponts entièrement métalliques et certains ponts mixtes, qui peuvent être sensibles aux apports thermiques d'un asphalte à 210 °C et/ou d'une chaussée en enrobé à 160 °C environ.

d) Spécificités de certaines structures

De même, de très rares structures (les ponts suspendus par exemple) ne tolèrent pas de déchargement/chargement généralisé et/ou dissymétrique et demandent donc une réflexion spécifique sur les modalités d'enlèvement et de mise en œuvre du complexe « étanchéité / couche de roulement ».

La nature de l'ouvrage peut également restreindre le choix du type d'étanchéité à mettre en œuvre. Ainsi, le guide de conception « Ponts mixtes – recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles », Sétra (9) au chapitre 7 préconise une étanchéité de type adhérent au support compte tenu de la présence d'une fissuration du hourdis causée par l'existence d'un retrait gêné. Ainsi les étanchéités en adhérence totale de type FPM, FPA et FMAS / SEL sont seules recommandées pour ces ouvrages.

Cette préconisation serait de bon aloi pour tous les ouvrages disposant de câbles de précontraintes « relevés » en face supérieure de dalle.

e) La géométrie de l'ouvrage

Les dernières considérations à prendre en compte sont celles liées à la géométrie de l'ouvrage :

- les pentes transversales et/ou longitudinales sont-elles à même d'assurer un drainage efficace sur l'ouvrage ? Faut-il envisager la création de pentes par la réalisation d'un

reprofilage ? Faut-il ajouter des évacuations par percements au travers de l'ouvrage, ou autre(s) solution(s) à étudier ?

- les relevés de l'étanchéité sont-ils d'une hauteur satisfaisante (§ 2.1.5) ?
- comment est réalisée l'étanchéité au niveau des trottoirs (§ 2.1.3) ? Est-elle accessible ? Des réseaux de concessionnaires sont-ils présents (gaz, eau, communication, etc.) ?
- y a-t-il des contraintes de raccordement de l'étanchéité au droit des points singuliers (gargouilles, avaloirs de corniches caniveaux, ancrage de dispositifs divers, etc.) ?

Parmi ces points singuliers, le traitement des relevés au pied des longrines des barrières de sécurité ou du raccordement de l'étanchéité à ces ancrages de barrières doit également faire l'objet d'une attention particulière. À l'occasion de la préparation du marché, l'intérêt de remettre à niveau ou en conformité ces dispositifs doit ainsi être évalué.

Sur les ouvrages anciens, la présence de trappes ou de tampons d'accès (à une chambre de minage par exemple - figure 101) peut rendre délicates les modalités de réparation de l'étanchéité. Elle doit donc être identifiée le plus en amont possible dans le projet de réparation.



Figure 101. Accès à une chambre de minage découvert lors de l'enlèvement des enrobés

2.2.2.2 Contraintes liées à la situation de l'ouvrage

Toujours dans l'optique de choisir le complexe d'étanchéité le mieux adapté au contexte, il convient d'étudier l'environnement actuel de l'ouvrage.

Sur certains ouvrages (en montagne par exemple), le climat, l'exposition de l'ouvrage, l'existence d'une forte amplitude thermique dans la journée sur certaines zones... doivent être pris en compte car certains procédés d'étanchéité ne peuvent pas être réalisés de façon correcte, sans précautions particulières (travail sous abri ventilé par exemple).

Pour un ouvrage en zone urbaine, l'observation des abords immédiats est primordiale. Un feu tricolore ou un giratoire à proximité implique, par exemple, l'existence de zones freinage et d'accélération de poids lourds sur l'ouvrage qui exclura l'utilisation de certains procédés d'étanchéité, tels que ceux en semi-indépendance qui ne peuvent reprendre correctement les efforts tangentiels (freinage, force centrifuge si courbure, etc.).

Bien évidemment, tous ces éléments ont normalement été pris en compte lors de la construction de l'ouvrage neuf. Néanmoins, dans le cas d'une intervention sur un pont existant, les éventuelles modifications du tracé aux abords de l'ouvrage et/ou de son environnement immédiat doivent être prises en compte et peuvent conduire à reconsidérer le choix du système d'étanchéité initial.

2.2.2.3 Contraintes liées au futur chantier et à l'exploitation de l'ouvrage pendant les travaux

Le projet de réparation doit également intégrer les contraintes liées à l'exécution des travaux. Les questions suivantes, dont la liste est non-exhaustive, permettent d'identifier les considérations qui pourraient avoir un impact sur le phasage des travaux et/ou le choix de la technique de réparation :

- quel sera l'impact des travaux sur le trafic actuel ? Une déviation sur un autre itinéraire de tout ou partie de la circulation est-elle possible ? Y a-t-il des risques de complications sur un point du trajet de déviation ?
- dans le cas où l'ouvrage comporte deux tabliers parallèles, est-il possible, en phase travaux, de faire passer le trafic sur le tablier adjacent ?
- lorsque le maintien de la circulation sur l'ouvrage est nécessaire, est-il possible de réaliser le chantier par demi-chaussées ? Le phasage transversal et le traitement des raccordements entre phases devront donc être précisés. Le projet est alors plus complexe car les modalités de raccordement de toutes les couches du complexe « étanchéité / couche de roulement » au niveau de la liaison entre les deux demi-chaussées (ragréages, reprofilage, couches du complexe d'étanchéité, couches de roulement) devront avoir été étudiées.
- quelles sont les possibilités de coupure de la circulation ? Pour quelle durée maximale ?
- l'ouvrage étant fermé à la circulation, partiellement ou totalement, ne serait-il pas judicieux d'en profiter pour effectuer d'autres réparations ?
- le moment est-il propice à la réalisation des travaux ? La mise en œuvre de l'étanchéité sera-t-elle réalisable dans de bonnes conditions ? Une partie des travaux peut-elle être exécutée à une époque et le reste, en particulier la mise en œuvre de l'étanchéité, être décalé dans le temps ?

Cette liste d'informations à récupérer et de questions à éclaircir n'est pas exhaustive mais elle est nécessaire afin de pouvoir choisir au mieux le complexe « étanchéité / couches de roulement » et de trouver le meilleur compromis entre les sujétions liées à l'ouvrage lui-même et celles liées à la mise en œuvre des différents constituants du complexe.

3. Le suivi et le contrôle des réparations

3.1 Enlèvement des couches

L'enlèvement du complexe « étanchéité / couche de roulement » en place constitue la première phase des travaux de réparation. Il revêt une importance capitale. Il doit être réalisé avec soin et ne pas occasionner de dégradations supplémentaires à celles déjà existantes. Le travail par traitement successif des couches à l'aide d'un matériel adapté avec l'objectif de ne pas endommager le support est un gage de qualité et d'efficacité.

3.1.1 Préalables

Selon le type de complexe (nature, épaisseur) ayant été mis en œuvre, différentes techniques et/ou matériels de dépose peuvent être envisagés. L'utilisation d'un moyen de dépose inapproprié ou mal maîtrisé peut conduire à des dégradations superficielles du tablier en béton voire des armatures.

La connaissance du complexe en place est donc un préalable indispensable. Des investigations préliminaires, de préférence non destructives, sont ainsi fortement recommandées de manière à qualifier et quantifier avec le plus de précision possible la nature et l'épaisseur des différentes couches du complexe « étanchéité / couche de roulement ». Il est rappelé l'importance de l'examen préalable du dossier d'ouvrage qui pourra être complété par l'utilisation de méthodes non destructives d'investigation. La méthode RADAR (chapitre 3 § 3.3.3) permet notamment de « cartographier » les variations d'épaisseur de la couche de roulement et de l'étanchéité en place. Ces données pourront être confirmées par la réalisation de quelques fenêtres de reconnaissance (chapitre 3 § 3.4).

La procédure d'exécution relative à l'enlèvement des couches du complexe « étanchéité / couche de roulement » est validée lors d'une épreuve de convenance sur des zones réputées sans « risques » (zones hors éléments particuliers et avec des épaisseurs d'enrobé suffisantes). L'efficacité (rendement, sélectivité...) et la non-agressivité de la méthode vis-à-vis du support ainsi que les sollicitations éventuelles endurées par l'ouvrage (ne pas utiliser un brise-roche hydraulique pour déposer un complexe !) sont alors vérifiées.

La réutilisation des produits issus de l'enlèvement du complexe étanchéité / couche de roulement est généralement possible. Il est conseillé de favoriser les solutions permettant une valorisation de ces déchets.

Le synoptique suivant propose une démarche générale pour la conduite d'une opération d'enlèvement d'un complexe « étanchéité / couche de roulement ».

3.1.2 Les méthodes d'enlèvement ponctuel

Dans la plupart des cas, des moyens légers seront utilisés. Pour l'ouverture des fenêtres d'auscultation et la dépose de zones de faibles dimensions en partie courante, le poste d'enlèvement sera constitué :

- d'une scie pneumatique ou thermique si possible sans apport d'eau pour ne pas gêner la mise en œuvre ultérieure du complexe de réparation et les éventuelles observations sur des venues d'eau sur ou sous la chape ;
- d'une bêche pneumatique (éviter l'utilisation du pic) ;
- de pelles et de balais complétés, si besoin, par un dispositif d'aspiration.

Dans certains cas, pour l'enlèvement des bordures par exemple, une mini-pelle pourra être nécessaire.

3.1.3 Les méthodes d'enlèvement général

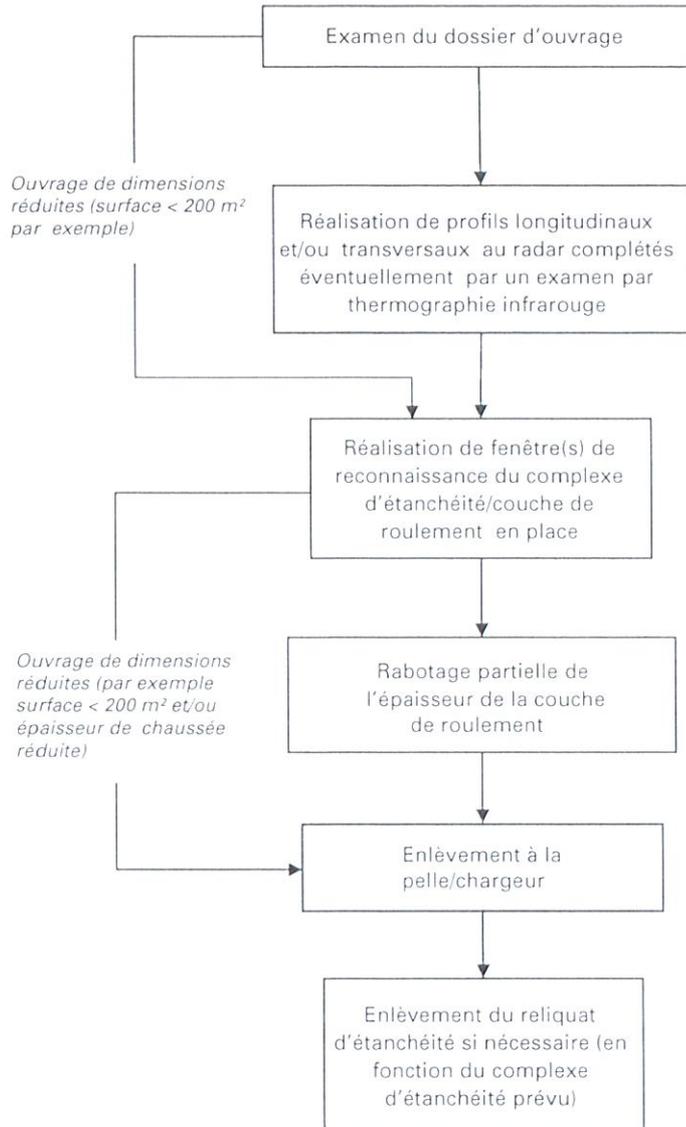
Le matériel de dépose est conséquent et doit permettre le traitement de surfaces importantes. L'enlèvement est réalisé en plusieurs étapes, chaque étape apportant un degré de soin supplémentaire pour l'obtention d'un support compatible avec la mise en œuvre du futur complexe.

Le principe de dépose consiste à raboter la couche de roulement sur une partie de son épaisseur et à compléter l'enlèvement du reliquat au godet. Cette technique offre les avantages suivants :

- elle permet de fournir un fraisat plus homogène et donc plus facilement utilisable dans le cadre d'un recyclage des produits de décapage ;
- elle permet de limiter le volume des matériaux déposés du fait du foisonnement du fraisat moins important que celui des morceaux dégagés au godet ;
- elle évite le risque important de dégradation de la partie superficielle du béton si les épaisseurs respectives des différentes couches à déposer sont mal connues ou la technique insuffisamment maîtrisée.

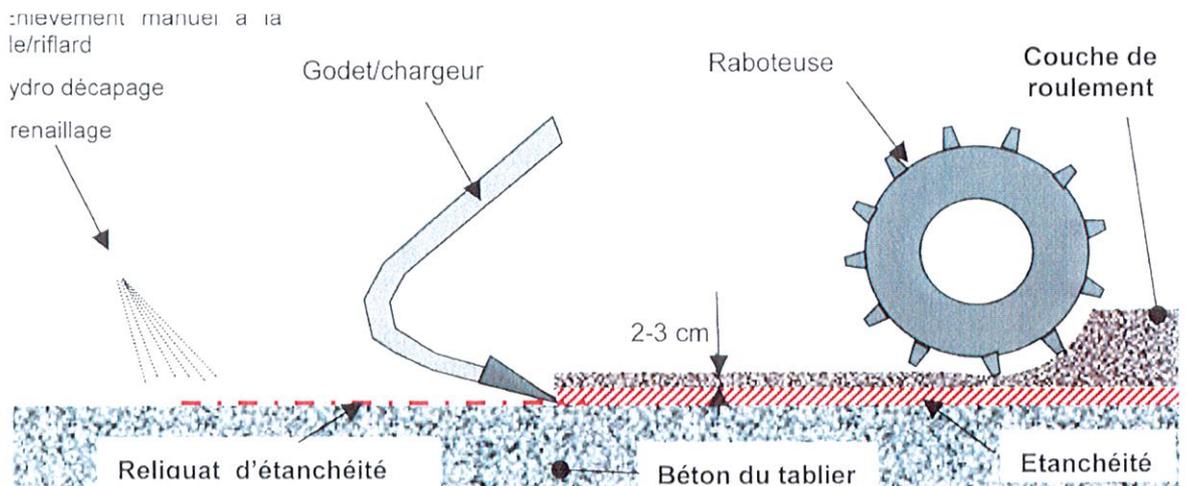
Synoptique de l'enlèvement du complexe chape d'étanchéité/couche de roulement sur ouvrage d'art

Nature des opérations



Objectifs

- Recherche des informations concernant la nature du complexe d'étanchéité et de la chaussée
- Estimation des épaisseurs des couches rencontrées et recherche de singularités.
- Optimisation de la position des fenêtres de reconnaissance (caméra IR)
- Confirmation du contenu du dossier d'ouvrage
- Connaissance plus fine du complexe d'étanchéité/couche de roulement
- Recueil d'informations sur la qualité du béton sous-jacent
- Limitation du volume d'enrobé à enlever à la pelle/chargeur
- Meilleure homogénéité du fraisat en vue de son recyclage
- Gain de temps sur la dépose de la chaussée
- Dépose du reliquat de couche de roulement
- Dépose de la majeure partie du complexe d'étanchéité
- Manuellement (réchauffage et raclette)
- Lavage haute pression mécanisé si les surfaces à traiter sont importantes
- Grenailage si le matériau à éliminer s'y prête (FMAS ou bitume oxydé)



3.1.3.1 Le rabotage

Le rabotage permet la dépose de la majeure partie de la couche de roulement (figure 102).

Il est fortement déconseillé de l'utiliser pour déposer la totalité du complexe « étanchéité / couche de roulement ». En effet, le rabotage ne doit pas affecter le complexe d'étanchéité et doit donc s'arrêter à 2-3 cm de celui-ci.

Il est particulièrement bien adapté au traitement de surfaces importantes en raison de sa rapidité de mise en œuvre et de la facilité d'élimination des résidus obtenus. Il présente un intérêt certain dans le cas de travaux effectués en alternat ou avec réduction de voies pour lesquels les phases de chargement des camions destinés à l'évacuation des matériaux sont délicates à mettre en œuvre.

Il trouve ses limites d'utilisation au niveau des joints de chaussée et des abords des trottoirs où un matériel spécifique de rabotage, en faible largeur (de l'ordre de 30 à 50 cm), est à prévoir.

Son déploiement exige le respect des conditions suivantes :

- disposer d'une procédure décrivant les moyens mis en œuvre (matériel, personnel...), le phasage des opérations et les contrôles mis en place ;
- réaliser une épreuve de convenance au démarrage de l'opération qui permet de préciser le résultat à obtenir ;
- travailler à l'aide d'un matériel présentant une largeur limitée, de l'ordre de 1 à 1,5 m qui permet de bien intégrer les hétérogénéités possibles sur les profils en travers des ouvrages ;
- dimensionner les pics de l'outil de rabotage en fonction de l'épaisseur de béton bitumineux à éliminer (12 à 15 mm en général) ;
- disposer d'un matériel en bon état et comportant, notamment, des pics de rabotage d'égale longueur faute de quoi ils risquent d'occasionner des saignées profondes pouvant parfois atteindre le béton du tablier ;
- prévoir de travailler en plusieurs passes en épaisseur pour limiter les risques de rabotage accidentels du complexe d'étanchéité ou du tablier ;
- contrôler le résultat obtenu en permanence par un opérateur situé derrière ou à côté de la machine. En effet, la position du conducteur rend difficile l'appréciation du rabotage, sauf à utiliser une télécommande.

Nota : voir chapitre 6 § 1.1 pour la gestion des produits déposés.



Figure 102. Vue du rabotage d'une chaussée d'ouvrage d'art



Figure 103. Microraboteuse permettant d'écrêter un support béton trop rugueux

3.1.3.2 Utilisation d'une pelle/chargeur

L'utilisation d'une pelle chargeur est fortement recommandée pour terminer l'enlèvement du reliquat de complexe laissé à l'issue du rabotage (figure 104). Elle doit obligatoirement être équipée d'un godet sans dents pour ne pas dégrader le support.

Cette technique est également particulièrement indiquée pour la dépose de l'ensemble des couches du complexe « étanchéité / couche de roulement » dans le cas des chapes d'étanchéité posées en semi-indépendance ou pour la réfection de l'étanchéité de petits ouvrages à condition que les épaisseurs restent limitées (de l'ordre de 10 cm).

La mise en œuvre d'une pelle chargeur nécessite le respect de plusieurs critères :

- le travail doit être réalisé à l'aide d'un matériel présentant une lame lisse, uniforme et non dégradée. L'objectif est d'éviter de rayer le tablier béton et de créer ainsi des saignées ou irrégularités lors de cette opération. Un examen préliminaire de la lame du godet permettra de s'en prémunir ;
- l'emploi d'un personnel expérimenté est une condition nécessaire à l'obtention d'un résultat conforme (figure 105) ;
- la largeur du godet doit être adaptée au profil de l'ouvrage et à la puissance disponible sur la pelle. Dans le cas d'un tablier béton uniforme, une dimension de 1m semble pertinente mais elle devra être réduite pour des ouvrages où le profil transversal est plus irrégulier ;
- le godet utilisé doit être inclinable de manière à épouser plus facilement le profil en travers de l'ouvrage à traiter ;
- pour une meilleure efficacité de l'enlèvement, l'opérateur devra travailler par passes successives de quelques dizaines de cm et ne pas chercher à enlever toute la largeur disponible offerte par le godet en une seule fois ;
- la validation de la procédure d'enlèvement devra être effectuée au démarrage du chantier par la réalisation d'une épreuve de convenance.



Figure 104. Vue de la pelle utilisée pour la dépose d'un complexe FPA après le rabotage de la couche de roulement



Figure 105. Aspect du tablier après décapage de l'ensemble couche d'étanchéité / roulement

L'enlèvement du complexe d'étanchéité au godet devra être complété par l'élimination des éventuels résidus peu adhérent du système d'étanchéité.

3.1.3.3 Hydrodécapage

L'hydrodécapage (figure 106) est principalement utilisé dans le cadre du dégommage des pistes aériennes ou l'effacement des marquages routiers mais il a révélé des possibilités dans le domaine de l'élimination des résidus de feuilles préfabriquées persistant sur un support après passage du godet. Cette technique offre un grand rendement et permet ainsi de traiter plusieurs centaines de m² par heure.

Une ou plusieurs rampes de jets tangentiels rotatifs alimentés par de l'eau à haute pression assurent le décapage (à titre d'exemple : 250 MPa pour un débit d'eau de 35 l/min). Une aspiration simultanée des déchets et de l'eau produite permet d'obtenir un support propre, pratiquement sec et préserve l'environnement.

Il est ainsi possible d'obtenir un support compatible avec la pose du nouveau système d'étanchéité pour peu que le béton sous-jacent soit en bon état. Il ne permet toutefois pas la mise en œuvre de films minces adhérents au support ou d'étanchéités utilisant un produit d'accrochage à base de résines car l'ancien enduit d'imprégnation est partiellement présent dans les cavités, sauf à vérifier la compatibilité des nouveaux matériaux avec ces résidus.



Figure 106. Vues d'un camion d'hydrodécapage et des rampes de jets assurant le traitement du support

3.1.3.4 Décapage par grenailage

Le décapage par grenailage (figures 107 et 108) est mis en œuvre dans la phase finale de la préparation des supports béton avant application de l'étanchéité. Il permet notamment l'élimination de résidus adhérent au béton tels que les produits d'imprégnation, les traces de bitume oxydé, la laitance ou les produits de cure du béton. Son utilisation lors de l'enlèvement des complexes de type film mince adhérent au support donne, en général, de bons résultats. Il est toutefois peu adapté à l'enlèvement de produits riches en bitume modifié par des polymères tels que les feuilles préfabriquées.

Sa mise en œuvre est rapide, son rendement élevé et la propagation de poussières et de résidus très limités du fait de l'aspiration. L'utilisation d'un abrasif recyclable est également à prendre en compte.

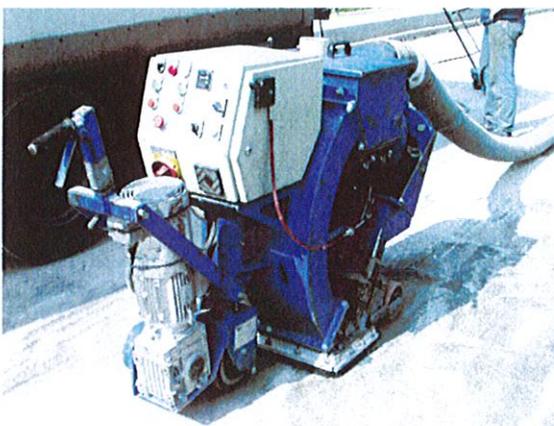


Figure 107. Vue d'une grenailleuse



Figure 108. Grenailleuse à grand rendement

À l'issue de ce type de préparation, il est possible d'appliquer tout type d'étanchéité pour peu que l'état et la rugosité du support soient adaptés (fascicule 67, titre I du CCTG (11)). Il conviendra, au début du chantier, de réaliser une épreuve de convenance contradictoire qui permettra de définir le résultat à obtenir entre les différentes parties intervenant.

La liste des techniques présentées ci-dessus n'est pas exhaustive. Dans le cas d'utilisation de matériels autres que ceux décrits précédemment, les acteurs du marché sont invités à procéder à une évaluation par rapport à l'objectif à atteindre en s'appuyant notamment sur une épreuve de convenance.

3.2 Qualité et traitement du support

3.2.1 Principes généraux

Même si les investigations menées dans le cadre du diagnostic permettent de se faire une idée globale de l'état du support, c'est seulement à l'issue des phases d'enlèvement du complexe « étanchéité / couche de roulement » qu'un relevé exhaustif et précis de l'état du support pourra être réalisé. Ce relevé permet alors, d'une part de faire des regroupements et de réduire le nombre de techniques et de produits de réparation et d'autre part d'avoir une estimation des surfaces à traiter et des quantités de produits à utiliser.

Bien évidemment, il est impossible d'anticiper cette évaluation au moment de l'établissement du dossier de consultation des entreprises ; c'est pourquoi il est fortement conseillé, dès la rédaction des documents de consultation, d'envisager plusieurs solutions techniques de réparation du support ou en dérogation au CCAG de demander à l'entrepreneur des prix unitaires de remise en état du support en fonction des divers cas susceptibles d'être rencontrés (fascicule 67 titre I § 9.3 (11)).

Le relevé contradictoire de l'état du support est le premier point critique d'une réflexion d'étanchéité d'ouvrages d'art.

La réparation des dégradations du support est à la charge de celui qui les a faites (fascicule 67 titre I § 9.3 (11)).

Les réparations entreprises à l'issue du relevé contradictoire visent à rendre le support sain et compatible avec les exigences de mise en œuvre du procédé d'étanchéité prévu.

3.2.2 Traitement local du support

En fonction de la nature, de la surface et de l'épaisseur des réparations à entreprendre, plusieurs solutions de traitement du support sont envisageables.

3.2.2.1 Réparation par produits à base de liant hydraulique modifié (LHM)

Ces produits sont réservés aux réparations de défauts localisés (surface de l'ordre du m²), d'un centimètre d'épaisseur minimale et dont les bords sont francs (figure 109). Selon l'épaisseur de produit à appliquer, on pourra utiliser un mortier ou un microbéton de granulométrie adaptée. Les produits certifiés NF « produits spéciaux pour constructions en béton hydraulique » sont à privilégier.

La chape d'étanchéité est mise en œuvre après un délai de séchage minimum du produit. Ce délai doit être conforme aux prescriptions de l'article 9.1.4 du fascicule 67 titre I du CCTG ou de son commentaire, complétées des éléments mentionnés dans la fiche technique du produit de réparation (11).

3.2.2.2 Réparation par produit à base de liant époxydique

Ces produits sont réservés aux réparations de défauts localisés (inférieurs à 1 m²) dont l'épaisseur est inférieure au centimètre.

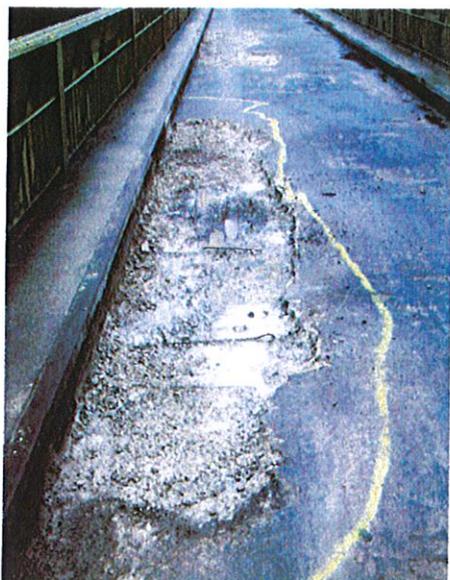


Figure 109. Cas d'un support nécessitant une réparation localisée à base de matériaux à liant hydraulique modifié

La granulométrie des charges devra être adaptée à l'épaisseur de produit à mettre en œuvre. Ces produits existent en kits prédosés et font l'objet d'un marquage CE en application de la norme NF EN1504 (partie 3). On privilégiera les produits NF « produits spéciaux pour constructions en béton hydraulique » (12) et (12bis).

Dans le cas où l'état du support nécessite des réparations de surfaces et d'épaisseurs variables, il est bien évidemment possible d'utiliser plusieurs produits de réparation. Néanmoins, cela implique la coexistence sur le chantier de produits différents propice aux erreurs. Si les surfaces à traiter sont de grandes ampleurs, on s'interrogera donc sur l'opportunité et la faisabilité d'un reprofilage général (§ 3.2.4).

3.2.3 Traitement des relevés d'étanchéité

Les différentes modalités de réparation des relevés d'étanchéité sont traitées au § 2.1.5.

3.2.4 Exécution d'un reprofilage général

Dans certains cas, l'état du support est tel qu'un reprofilage avec des matériaux à liant hydraulique ou en microbéton bitumineux devient indispensable (figure 110).

Dans ce cas, on s'assure que la mise en place de ce reprofilage est compatible avec la capacité portante de l'ouvrage, avec la conformation des relevés d'étanchéité (hauteur de l'engravure) et avec le profil en long de part et d'autre de l'ouvrage.



Figure 110. Support dégradé nécessitant un reprofilage général

3.2.4.1 Reprofilage à base de liant hydraulique

Le reprofilage doit être adhérent au support. On s'assurera donc que le support est apte à recevoir ce type de produit (propreté notamment) afin de garantir un collage suffisant.

Le temps de séchage du produit de reprofilage (avant la mise en œuvre de l'étanchéité) est l'une des principales contraintes de cette technique. Un délai de 15 jours est généralement préconisé (article 9.1.4 du fascicule 67 titre I du CCTG ou de son commentaire (11)).

3.2.4.2 Reprofilage en microbéton bitumineux

Le microbéton bitumineux utilisé pour la réalisation du reprofilage doit être :

- › résistant à l'orniérage pour que le complexe « étanchéité / couches de roulement » soit sur un support rigide ;
- › assez « souple » d'utilisation pour être mise en œuvre à des épaisseurs variables ;
- › compacte afin de limiter le passage de l'eau.

Le chapitre 4 du guide LCPC « *Entretien des complexes étanchéité / couche de roulement sur ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis sous la chape d'étanchéité* » (7) donne des recommandations et des prescriptions pour la réalisation d'un reprofilage en enrobé.

La réception du support après réparation (ou du reprofilage) constitue un point d'arrêt.

3.3 Mise en œuvre de l'étanchéité

Dans le cas d'une réfection complète de l'étanchéité, les procédures de mise en œuvre et les contrôles (points d'arrêts compris) sont ceux prévus dans le cas d'une mise en œuvre sur ouvrage neuf. On se reportera donc utilement aux fiches MEMOAR (8) et (8bis) pour les modalités de contrôles de mise en œuvre. La vigilance portera plus précisément sur les raccordements à l'existant (relevés d'étanchéité, engravure, étanchéité des trottoirs, gargouilles, avaloirs, etc.). Les interfaces n'étant pas de conformation idéale, il arrive en effet bien souvent que le traitement ne soit pas réalisé comme il se doit.

Dans le cas particulier d'une réfection localisée de la chape d'étanchéité, une disponibilité et un suivi accrus de la part des équipes de contrôles sont indispensables au regard de la rapidité des interventions. On s'assurera que l'on ne crée pas d'obstacle à la circulation de l'eau, que les tolérances sur les profils transversaux et longitudinaux sont respectées et que la continuité de l'étanchéité avec l'étanchéité en place est assurée.

3.3.1 Sur réparations locales du support

Lors de la mise en œuvre d'une étanchéité comportant une couche d'asphalte, la différence de comportement entre le béton du support et les produits de réparation, sous l'effet de la quantité de chaleur apportée, peut conduire ces derniers à se décoller (figure 111). Ce phénomène est favorisé par un défaut de préparation du support, de traitement des bords, de mise en œuvre et en cas de non-respect du délai de séchage du produit de réparation.

3.3.2 Sur reprofilage

3.3.2.1 Reprofilage à base de liant hydraulique

La situation est comparable à la mise en œuvre d'un système d'étanchéité sur un tablier en béton. Cependant, on vérifiera que le produit de collage du reprofilage est compatible avec la mise en œuvre des procédés d'étanchéité à chaud (asphalte et FPA) car les résines époxydiques, par exemple, fluent pour des températures généralement comprises entre 50 et 80 °C.



Figure 111. Déflachage en mortier hydraulique : décollement du mortier lors de la mise en œuvre par temps froid de la couche d'asphalte d'un système FPA

On peut ainsi s'interroger sur le comportement du collage lors de la mise en œuvre d'une couche d'asphalte à 240 °C et ce d'autant plus que les épaisseurs sont faibles ((12) chapitre IV § 5.4.1 a). Dans ce cas, une épreuve de convenance doit être envisagée.

3.3.2.2 Reprofilage en microbéton bitumineux

Sur un reprofilage en microbéton bitumineux, on privilégiera la mise en œuvre de procédés d'étanchéité à base de matériaux bitumineux (FPM et FPA par exemple). Les systèmes FMAS / SEL et les procédés comportant un vernis à base de résine ne sont pas admissibles avec ce type de reprofilage.

Pour les MHC, le retour d'expérience conduit à réserver cette technique à des cas très spécifiques avec des précautions accentuées pour le traitement des bords (Avis techniques du Sétra (8)). Quelques précautions sont à prendre lors de la mise en œuvre de la chape d'étanchéité sur ce type de reprofilage :

- ▶ ne pas mettre le vernis d'imprégnation du complexe qui détrempe les enrobés et modifie leurs caractéristiques ;
- ▶ effectuer la mise en œuvre du procédé d'étanchéité le plus tôt possible après la réalisation du reprofilage. Dans le cas contraire, il y a un risque de pollution par la poussière et d'accumulation d'humidité dans le matériau qui comporte un certain pourcentage de vide. Ces phénomènes sont préjudiciables à la bonne tenue du microbéton bitumineux et du procédé d'étanchéité ;
- ▶ renforcer le contrôle de la mise en œuvre du procédé aux points singuliers. Le microbéton bitumineux du reprofilage comporte un certain pourcentage de vide et un défaut de continuité de l'étanchéité (au droit des avaloirs ou des relevés par exemple) entraînera une circulation de l'eau dans le reprofilage.

La réception de la surface du reprofilage constitue un point d'arrêt. Pour sa levée, on pourra s'inspirer des exigences de l'article 9.3 du fascicule 67 titre I du CCTG (11) et des modalités de contrôle de réception du support décrites dans les fiches MEMOAR (8) et (8bis).

3.4 Les étapes clés du contrôle

Dans le tableau 11 ci-après, sont listés les points critiques et les points d'arrêt à respecter ainsi que les points particuliers propres à chaque phase jusqu'à la mise en œuvre du procédé d'étanchéité.

Les modalités de réception de l'étanchéité et de contrôles de la mise en œuvre des couches de roulement étant équivalentes à celles d'un ouvrage neuf, elles ne sont pas précisées dans le tableau.

	Points critique	Points d'arrêt	Points particuliers
Enlèvement des couches	x		<p><u>Enlèvement ponctuel</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - respect des décalages entre couches (mise à jour n° 2 du STER (1)) <p><u>Enlèvement global</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - réalisation de fenêtres de reconnaissance préalables, - enlèvement par couches successives, - adéquation des matériels utilisés en fonction des différentes phases d'enlèvement (utilisation de techniques préservant l'intégrité du support).
Examen du support	x		<ul style="list-style-type: none"> - recherche des défauts de planéité, évaluation de la rugosité et de l'adhérence des ragréages, détection de souillures, etc. - appréciation des éventuelles zones d'altération du support (nature, surface et épaisseurs).
Relevé contradictoire de l'état du support		x	<ul style="list-style-type: none"> - délimitation des zones à réparer et des techniques de traitement correspondantes (§ 3.2.1), - choix de produits de réparation compatibles avec la nature de la dégradation et du système mis en œuvre ultérieurement (étanchéité ou reprofilage).
Traitement du support	x		<p><u>Traitement local</u> :</p> <ul style="list-style-type: none"> - respect des fiches techniques (épaisseur, conditions d'application), - attention particulière à la géométrie des défauts (surface et épaisseur), au traitement des aciers éventuels, à la propreté des zones à réparer, à l'humidification du support, cure... (produits à base de LHM) et au dosage... (produits à base de résine époxydique). <p><u>Traitement global</u> :</p> <p>Reprofilage à base de LHM :</p> <ul style="list-style-type: none"> - respect des fiches techniques (épaisseur, conditions d'application), - attention particulière au produit de collage, à sa consistance, son épaisseur, sa durée de séchage et au produit de cure, <p>Reprofilage en microbéton bitumineux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - attention particulière à la couche d'accrochage, à la formulation, aux conditions de mise en œuvre (température, compactage...) et au traitement des points singuliers.
Réception du support		x	<ul style="list-style-type: none"> - compatibilité de la qualité du support avec les exigences du système d'étanchéité à mettre en œuvre : caractéristiques propres au système d'étanchéité retenu ((11), (14), (8)), - dispositions constructives : conformité des formes et dimensions spécifiées (relevés d'étanchéité, raccordement aux platines d'évacuation des eaux, traitement de l'étanchéité des trottoirs, etc.).
Mise en œuvre de l'étanchéité	x		<ul style="list-style-type: none"> - sur un reprofilage en microbéton bitumineux : couche d'accrochage à proscrire, mise en œuvre rapide du système d'étanchéité pour éviter tout piégeage d'eau.

Tableau 11. Points critiques et points d'arrêt

3.5 Mise en œuvre des couches de roulement

3.5.1 Généralités

La chape d'étanchéité a une fonction de support des couches de roulement et le complexe formé par ces deux éléments ne peut fonctionner correctement que si l'un et l'autre sont réalisés correctement. La formulation de l'enrobé doit être conforme aux règles en vigueur (classe de trafic, normes...).

Il convient de rappeler que les procédés d'étanchéité fonctionnent correctement sous 7 cm d'enrobé, épaisseur généralement indiquée dans les avis techniques du Sétra (8) concernant les procédés d'étanchéité des ponts-routes en béton (effet du poids favorable à la prévention des risques de gonfles).

Lorsque les enrobés sont mis en œuvre en deux couches, la première couche doit présenter une épaisseur minimale de 5 cm afin de bénéficier de l'apport de chaleur pour parfaire l'adhérence avec les feuilles préfabriquées (§ 2.1.7).

3.5.2 Cas particulier de travaux de reprise d'une chape sur un ouvrage à portance réduite

Les chapes d'étanchéité et les couches de roulement sont des éléments qui ne sont pas négligeables dans la charge portée par l'ouvrage : un complexe « étanchéité / couche de roulement » de 10 cm (solution classique de type FPA avec 7 cm d'enrobés) apporte une charge de l'ordre de 250 kg/m². Cette charge induit des efforts non négligeables dans la structure et peut avoir des conséquences sur la capacité portante de l'ouvrage.

Ce paragraphe concerne spécifiquement le cas des ouvrages présentant un déficit de capacité portante (vieillesse des matériaux, augmentation du trafic, dimensionnement insuffisant, etc.), pour lesquels il n'est pas envisageable de réaliser des travaux de renforcement rapidement, ou le cas des ouvrages pour lesquels les travaux de réfection de l'étanchéité risquent de conduire à des charges supérieures à celles prises en compte dans le dimensionnement initial.

Dans ces conditions, des solutions réduisant ce que l'on désigne sous le vocable « poids mort » doivent être envisagées. Le tableau 12 ci-après propose différentes solutions (à réserver à des situations exceptionnelles) permettant de limiter l'épaisseur du complexe « étanchéité / couche de roulement ».

De la solution « à moindre épaisseur » à la solution « classique », le tableau 12 présente les avantages et les inconvénients qui pourront orienter le choix du décideur. Ces solutions « légères » ne sont pas sans risques en terme de durabilité et de tenue mais peuvent permettre de traiter certains ouvrages dans l'attente de leur renforcement ultérieur.

Solution envisagée	Description	Avantages	Inconvénients
Complexe à base de moquette routière	Sur le béton (ou sur l'étanchéité subsistante) : collage d'un enduit préformé ayant la double fonction « étanchéité » et « couche de roulement ».	<ul style="list-style-type: none"> - épaisseur millimétrique donc poids négligeable, - mise en œuvre rapide, - permet de conserver l'étanchéité existante si la compatibilité a été vérifiée 	<ul style="list-style-type: none"> - procédé non étanche intégralement : éléments de moquette posés à joints vifs, - problèmes de collage feuille/support (surtout sur résine), - limité au trafic léger (arrachage des gravillons sous trafic plus important), - coût relatif élevé, - difficulté si l'ouvrage est courbe, - reprofilage impossible, - texture de support compatible (défauts millimétriques), - risque de défauts de tenue dans le temps (ressuage d'huiles par exemple).
Complexe à base de résine	C'est la solution type des toboggans que l'on peut transposer sur un pont à support en béton. Le complexe est constitué par une couche de mortier de résine de 1 à 2 cm d'épaisseur, comportant un gravillonnage de surface et qui assure la double fonction « étanchéité » et « couche de roulement ».	<ul style="list-style-type: none"> - épaisseur de l'ordre du centimètre donc poids réduit, - bonne étanchéité. - bonne tenue sous trafics T1 et T2, - assez facile à mettre en œuvre (sous réserve du respect des règles applicables à ce type de travaux) 	<ul style="list-style-type: none"> - coût relatif très élevé, - susceptibilité aux conditions atmosphériques pour la mise en œuvre, - possibilité de reprofilage limitée à l'épaisseur du matériau (1 à 2 cm), - non adapté aux trafics lourds T0, - la dépose de l'étanchéité en place est à prévoir, - nécessite une texture du support compatible (défauts millimétriques).
Complexe à base d'asphalte	Sur une étanchéité de type FPA (feuille préfabriquée + asphalte), le complexe est constitué d'une couche de 3 à 4 cm d'asphalte coulé routier servant de couche de roulement, soit une épaisseur totale de l'ordre de 4 cm.	<ul style="list-style-type: none"> - charge réduite par rapport à une solution classique, - très bonne étanchéité, - bonne tenue sous trafics T2 et T1, - reprofilage intégré possible mais limité, - mise en œuvre classique. 	<ul style="list-style-type: none"> - coût relatif élevé, - glissance de la surface de l'asphalte délicate à bien traiter : on pourra utiliser des techniques de cloutage, empreinte à chaud ou employer un asphalte thixotropé et griffé, - adapté aux trafics T2 à T1 (risque d'orniérage sous trafic T0 et trafic canalisé), - prévoir obligatoirement un bouche-pore en traitement de surface du béton (pour éviter les phénomènes de gonfles).
Complexe à base de béton bitumineux à formulation spéciale	<u>Sur une étanchéité nouvelle ou sur celle en place</u> , mise en œuvre d'un enrobé haute performance à faible épaisseur (BBTM de 3 à 4 cm), soit une épaisseur totale de l'ordre de 4 cm.	<ul style="list-style-type: none"> - charge réduite par rapport à une solution classique, - facilité de mise en œuvre, - bonne tenue sous trafic, - coût relatif réduit, - matériau assez fermé mais restant, de par sa formulation, avec un pourcentage de vides. 	<ul style="list-style-type: none"> - nécessite un drainage de l'interface étanchéité/couche de roulement du fait de la présence de vides au sein de l'enrobé haute performance, - dans le cas de la mise en œuvre d'une nouvelle étanchéité par feuille préfabriquée, celle-ci devra être obligatoirement posée sur un bouche-pore en traitement de surface du béton (pour éviter les phénomènes de gonfles).

Tableau 12. Solutions de complexes « étanchéité / couche de roulement » « minces »

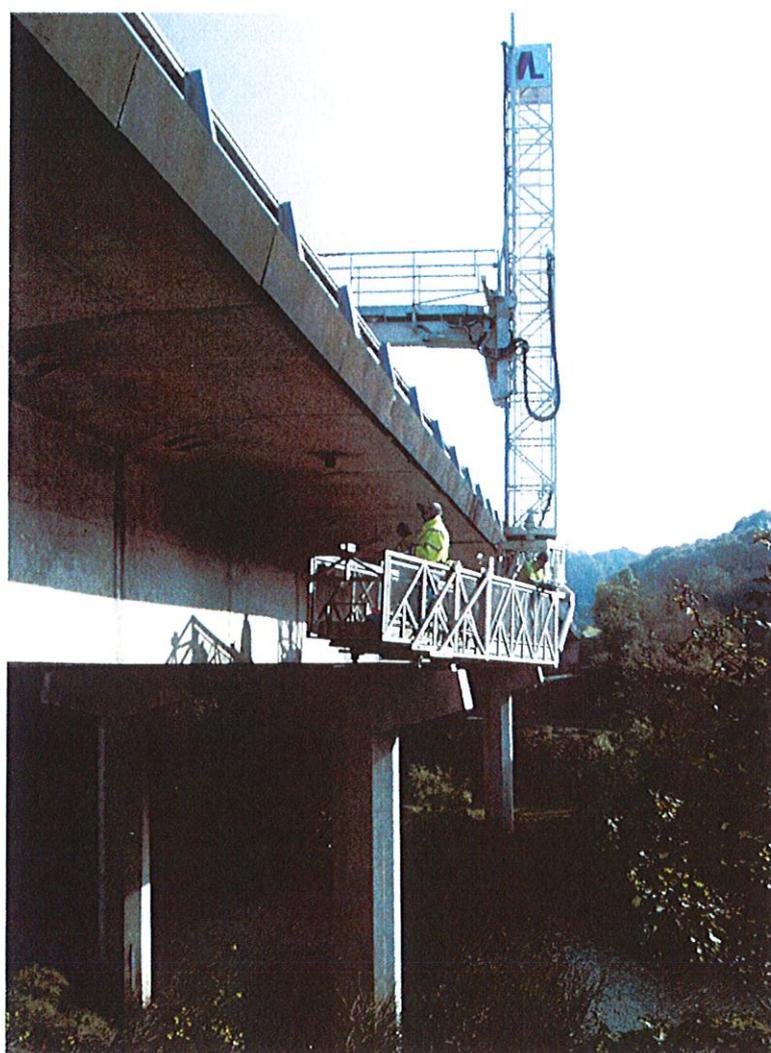
En dehors de ces solutions « à moindre épaisseur », il est toujours possible de retenir une configuration classique « étanchéité / couche de roulement » en retenant un des systèmes FPM ou FMAS / SEL qui présente les épaisseurs, et donc les charges permanentes, les plus faibles.

4. Bibliographie

- [1] « Réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – Réparations localisées », STER 81 - Mise à jour n° 2, Sétra référence F0112, mai 2001.
- [2] « Les trottoirs sur les ponts et aux abords immédiats – Synthèse des aménagements », collection Guide technique, Sétra, référence 0520, août 2005.
- [3] « Barrières de sécurité pour la retenue des véhicules légers – Barrières de niveau N en accotement – Aménagement en TPC », collection Guide technique GC, Sétra référence FO155, septembre 2001.
- [4] « Barrières de sécurité pour la retenue des poids lourds – Barrières de niveau H2 ou H3 », collection Guide technique GC, Sétra référence F 9916, septembre 1999.
- [5] Avis techniques du Sétra – Joints de chaussée.
- [5bis] « Joints de chaussée des ponts-route », collection Guide technique, référence F8737, Sétra, juillet 1986, révision prévue fin 2011), téléchargeable sur le site du Sétra.
- [6] Propositions d'actions pour le remplacement des joints de chaussée sur ouvrages en service – note d'information n° 24, Sétra référence F0314, décembre 2003.
- [7] « Entretien des complexes étanchéité / couche de roulement sur ouvrages d'art – Cas des ouvrages comportant un renformis sous la chape d'étanchéité », collection Guide technique, LCPC, référence RENFORMIS, juillet 2006.
- [8] Avis techniques du Sétra – étanchéité.
- [8bis] fiche MEMOAR (Memento pour la Mise en œuvre sur les Ouvrages d'Art), fiche n° 19, « Mise en œuvre des chapes d'étanchéité », Sétra, mars 2005, révision octobre 2007, CD-ROM référence 0757CD.
- [9] « Ponts mixtes – recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles », Sétra, référence F 9536, septembre 1995.
- [10] Cahier des clauses techniques générales - Fascicule 65 A – Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint, arrêté du 6 mars 2008.
- [11] Cahier des clauses techniques générales - Fascicule 67 titre I – Étanchéité des ponts-routes support en béton de ciment, décret n° 85-404 du 3 avril 1985.
- [12] « Couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – STER 81 », sous-dossier R, Sétra, référence F 8210 4, juillet 1981.
- [12bis] Norme NF EN 1504-3 (2006) *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : Réparation structurale et réparation non structurale.*
- [13] « Ponts-routes en maçonnerie – Protection contre l'action des eaux – Étanchéité, assainissement, drainage... », collection Guide technique, Sétra, référence F9231, mai 1992.
- [14] « Surfaçage étanchéité et couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art – STER 81 », Sétra, juillet 1981.

CHAPITRE 5

AIDE À LA GESTION PRÉVISIONNELLE ET PRÉVENTIVE



Les coûts de construction et de maintenance

Parmi les équipements des ponts, le poste « chape d'étanchéité » est l'un des plus importants en terme de coût tant à l'investissement qu'à l'entretien.

Les travaux d'étanchéité des ponts-route représentent environ 2 % du coût total de la construction d'un pont. Ce montant est variable de 1 à 3,5 % en fonction de l'importance de l'ouvrage (plus l'ouvrage est petit plus le coût relatif est grand) et du type d'étanchéité (voir fascicule 67, titre I, § 1.2 du rapport de présentation). C'est, en importance, le second poste « équipements » après celui des dispositifs de retenue et/ou garde-corps.

Par contre, en entretien, c'est l'un des plus importants pour l'entretien des ponts et le plus élevé pour les équipements. Il représente un ratio que certaines études faites par le Sétra et par GRA⁴ pour le réseau autoroutier évaluent entre 15 et 25 % des crédits consacrés à l'entretien des ponts routiers en France.

Une explication est que l'on ne peut pas réparer l'étanchéité sans intervenir sur l'enrobé (voire les trottoirs et les joints de chaussée). Ce poste intègre donc *de facto* la réparation des couches de roulement sur les ponts.

Les informations dont on dispose pour la France sont similaires aux données dont on a pu avoir connaissance dans des pays voisins.

1. Les garanties sur les chapes d'étanchéité

1.1 Principes généraux

Avant d'aborder le cas spécifique de la garantie sur les étanchéités des ponts, il convient de faire un petit rappel des différentes garanties prévues par la loi (articles 1792 et 2270 du Code civil) pour les travaux dans le domaine du bâtiment et du génie civil. Elles sont au nombre de 5 :

- garantie de parfait achèvement des travaux, d'une durée de 1 an ;
- garantie sur les menues parties d'ouvrages : d'une durée de 2 ans ;
- garantie contractuelle de durée variable ;
- responsabilité décennale de 10 ans ;
- la garantie contre le dol⁵, d'une durée de 30 ans.

4. GRA : DGITM/DIT/GRN/GRA (ex. R/CA) : sous-direction de la gestion du réseau autoroutier concédé.

5. du latin *dolus* : ruse, manœuvre frauduleuse.

La garantie sur les menues parties d'ouvrages ne s'appliquant pas au cas du génie civil et la garantie contre le dol étant un cas très particulier, nous ne nous intéresserons qu'à la responsabilité décennale et à la garantie contractuelle.

1.2 La responsabilité décennale

Juridiquement, la garantie décennale suppose que l'ouvrage soit rendu impropre à sa destination.

Dans le cadre de l'étanchéité, son application est assez problématique même si strictement rien ne s'y oppose. En effet, la mise en jeu de cette responsabilité risque de ne pas aboutir (on connaît beaucoup d'ouvrages dont l'étanchéité est défectueuse ce qui n'empêche pas l'usage du pont !).

Ceci a été un argument avancé par les rédacteurs du fascicule 67 titre I du CCTG (1) pour l'introduction d'une garantie particulière et contractuelle propre aux étanchéités des ponts afin que les maîtres d'ouvrage gestionnaires ne soient pas désarmés face à un problème d'étanchéité quelques années après la mise en service d'un pont. Elle est détaillée dans le paragraphe suivant.

1.3 Garantie particulière et contractuelle

Elle n'est rien d'autre qu'une extension de la garantie de parfait achèvement des travaux. Les rédacteurs du fascicule 67 titre I du CCTG (1) ont, en effet, considéré que la défaillance d'une étanchéité était, en général, visible par ses conséquences dans un laps de temps relativement court et que l'extension de la garantie de parfait achèvement des travaux pouvait être un outil de gestion bien adapté.

Par contre, pour permettre son application, il faut savoir qu'elle doit être inscrite dans chaque marché car elle ne découle pas d'un texte d'ordre général.

Pour les étanchéités des ponts, l'annexe 1 du fascicule 67 titre I du CCTG (1) conseille de fixer la durée de cette garantie particulière et contractuelle à 5 ans et donne les clauses types à reprendre dans le CCAP au chapitre des garanties particulières.

Elle n'est pas contradictoire avec la responsabilité décennale mais elle permet, en cas d'impossibilité de faire appel à celle-ci, de disposer d'une voie de recours.

1.4 La durée de vie

Il ne faut pas confondre garantie et durée de vie espérée. Des textes européens relatifs à la durabilité précisent clairement cette distinction, et en particulier certains documents relatifs à l'application de la directive Produits de construction (2).

La durée de vie pour un produit est la « période durant laquelle les performances d'un produit seront maintenues à un niveau assurant la conformité aux exigences essentielles d'un ouvrage correctement conçu et exécuté (c'est-à-dire que les caractéristiques essentielles d'un produit sont au moins égales à des valeurs minimales admissibles sans nécessiter de frais importants de réparation ou de remplacement). La durée de vie d'un produit dépend de sa durabilité inhérente et d'un entretien normal ».

« Une distinction claire doit être effectuée entre la durée de vie présumée raisonnable du point de vue économique d'un produit, qui est à la base de l'évaluation de la durabilité dans les spécifications techniques, et la durée de vie réelle d'un produit dans un ouvrage. Cette dernière dépend d'un certain nombre de facteurs que le producteur ne maîtrise pas, comme la conception, le lieu d'utilisation (exposition), l'installation, l'utilisation et l'entretien. La durée de vie présumée ne peut donc pas être interprétée comme une garantie donnée par le producteur ».

La durée de vie prévisible retenue dans les documents de normalisation européenne pour le produit « Étanchéité des ponts-route » est de 25 ans alors que la durée de vie prévisible retenue pour un pont est de 100 ans.

1.5 Point de départ des responsabilités

On distinguera deux cas de figure :

a) Dans le cas de marché séparé portant uniquement sur l'étanchéité, c'est la réception de l'étanchéité qui constitue le point de départ, en principe, des responsabilités citées ci-dessus. Cette situation peut, notamment, se rencontrer lors de réfection d'une chape d'étanchéité.

b) Dans le cas où l'étanchéité est sous-traitée, il est procédé à une réception des travaux d'étanchéité sous forme d'une levée d'un point d'arrêt qui est à prévoir à ce stade. Ceci peut permettre de répartir, ultérieurement, les responsabilités des dégradations avant la mise en œuvre des couches de roulement. Le point de départ des responsabilités sera alors la réception de l'ouvrage sur lequel l'étanchéité a été mise en œuvre (3).

2. La gestion prévisionnelle et préventive

2.1 Les enjeux de la surveillance

Il a déjà été évoqué dans le guide toute l'importance que revêtait l'efficacité de la chape d'étanchéité d'un ouvrage d'art pour garantir le vieillissement normal des matériaux constitutifs et donc la pérennité de la structure du tablier.

Par ailleurs les travaux d'entretien des chapes d'étanchéité représentent l'un des postes de dépense les plus importants pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires ; ils génèrent en outre des contraintes lourdes sur l'exploitation des voies portées (travaux de réfection de la chape phasés par demi-chaussée, voire exécutés sous coupure totale de circulation sur l'ouvrage).

Compte-tenu de la raréfaction des crédits disponibles pour assurer la maintenance des ouvrages d'art et de la prépondérance de plus en plus souvent donnée à l'exploitation par rapport aux aspects techniques, il est fondamental pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires de définir une politique prévisionnelle et préventive de surveillance et d'entretien de l'étanchéité de leurs ouvrages. Celle-ci doit leur permettre de détecter « à temps » les anomalies de la chape, c'est-à-dire avant que leurs conséquences sur la dégradation des matériaux constitutifs de la structure du tablier ne nécessitent des travaux d'entretien spécialisé voire de réparation, et d'optimiser les travaux de réparation ou de réfection nécessaires.

Compte-tenu de la durée de vie prévisible des produits d'étanchéité pour ponts-route, on peut considérer qu'une gestion prévisionnelle et préventive satisfaisante devrait conduire à procéder à 2, voire 3 réfections de la chape d'étanchéité pendant la durée de vie d'un ouvrage d'art.

2.2 L'initiation de la surveillance

2.2.1 La qualité des travaux initiaux

Rappelons que le point de départ fondamental d'une telle politique de gestion réside dans le **contrôle de la qualité des travaux initiaux**.

La chape d'étanchéité d'un ouvrage d'art et, de façon plus large, les fonctions étanchéité et assainissement d'un ouvrage doivent faire l'objet d'une étude de conception spécifique ; ces travaux doivent bénéficier de la même application que les travaux réalisés sur la structure, dans les principes du management de la qualité, avec un plan de contrôle conçu pour limiter au maximum les risques de présence et de non-détection de défauts initiaux.

Les récents progrès de certaines techniques non destructives de contrôle (notamment la thermographie infrarouge pour les feuilles préfabriquées FPM et FPA), permettent à celles-ci d'apporter une aide précieuse pour la levée du point d'arrêt relatif à l'autorisation de recouvrement de la chape d'étanchéité par la couche de roulement. Les travaux curatifs résultant de la détection de défauts en phase de chantier sont généralement peu coûteux et sans commune mesure avec ceux qui devront être réalisés ultérieurement en cas de non-détection de défauts significatifs évolutifs.

Même si ce concept n'est actuellement pas appliqué en France, le recours à une instrumentation initiale, au moyen d'une technique fiable (par exemple mesure de conductivité en tresses métalliques disposées dans des saignées longitudinales réalisées en extradados du support béton), judicieusement disposée sur l'ouvrage avant l'application de la chape, semble être une voie majeure d'amélioration de la gestion préventive de la surveillance et de l'entretien de la chape d'étanchéité.

2.2.2 L'inspection détaillée initiale

Lors de l'**inspection détaillée initiale de l'ouvrage**, on attachera une importance particulière à vérifier l'absence de défaut visible ou symptôme pouvant traduire un problème d'étanchéité sur l'ouvrage. On s'efforcera bien évidemment de déterminer si les éventuelles traces d'infiltrations constatées en sous-face de tablier (exsudations essentiellement) sont antérieures ou postérieures à la mise en œuvre de la chape d'étanchéité⁶... Les défauts seront notamment à rechercher au niveau des points sensibles que sont les relevés d'étanchéité, les raccordements avec les gargouilles ou avaloirs, les raccordements avec les joints de chaussée, etc.

Il devra bien sûr en être de même lors des futures **actions de surveillance planifiées de l'ouvrage (visites et inspections détaillées)**.

Rappel : il est conseillé de réaliser avant chaque inspection ou diagnostic de la chape d'étanchéité une analyse de risque simplifiée, sur la base du dossier d'ouvrage, pour identifier d'éventuels problèmes de conception ou de réalisation lors des travaux de construction de l'ouvrage ou de travaux de réfection de la chape d'étanchéité et/ou de la couche de roulement.

À noter qu'en cas de mise en évidence d'anomalies dans la conception ou la réalisation de la chape d'étanchéité et/ou de la couche de roulement sur l'ouvrage (par exemple détection de défauts initiaux non réparés, application tardive d'une protection de la chape d'étanchéité, épaisseur insuffisante de la couche de roulement, mise en service tardive de l'ouvrage, etc.), il pourrait être envisagé de réaliser un **suivi particulier** afin de lever le doute sur le comportement futur de la chape d'étanchéité et de la couche de roulement sus-jacente.

2.3 Le scénario de surveillance et de maintenance

2.3.1 Cas courants

Il est nécessaire de prévoir une **inspection spécifique** « de la chape d'étanchéité », en particulier de la fonction étanchéité, un peu **avant les termes de la garantie particulière**

6. Il est recommandé, dans le cadre des travaux de finition, de procéder à l'élimination des traces de circulation d'eau de façon à faciliter la surveillance ultérieure ; il en est de même après chaque réfection d'étanchéité durant la vie de l'ouvrage.

contractuelle (5 ans) et de la responsabilité décennale (10 ans). Une visite ciblée **avant le terme de la garantie de parfait achèvement des travaux (1 an)** est aussi conseillée. À noter que ces interventions devront être réalisées de préférence après une période pluvieuse afin d'augmenter la probabilité de détection d'anomalies en cas de défaillance de la chape d'étanchéité.

Un **diagnostic** de la chape d'étanchéité est conseillé **chaque fois qu'il est envisagé de renouveler la couche de roulement sur l'ouvrage** (*a priori* de 5 à 7 fois pendant la durée de vie de l'ouvrage, c'est-à-dire avec une fréquence moyenne prévisible double de celle de la réparation de la chape d'étanchéité), et ce d'autant plus si on s'approche de la fin de la durée de vie prévisible de la chape.

Lors de ces travaux, il peut, par exemple, être procédé à une auscultation par thermographie infrarouge après rabotage de la couche de roulement (diminution d'épaisseur de la couche de recouvrement de la chape), afin de révéler d'éventuels défauts d'adhérence. Les informations recueillies devront être prises en compte dans le cadre de la surveillance continue de l'ouvrage (zones douteuses nécessitant une attention particulière par exemple) et pourront éventuellement servir à l'implantation d'investigations complémentaires (fenêtres de reconnaissance par exemple) dans le cadre de l'établissement d'un éventuel projet ultérieur de réparation.

Dans le cas où les travaux sur la couche de roulement sont programmés alors que la chape arrive au terme de sa durée de vie théorique, il est conseillé que les marchés de réparation de cette couche de roulement comportent une **tranche conditionnelle** de réparation de la chape d'étanchéité, qui serait notifiée à l'issue d'une telle auscultation (point d'arrêt à spécifier par exemple à la fin de l'opération de rabotage de l'ancienne couche de roulement).

Il est également judicieux de réaliser un **diagnostic** de la chape d'étanchéité à l'**occasion de la préparation de travaux lourds de réparation de structure ou d'élargissement**, en mettant à profit l'éventuelle coupure programmée de la circulation ; si nécessaire, la réparation de la chape d'étanchéité devrait alors pouvoir être intégrée au niveau de la conception du projet.

2.3.2 Cas particuliers

La gestion prévisionnelle et préventive de la chape d'étanchéité d'un ouvrage doit également être définie en tenant compte des conséquences structurelles plus ou moins graves en cas de déficience de l'étanchéité.

Certains types de ponts ou de structures doivent ainsi être considérés « sensibles » et faire l'objet d'une surveillance rigoureuse éventuellement renforcée ; il s'agit par exemple :

- des ponts de type VIPP, en raison de la présence possible des ancrages des câbles de précontrainte relevés en extradados du tablier,
- des hourdis précontraints,
- des hourdis des ponts mixtes, en raison de l'importante fissuration, notamment dans les zones de moment négatif, etc.

Cette logique doit également être appliquée au cas des ouvrages d'art présentant des défauts de structure, lorsque l'apport d'eau alimente la pathologie (par exemple éléments de structure en béton affectés de réactions de gonflement interne).

2.3.3 Carnet de route

En définitive, au cours de la vie de l'ouvrage, il existe des dates « clés » pour lesquelles il est opportun de programmer des interventions de surveillance spécifiques de la chape d'étanchéité. Le tableau ci-dessous liste ces moments opportuns dans le cas idéal d'un ouvrage non « sensible », bien conçu et bien exécuté, faisant l'objet d'un entretien préventif.

Âge de l'ouvrage	Actions
0	Levée du point d'arrêt relatif à l'autorisation de recouvrement de la chape d'étanchéité par la couche de roulement
T = 0	Réception des travaux
T < 1 an	Inspection détaillée Initiale de l'ouvrage
T < 1 an	Éventuelle visite de fin de garantie de parfait achèvement des travaux
T = 3 ans	Visite d'évaluation de l'ouvrage (visite IQOA par exemple)
T < 5 ans	Inspection détaillée de fin de garantie particulière contractuelle de la chape d'étanchéité
T = 6 ans	Visite d'évaluation (visite IQOA par exemple) ou inspection de l'ouvrage (Inspection détaillée périodique par exemple)
T = 9 ans (< 10 ans)	Inspection détaillée de fin de responsabilité décennale
T = 12 ans	Visite d'évaluation (visite IQOA par exemple) ou inspection de l'ouvrage (Inspection détaillée périodique par exemple)
T = 13 à 17 ans	Diagnostic de la chape d'étanchéité à l'occasion de la première réparation prévisible de la couche de roulement sur l'ouvrage
T = 15 ans	Visite d'évaluation de l'ouvrage (visite IQOA par exemple)
T = 18 ans	Visite d'évaluation (visite IQOA par exemple) ou inspection de l'ouvrage (Inspection détaillée périodique par exemple)
T = 21 ans	Visite d'évaluation de l'ouvrage (visite IQOA par exemple)
T = 24 ans	Visite d'évaluation (visite IQOA par exemple) ou inspection de l'ouvrage (Inspection détaillée périodique par exemple)
T = 25 à 33 ans	Diagnostic de la chape d'étanchéité à l'occasion de la seconde réparation prévisible de la couche de roulement sur l'ouvrage et probable première réparation de la couche d'étanchéité
0	Levée du point d'arrêt relatif à l'autorisation de recouvrement de la chape d'étanchéité par la couche de roulement
T' = 0	Réception des travaux

Tableau 12. Scénario de surveillance et de maintenance

Xx : Contrôles d'exécution

Xx : Action de surveillance classique

Xx : Action de surveillance spécifique

Xx : Action de maintenance

3. Bibliographie

- [1] « Étanchéité des ponts routes support en béton de ciment », Fascicule 67 titre I du CCTG, avril 1985 (téléchargeable sur le site <http://www.btp.equipement.gouv.fr>).
- [2] « La durabilité et la directive Produits de construction », document guide F (DPC 89/106/CE), 1999.
- [3] « Mise en œuvre des chapes d'étanchéité », fiche MEMOAR (Memento pour la Mise en œuvre sur les ouvrages d'art), fiche N°X-1, Sétra, mars 2005, révision octobre 2007, CD-ROM référence 0757CD.

CHAPITRE 6

PERSPECTIVES ET DÉVELOPPEMENTS



1. Évolution des complexes d'étanchéité

1.1 Développement durable

Le principe du développement durable est de satisfaire les besoins actuels sans compromettre la possibilité pour les générations futures de satisfaire leurs propres besoins. Au niveau national, le Grenelle de l'environnement fixe des objectifs ambitieux en vue, en particulier, d'économiser les matières premières d'origine fossile et de réduire et recycler les déchets du BTP.

Les complexes d'étanchéité sont majoritairement composés de produits d'origine pétrolière (bitume), ou de composés à base de polymères qui sont des ressources non renouvelables. Dans le domaine des enrobés et des étanchéités, il semble que certaines évolutions sont déjà initiées :

- le recyclage des matériaux d'étanchéité bitumineuse éliminés lors des réparations : réutilisation dans les enrobés sous forme de fraisats ;
- l'utilisation de composants renouvelables, par exemple des adjuvants végétaux, en remplacement de ceux d'origine pétrolière ;
- l'évaluation environnementale (dont le bilan carbone et le bilan COV⁷) de la production et de la mise en œuvre d'une chape d'étanchéité (FDES⁸ et à terme après intégration de la durée de vie : ICV⁹) ;
- la réduction des températures de fabrication et de mise en œuvre des produits bitumineux entrant dans la composition d'une chape d'étanchéité ;
- l'évolution des produits au contact de l'étanchéité (béton du tablier (BFUP¹⁰), enrobé à basse température, etc.) aura des conséquences sur la conception des chapes et leurs performances attendues.

En complément, d'autres préoccupations sont également au centre des possibilités d'évolution des chapes d'étanchéité :

- la gestion des déchets ou/et leur optimisation, avec la mise en place d'un plan de gestion des déchets SOSED¹¹ ;
- le respect des contraintes liées à l'hygiène et à la sécurité avec l'application de la réglementation REACH¹², qui pourra conduire à la mise au point de nouvelles molécules.

7. COV : Composé organique Volatil.

8. FDES : Fiche de données environnementales et sanitaires.

9. ICV : Inventaire de cycle de vie.

10. BFUP : Béton fibré ultra performant.

11. SOSED : Schéma d'organisation, de suivi et d'élimination des déchets.

12. REACH : Registered Evaluation Authorization Chemicals (REACH est le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques. Il est entré en vigueur le 1^{er} juin 2007. REACH rationalise et améliore l'ancien cadre réglementaire de l'Union européenne (UE) sur les produits chimiques.

Ces exemples de perspectives ne constituent pas une liste exhaustive et nul doute que d'autres évolutions verront le jour dans les prochaines années tout en respectant les exigences performantielles des produits (avis techniques).

1.2 Réglementation

La réglementation sur les chapes d'étanchéité doit évoluer dans les prochaines années. En effet, le marquage CE des produits s'est intéressé à deux procédés d'étanchéité utilisés sur les ponts route en béton :

- ▶ les feuilles préfabriquées bitumineuses, et recouvertes (ou non) d'asphalte, qui seront soumises au marquage CE au travers d'une norme homologuée performantielle (1). Cette norme européenne spécifie la définition et les performances du produit en relation avec les caractéristiques des feuilles bitumineuses armées pour l'étanchéité des ponts en béton et autres surfaces en béton circulables par les véhicules. La norme se réfère à des méthodes d'essais européennes pour vérifier ces caractéristiques.
- ▶ les procédés par systèmes d'étanchéité liquide (FMAS / SEL), qui seront soumis au marquage CE au travers d'un agrément technique européen, lui-même basé sur un guide d'évaluation (ETAG) en cours d'approbation (2) :
 - L'ETAG traite des produits (ou kits) d'étanchéité liquides appliqués sur les tabliers de ponts, comprenant des liquides appliqués *in situ* à base de bitumes, de polymères, de résines ou de mortiers modifiés par des polymères. Ils sont susceptibles d'être coulés, répandus ou projetés, en une ou plusieurs couches, sur une surface existante d'un tablier de pont pour aboutir, une fois sec, à une couche d'étanchéité continue ;
 - le tablier du pont sera généralement en béton de ciment mais d'autres matériaux supports peuvent être prévus (par ex. métal, brique, etc.) ;
 - le kit peut inclure des couches de protection (par ex. bitumineuses ou autre feuille de protection), des armatures et/ou d'autres produits annexes (par exemple primaires, tack-coats, etc.)
 - ces produits ne sont pas directement circulés par un trafic de véhicules, et reçoivent, au-dessus, une couche d'asphalte, de béton, d'enrobé, etc. Cette couche est hors du domaine d'application de l'ETAG, mais sera prise en compte si elle interagit avec le kit. Quand ils sont circulés par des piétons ou des cyclistes ou sont non circulés (ponts rails non ballastés), les couches peuvent alors ne pas être recouvertes.

Par ailleurs, l'asphalte pour étanchéité est soumis à une norme de définition, de caractérisation et d'évaluation (3).

Le marquage CE et la norme relative à l'asphalte pour étanchéité devront permettre l'évaluation comparative des produits dans une même famille (par des essais ou par le calcul) sur la base de principes identiques dans toute l'Europe ; il appartiendra alors aux structures nationales (révision des fascicules du CCTG) ou aux maîtres d'œuvre de définir les caractéristiques minimales à exiger de ces produits pour une utilisation pratique.

2. Évolution des méthodes d'auscultation

2.1 Contexte

L'utilisation de plus en plus fréquente des techniques d'auscultation non destructive en génie civil, toutes applications confondues, induit une évolution de ces techniques qui ne peut être que favorable pour la problématique des complexes d'étanchéité. L'aspect non destructif, la réalisation de mesures en continu sur un ouvrage, la possibilité de multiplier les mesures ainsi que les perspectives de suivi instrumenté des structures dans le temps font partie des avantages principaux de ces techniques.

Ces évolutions tendent vers une possibilité d'évaluation directe et globale des chapes. Ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle puisque l'auscultation est basée sur des séries de mesures non destructives délimitant simplement des zones significatives, et nécessitant un étalonnage par sondage destructif pour confirmer (ou non), pour quantifier ou pour qualifier les anomalies détectées. Différentes pistes d'évolution sont en cours d'étude et pourraient être appliquées à la problématique d'évaluation de l'état du complexe « couche de roulement / étanchéité » :

- amélioration de la résolution des mesures de manière technologique ou par traitement des données,
- augmentation du nombre de mesures par l'intermédiaire de réseaux de capteurs, permettant ainsi de reconstruire des images 3D de la géométrie de la zone auscultée,
- reconstruction d'images – 2D ou 3D – donnant directement les caractéristiques physiques (électromagnétiques, mécaniques ou électriques suivant le type d'ondes ou de champs utilisé) de la zone auscultée.

Enfin, ces évolutions peuvent correspondre au développement de nouvelles techniques ou à l'amélioration des performances électroniques ou informatiques. Les évolutions électroniques laissent supposer l'apparition à moyen terme de réseaux de capteurs et de système d'acquisition à grand rendement (dans le domaine de la détection des armatures, le passage du pachomètre® (ou équivalent) au Ferroskan® (ou équivalent) est un exemple de cette évolution). De même, les améliorations régulières de l'informatique, tant en vitesse de calcul qu'en capacité de mémoire, vont permettre la réalisation de cartographies et/ou de reconstruction d'images en temps réel.

Tous ces aspects généraux montrent que les investigations futures sur les chapes d'étanchéité devraient pouvoir s'effectuer de manière plus précise et plus fiable, tout en minimisant les temps d'interventions et donc la gêne aux usagers.

2.2 Méthodes et techniques

Les méthodes présentées dans cette rubrique sont des exemples innovants étudiés dans le réseau des LPC. Par la suite, on distinguera d'une part les méthodes électromagnétiques (radar et infrarouge) et d'autre part les méthodes soniques.

2.2.1 Techniques radar

La technologie radar tend à proposer des antennes impulsionnelles commerciales avec des fréquences centrales de plus en plus hautes pour une meilleure résolution ou détectabilité d'hétérogénéités de petites dimensions en proche surface. Dans les années 2000, des antennes de 1,5 GHz de fréquence centrale (longueur d'onde équivalente ~8-12 cm dans du béton) sont apparues pour la localisation des armatures passives comme actives dans le béton armé/précontraint. Dès 2007-08, il était possible de disposer d'antennes supérieures à 2 GHz (aujourd'hui, 2,6 GHz) dont les longueurs d'onde se situent autour de ~5-8 cm.

Il est logiquement envisageable de penser que, dans le futur, les constructeurs vont poursuivre dans cette évolution pour le marché du domaine routier, les épaisseurs de couches de roulement s'amincissant de plus en plus (épaisseur moyenne du BBTM – béton bitumineux très mince – 2-3 cm actuellement non contrôlable par les techniques radar courantes).

De même, une autre technologie à impulsion synthétique, à partir de mesures à sauts de fréquence, commence à concurrencer la technique impulsionnelle plus classique. Elle présente l'avantage d'être moins limitée en fréquence. Elle n'est apparue que récemment car elle présentait l'inconvénient majeur d'être trop lente en acquisition pour un coût exorbitant.

Des mesures comparées ont été réalisées sur un site test spécifique pour la qualification des matériels radar du réseau des LPC (figure 112). Il est composé de quatre structures types,

alliant différents matériaux et épaisseurs, avec des plaques métalliques insérées à certaines interfaces pour servir de repère.

Le premier profil radar (figure 112b), réalisé à l'aide d'une antenne impulsionnelle de contact centrée sur 1,5 GHz, montre notamment que, sur la structure la plus à gauche, il n'est pas possible de dissocier les interfaces de la couche de 6 cm de béton bitumineux (BB). En revanche, la profondeur de pénétration de cette antenne est suffisante pour détecter la plaque métallique située sous la grave ciment (GC), pourtant plus atténuante pour les ondes radar.

Le profil suivant (figure 112c) montre le résultat d'une antenne impulsionnelle portée, centrée sur 2 GHz, et dont l'application type est l'auscultation des chaussées. Sa résolution est suffisante pour pouvoir estimer l'épaisseur de la couche de 6 cm de BB.

Le dernier profil (figure 112d), réalisé par technique à sauts de fréquence à l'aide d'une antenne spéciale ultra-large bande (ULB) portée et centrée sur 3,2 GHz, montre un niveau de résolution permettant d'ausculter des couches minces de 3-4 cm avec un tel système (4).

Sachant que l'estimation des épaisseurs de chaussées est obtenue à partir des pointés des temps de trajet des ondes à travers la couche étudiée, les incertitudes sur ces pointés pour le cas de la couche de BB de 6 cm sont respectivement de $\pm 0,31$, $\pm 0,27$ et $\pm 0,16$ ns pour les trois profils.

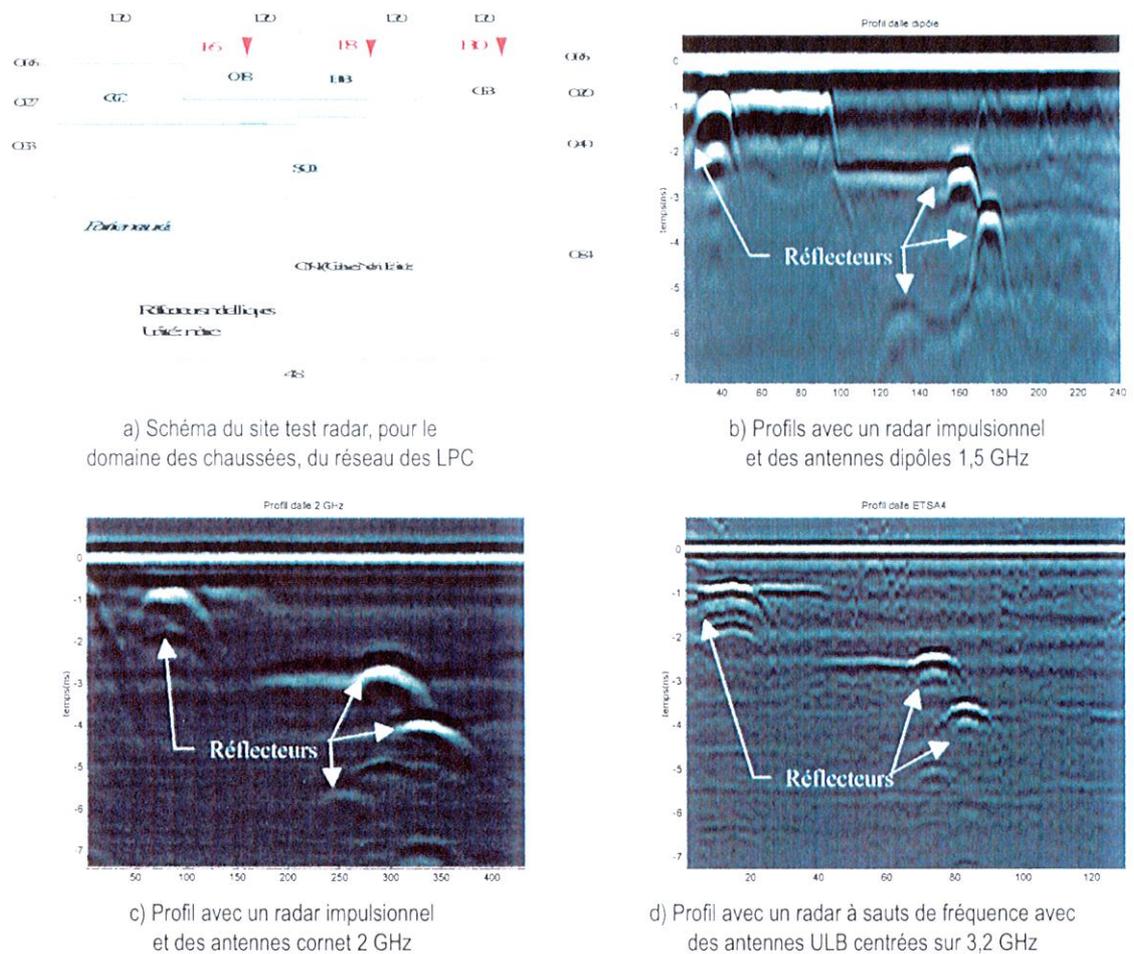
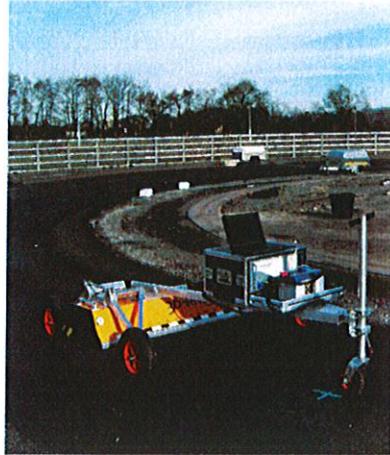
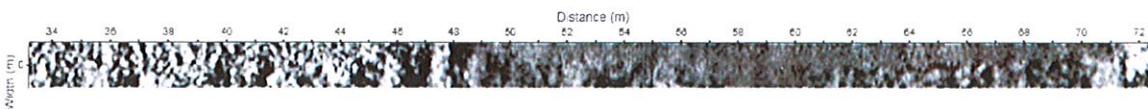


Figure 112. Les techniques radar impulsionnelles et à sauts de fréquence

En complément de ces approches techniques, les fournisseurs radar proposent de plus en plus des systèmes à réseaux d'antennes dans le but de cartographier des structures ou sols, en minimisant le nombre de passages.



a) Système à réseau d'antennes (matériel 3D-radar)



b) Exemple de cartographie sur chaussée

Figure 113. Système radar à réseau d'antennes

Le matériel présenté figure 113 permet de réaliser en parallèle 21 profils radar sur une largeur utile de $\sim 1,60$ m. On peut visualiser en direct (pendant l'acquisition) un profil longitudinal, un profil transversal, ainsi qu'une cartographie à une profondeur donnée. Ce système travaille à sauts de fréquence avec des antennes de fréquence centrale d'environ 1,5 GHz.

Son électronique permet de plus de réaliser des mesures à écartements « émetteur-récepteur » variables. Cette configuration particulière a pour fonction d'estimer la vitesse et l'épaisseur de couches superficielles au centre du réseau d'antennes, pour le cas particulier de couches horizontales. Cette technique de mesure a été développée en géophysique, il y a plusieurs décennies, pour l'estimation de la profondeur de couches géologiques, et est actuellement considérée comme parfaitement maîtrisée dans ce domaine technique.

Pour le domaine des chaussées, ou pour l'application particulière du diagnostic des chapes d'étanchéité, on peut espérer dans un futur « proche », l'apparition d'imageurs ou « carottiers virtuels », utilisant un réseau d'antennes très hautes fréquences (supérieures à celles actuellement disponibles) et pouvant acquérir des mesures pour toutes les configurations émetteur-récepteur possibles et reconstruire une section verticale de la structure auscultée, dont la résolution serait compatible avec les dimensions des hétérogénéités recherchées (remontées de fissures, délamination, « état du béton » sous chape...).

2.2.2 Techniques mécaniques

Les techniques mécaniques exploitent la mise en vibration de la structure ou la propagation des ondes mécaniques dans le matériau ausculté. En matière vibratoire, une altération du matériau ou d'une interface se traduit par une modification des fréquences de vibration ou par la vibration d'une sous-structure avec un changement de conditions aux limites. En propagation d'ondes, tout changement de nature mécanique du matériau se traduit par une variation de vitesse de propagation et une réflexion partielle de l'onde émise. Dans le cas de vide franc (fissure, délamination, fond de structure), cette onde est totalement réfléchi.

Deux techniques développées ou étudiées au sein du RST ont été testées sur un site test dédié aux complexes d'étanchéité à Margenne près d'Autun. Ces deux techniques analysent

la réponse en champ proche de la chaussée à une sollicitation de type marteau. La première méthode, nommée auscultation dynamique, étudie la vibration de la structure. Elle a été développée par le RST pour la problématique de décollement entre couches traitées de chaussées. Elle est décrite dans la méthode d'essai LPC n° 70 (5). La seconde, nommée Impact Echo, est basée sur la propagation d'ondes (de compression et de Lamb selon le contexte). Elle a été développée pour une problématique d'auscultation d'ouvrages d'art, de mesure d'épaisseur, de détections de vides et de délaminations mais aussi pour la détection des vides dans les conduits de précontrainte.

2.2.2.1 Méthode COLIBRI

L'appareil de mesure COLIBRI applique la méthode d'auscultation dynamique. Il exerce successivement trois impacts sur la chaussée et mesure à la fois la force appliquée et l'accélération verticale à l'aide d'un accéléromètre maintenu par un système masse-ressort, distant de 10 cm de l'émission. En chaque point, les « fonctions de transfert et de cohérence » de la chaussée sont calculées dans le domaine fréquentiel.

La valeur de la fonction de cohérence, comprise entre 0 et 1, permet, lorsqu'elle est supérieure à 0,8, de valider l'essai pour chaque fréquence. Pour minimiser les effets liés aux conditions d'essais, une fonction de référence, supposée représenter l'état sain, est statistiquement construite à partir de l'ensemble des mesures. Elle permet de calculer une valeur de dommage normalisée à chaque fréquence pour chaque point de mesure.

Une image de la structure est alors construite en fonction de l'abscisse de la mesure et de la fréquence. L'analyse consiste alors à étudier les variations de réponse de la structure sur l'ensemble des fréquences.

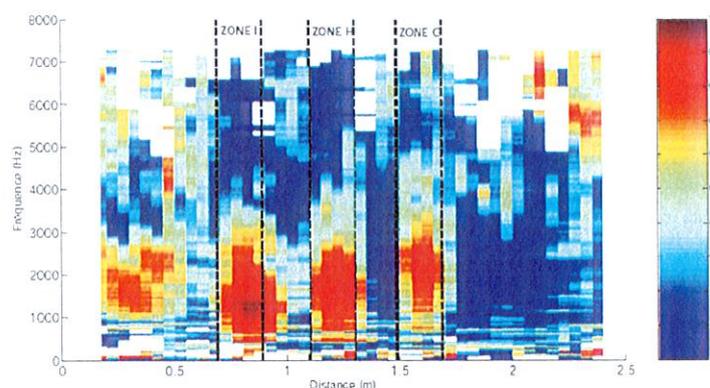


Figure 114. Exemple de résultat de mesure COLIBRI sur une structure test composée d'une dalle de 0,20 cm de béton armé, de trois défauts de « collage » d'une feuille préfabriquée monocouche sous 7 cm d'enrobé

La figure 114 montre un exemple de résultat sur une structure présentant trois défauts simulants un décollement. Un tel défaut « vibre » comme une sous-structure et se traduit par un niveau d'endommagement plus élevé dans une gamme de fréquence basse (à noter que sur la gauche de l'image, les mesures sont perturbées par des effets de bord qui représentent un changement de conditions aux limites).

Les essais sur ce site test ont montré que la détection et la localisation de défauts d'interface est réalisable avec la technique COLIBRI, mais ne permet pas sa caractérisation (nature du défaut d'interface, présence ou non d'eau).

Le rendement de cette technique est faible puisque les mesures sont réalisées ponctuellement. Néanmoins, un prototype opérationnel est en cours de développement au sein du RST pour une application à la détection de décollement entre couches traitées de chaussées. Dans certains cas particuliers et moyennant une étude de faisabilité, on pourra envisager son utilisation pour le diagnostic des chapes.

2.2.2.2 Méthode Impact Écho

La technique Impact Écho, quant à elle, exploite directement la fréquence des allers-retours des ondes mécaniques (consécutives à un choc) en mode « réflexion » (le récepteur étant au plus proche de l'émetteur). Développé dans les années 80, pour mesurer des épaisseurs de structure, le matériel est composé d'une série d'impacteurs (billes d'acier de diamètres variables) et d'un capteur piézoélectrique. L'impacteur est choisi en fonction du matériau étudié et de son épaisseur probable. Les ondes qui se propagent dans le matériau ont d'abord été interprétées comme des ondes de compression faisant des allers-retours entre la face auscultée et la surface (ou interface) où se réfléchissent les ondes (6).

Plus récemment, des travaux ont été étendus aux chaussées et analysés en fonction de la nature de l'interface et des caractéristiques mécaniques des différentes couches (7).

Le signal temporel enregistré est visualisé en temps réel dans le domaine fréquentiel par l'intermédiaire d'une transformée de Fourier. Pour la problématique des complexes d'étanchéité, la présence d'un défaut de collage se traduit par l'apparition d'un pic de fréquence de résonance qui se déplace vers les hautes fréquences.

La figure 115 montre deux exemples de résultats provenant du site test de Margenne à Autun. Sur la figure 115a), correspondant à une chape de type FMAS / SEL non recouverte d'enrobé, le pic de fréquence (centré sur environ 8000 Hz) correspond à l'épaisseur du système d'étanchéité (réflexion des ondes sur l'interface entre le film mince et son support). Les résultats ne montrent pas de variations significatives au droit des défauts d'adhérence dont l'importance et la position ne sont plus clairement définies (site test âgé de plus de six ans en extérieur, dont les chapes ont pu se dégrader et dont les défauts de collage ou d'adhérence ont pu évoluer).

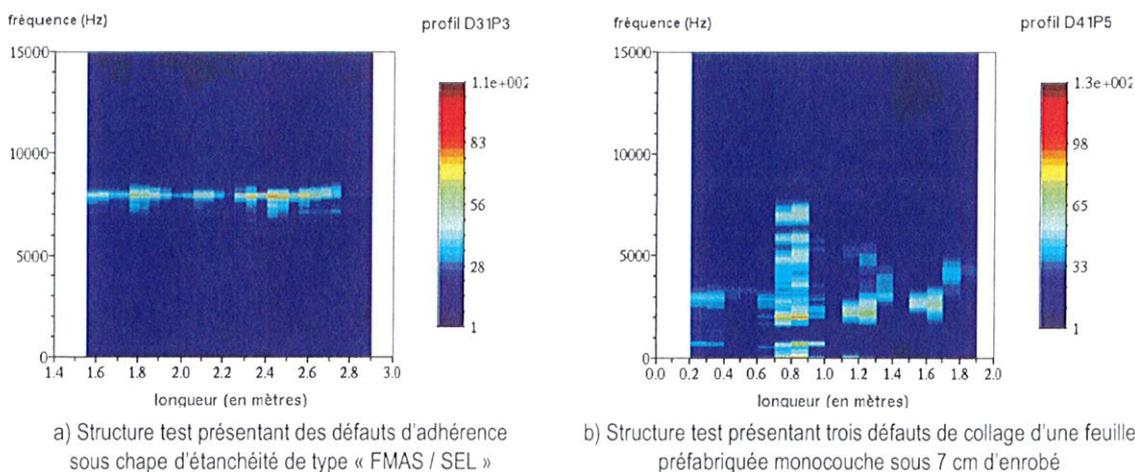


Figure 115. Mesures Impact Echo sur deux structures test

Pour le cas de la dalle simulant une structure en service (figure 115b), les défauts de collage sont détectés : pics de fréquence (centrés entre 2000 et 3000 Hz) localisés aux abscisses 0,8, 1,2 et 1,6 m le long du profil de mesure. La mesure du pic de fréquence permet en outre de localiser le défaut dans l'épaisseur de la structure auscultée : la fréquence des pics correspond à la réflexion des ondes sur le réflecteur créé par le défaut de collage. Les mesures restent néanmoins bruitées et sensibles au contact capteur-enrobé. Cette technique, encore au stade de développement, paraît prometteuse pour la détection de défaut d'interface notamment entre la chape et son support.

Actuellement, les techniques mécaniques sont limitées car elles nécessitent un contact statique et franc entre le capteur et la structure auscultée ; ce qui est préjudiciable pour des mesures à grand rendement. Le développement de nouveaux capteurs (vibrométrie laser, microphones), qui faciliteront le couplage capteur-chaussée en élargissant la bande passante, devrait permettre un usage plus opérationnel de ces techniques.

2.2.3 Technique infrarouge

La technologie des caméras infrarouges est en rapide évolution. Des progrès dans les techniques de fabrication et d'intégration des détecteurs et dans l'électronique associée permettent aux constructeurs de proposer des caméras présentant des performances sans cesse accrues. L'augmentation du nombre de détecteurs sur les matrices permet notamment d'améliorer la résolution spatiale (plus de pixels) des images fournies par les appareils. La sensibilité plus élevée des caméras de terrain améliore la qualité des images et permet de détecter des différences de températures plus réduites.

De nouvelles fonctionnalités devraient faciliter les interventions et permettre de développer de nouvelles techniques de mesure.

Les caméras infrarouges sont maintenant équipées de façon quasi systématique d'une caméra visuelle. Pour l'instant, il n'est pas possible de profiter d'objectifs visibles et infrarouges coaxiaux ; les images sont toujours décalées. La différence de résolution entre les images « visibles » (plusieurs millions de pixels) et des images infrarouges (quelques dizaines de milliers de pixels) est encore très importante. Cette association visible-infrarouge est pratique pour la phase d'exploitation des thermogrammes sans pour autant permettre une superposition aisée et une exploitation simultanée des deux images. Le perfectionnement de ce dispositif facilitera l'interprétation des campagnes de mesure et permettra d'élaborer des traitements couplés des deux images. On peut envisager, par exemple, une technique permettant de lever des artefacts de mesure liés aux variations d'état de surface.

Même si des évolutions du matériel continueront d'améliorer le confort d'utilisation des caméras infrarouges, les phénomènes de transferts thermiques observés via le champ de température de surface seront inchangés. Dans le cas d'une auscultation de structure avec enrobé, l'épaisseur importante de la couche de roulement impose d'étudier la réponse à une sollicitation thermique se diffusant profondément dans le matériau. Cette propriété est obtenue pour des signaux thermiques de grande constante de temps. Dans le contexte de l'auscultation d'un tablier de pont, seule l'observation des effets thermiques de l'alternance naturelle jour/nuit semble pouvoir satisfaire cette contrainte. L'approche passive apparaît incontournable. Des améliorations des techniques infrarouges ne peuvent être espérées que dans l'étude comparative de thermogrammes obtenus à des moments différents ou encore dans l'exploitation de séquences de thermogrammes.

Une solution consiste à relier des thermogrammes issus de campagnes différentes en prévoyant un positionnement spatial précis de chaque pixel. Le couplage avec un système GPS peut permettre un géoréférencement. Il est à noter que certaines caméras du marché sont d'ores et déjà équipées d'un système GPS interne idéal pour ce type de démarche.

Une autre voie consiste à implanter une caméra fixe et à programmer un enregistrement sur une période de plusieurs jours ou semaines. Les caméras actuelles bénéficient des derniers progrès en matière de numérisation, stockage et transfert des données. Elles peuvent être couplées à des systèmes de communication à distance (wifi ou GSM par exemple). Elles autorisent une surveillance en continu de l'ouvrage ou en se limitant à des moments clés de sa vie. Les moments où l'enrobé est raboté pour renouvellement permettent par exemple une auscultation à épaisseur réduite qui maximise les effets des anomalies sur le champ de température. En association avec les données topographiques du site, des observations infrarouges sur quelques semaines permettraient de proposer une cartographie des variations de température sous la forme d'un SIG.

L'enregistrement des évolutions des températures permettra d'appliquer les méthodes d'interprétation fréquentielle qui permettent de limiter l'analyse à des composantes d'intérêt comme le cycle jour/nuit dans le cas présent et d'éliminer les composantes plus rapidement variables qui peuvent masquer l'information. Un suivi simultané des sollicitations en associant une station de mesure météorologique et des capteurs de flux et température sur l'ouvrage chaîne permettrait une approche entrée / sortie.

2.3 Traitement des mesures

Les techniques de traitement des données font partie des approches transversales tant du point de vue de l'application (génie civil, communication, transport, santé...) que des techniques de mesures employées. Elles sont bien sûr adaptées aux configurations particulières étudiées (dimensions et nature des milieux concernés, disposition et nombre de capteurs...) et regroupent les techniques de traitement du signal, et les techniques d'inversion ou d'estimation de paramètres.

Les techniques de traitement du signal vont s'intéresser aux signaux eux-mêmes en cherchant à recueillir le maximum d'information soit en discriminant le signal du bruit (en augmentant le rapport signal sur bruit), soit en améliorant sa résolution temporelle (en compressant les impulsions par exemple).

On peut citer en exemple des travaux de thèse (8) portant sur l'étude comparée de techniques de compressions de signaux (dites à « super » ou « haute résolution ») et permettant d'améliorer la résolution des systèmes radar classiques dans un rapport supérieur à trois – validation expérimentale réalisée sur une plaque de PVC de 2 cm à l'aide d'une antenne de fréquence centrale 1,5 GHz (figure 116).

On note, en partie supérieure de la figure 116b), que les échos radar provenant des deux interfaces successives du PVC se mêlent par manque de résolution (comme présenté en figure 112). Un traitement du signal adapté permet de détecter ces deux interfaces signalées par les deux droites verticales en pointillé.

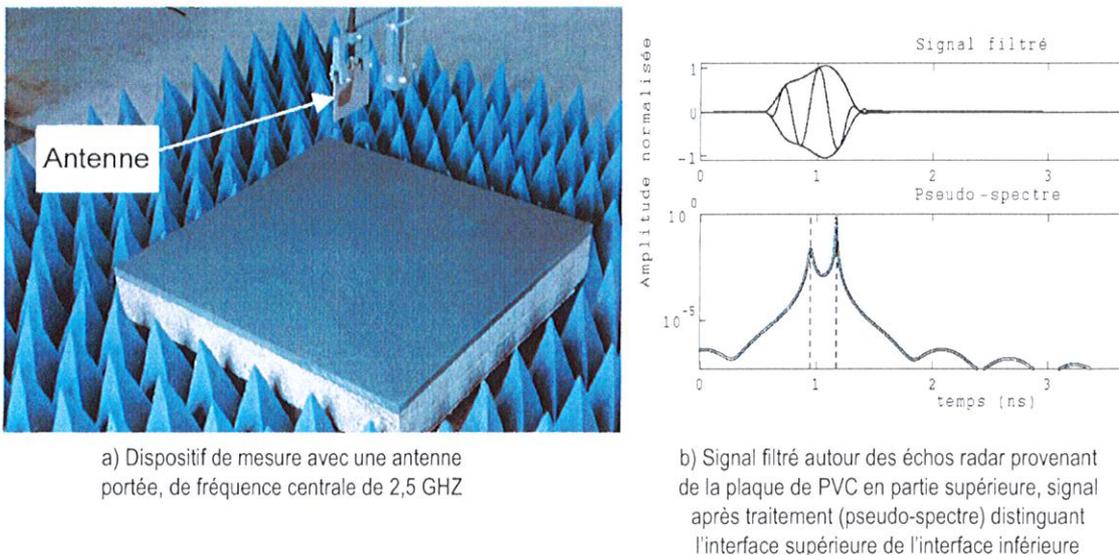


Figure 116. Expérimentation sur une plaque de 2 cm de PVC posée sur une plaque de 5 cm de granit

L'intérêt d'une telle approche est de pouvoir combiner profondeur d'auscultation, en utilisant des antennes de fréquences centrales de 1 à 2 GHz, et forte résolution par traitement du signal. Ce travail de recherche est un exemple qui reste à être validé sur matériaux de chaussées et sur des mesures dynamiques.

3. Instrumentation initiale des ouvrages

3.1 Contexte et problématique

La détection de la défaillance de la chape d'étanchéité d'un pont à des stades intermédiaires entre l'état neuf et la fin de vie est un élément important de diagnostic et de choix de la

technique de réparation appropriée. D'une part la défaillance de la chape d'étanchéité est défavorable à la pérennité de l'ouvrage et d'autre part sa réfection, quand elle s'avère nécessaire, représente un coût important relativement au coût de mise en œuvre initiale (à cela s'ajoute les coûts indirects liés à la gêne à l'utilisateur, à la limitation d'exploitation de l'ouvrage, etc.). La détection précoce d'une défaillance affectant la chape d'étanchéité est donc un objectif majeur pour garantir la durabilité de l'ouvrage à moindre coût et constitue un enjeu économique pour le maître d'ouvrage gestionnaire.

Bien évidemment, il existe des techniques d'investigations qui permettent de détecter ces défaillances (et le guide le montre). Certaines de ces techniques sont non destructives mais restent malgré tout coûteuses et d'interprétation plus ou moins complexe. La plupart des techniques sont destructives, nécessitent des moyens parfois lourds, occasionnent des gênes à l'exploitation des ouvrages et représentent des contraintes non négligeables pour le maître d'ouvrage gestionnaire. Enfin, le fait que ces investigations ne soient programmées que ponctuellement au cours de la vie de l'ouvrage constitue un point faible dans la démarche de suivi, de diagnostic et d'anticipation des défaillances.

3.2 Les systèmes d'instrumentation intégrée

D'une manière générale, la réduction des coûts de maintenance des infrastructures par un meilleur suivi et une meilleure connaissance de leur comportement dans le temps crée un enjeu technique majeur des prochaines années dans le domaine du génie civil. On voit ainsi émerger le besoin d'outils de suivi et de diagnostic des ouvrages existants « assistés par ordinateur » : certains parlent d'« ouvrages intelligents ». Bien que le contrôle des infrastructures existantes soit de loin prépondérant, il existe une réelle opportunité pour les systèmes d'instrumentation d'être intégrés au cours de la construction de l'ouvrage et installés à demeure. Ces nouvelles méthodes apparaissent déjà dans de nombreuses applications opérationnelles.

Basées sur la mise en place de capteurs intégrés à la structure lors de sa construction, elles présentent de nombreux avantages : elles sont non destructives, ne nécessitent pas de moyens d'accès et donnent des informations en continu (via un système d'acquisition) sur le comportement de l'ouvrage. Ces concepts concernent également les chapes d'étanchéité. Certaines expérimentations ont d'ailleurs été menées dans ce sens et des perspectives de développement existent, en particulier celles décrites ci-après.

3.3 Exemple d'applications sur les chapes d'étanchéité

Plusieurs systèmes d'instrumentation ayant pour objectif la détection de défaillances dans la chape d'étanchéité ont été mis en place sur divers ouvrages en Belgique, notamment par le Ministère wallon de l'Équipement et des Transports (MET). Ils s'appuient sur une méthode visuelle et des méthodes électriques.

3.3.1 Méthode visuelle

L'ouvrage est équipé de busettes de décompression reliées à des drains situés sous la chape d'étanchéité. Ces busettes sont terminées par des tubes transparents permettant de révéler l'éventuelle présence d'eau (figure 117).

Elles sont disposées à intervalles réguliers sous le hourdis de l'ouvrage et notamment aux points bas du tablier. Leur lecture est réalisée à l'aide de jumelles. La présence d'eau dans les tubes indique une défaillance de la chape d'étanchéité.

Ce dispositif, bien que simple dans son principe, se révèle parfois difficile à exploiter en raison notamment d'un éclairage insuffisant, de l'opacification des tubes permettant la lecture, de leur obstruction et de la disparition possible des bouchons.

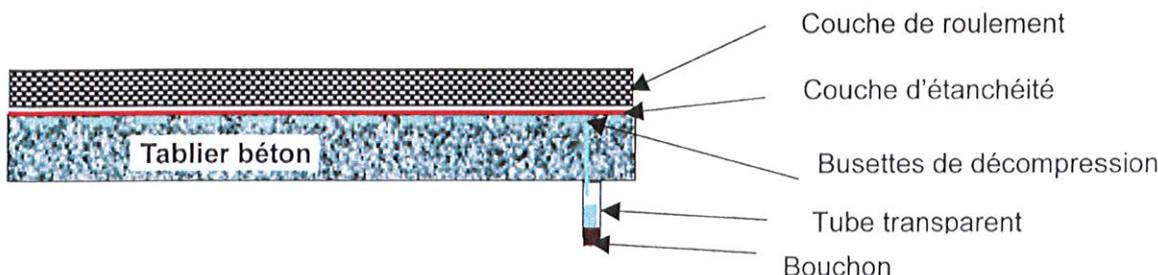


Figure 117. Schéma de principe de fonctionnement d'une busette de décompression

La mise en œuvre d'un tel dispositif à la construction du tablier est complexe et coûteuse. Une attention toute particulière doit notamment être apportée lors de la mise en œuvre de la chape d'étanchéité pour ne pas endommager ou obstruer les busettes.

3.3.2 Méthodes électriques

Deux méthodes ont été élaborées, expérimentées en laboratoires et mises en œuvre sur différents ouvrages par le Ministère wallon de l'Équipement et des Transports (9). Leur principe est basé sur la mesure de la résistivité du béton entre des électrodes noyées dans celui-ci préalablement à la mise en place du système d'étanchéité. Les méthodes se différencient par la nature et le type des électrodes.

Le principe du dispositif consiste à déterminer l'impédance du béton par la mesure de l'intensité d'un courant injecté entre les électrodes sous une différence de potentiel donné. Une défaillance de la chape implique une présence d'eau dans le béton support et se traduit par une diminution de l'impédance du béton et donc par une augmentation de l'intensité du courant mesurée.

Après une baisse de l'intensité du courant due au séchage du béton d'enrobage des électrodes, un palier est atteint. Un suivi dans le temps de l'intensité permet alors de s'assurer de l'efficacité de la chape d'étanchéité. Une augmentation de l'intensité est considérée comme une anomalie pouvant être symptomatique d'une infiltration d'eau.

Deux principaux systèmes ont été éprouvés :

- le premier système est constitué d'une paire de tresses de cuivre étamé placées dans deux rainures parallèles distantes de quelques centimètres (figure 118). Ces rainures peuvent, par exemple, être réalisées par meulage/fraisage dans le béton durci. Après pose des deux tresses, les gorges sont rebouchées au moyen d'un mortier hydraulique. La chape d'étanchéité puis la couche de roulement sont ensuite mises en œuvre sur l'ouvrage. Une

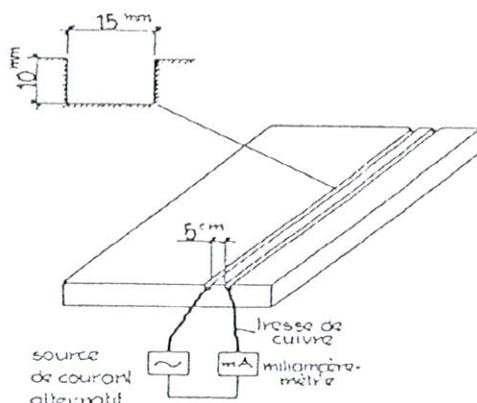


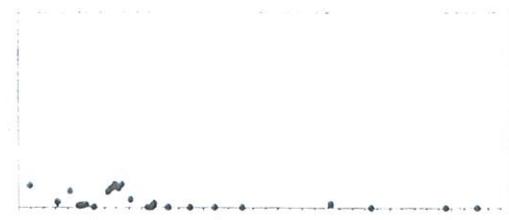
Figure 118. Dispositif de mesure entre deux tresses de cuivre étamé

(Source : J.-C. Bourcy, Ph. Demars, « Chapes d'étanchéité – Contrôle non destructif et dans le temps de leur efficacité », Roofing and waterproofing worldwide VI international conference, London, 30 avril-2 mai 1986)

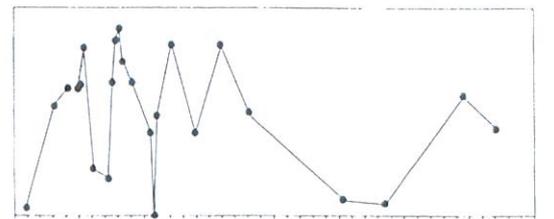
tension alternative est appliquée entre les deux tresses et l'intensité du courant débité est mesurée. Il s'agit donc d'une mesure indirecte de l'impédance du béton situé entre les deux tresses.

Le nombre de paires de tresses, leur longueur et leur positionnement dépendent de l'ouvrage, de la géométrie de son profil en travers et du type de chape d'étanchéité. Dans le cas d'une chape d'étanchéité en semi-indépendance, par exemple, l'implantation des paires de tresses en point bas du profil sera privilégiée.

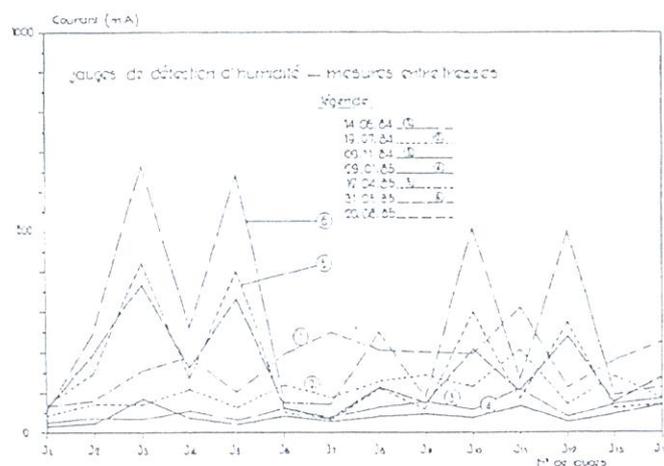
➤ le deuxième système est une variante du premier. Il consiste à mesurer le courant entre d'une part les deux tresses de cuivre étamé et d'autre part le lit supérieur d'armatures.



a) Suivi d'intensité sur une tresse – les faibles intensités indiquent un béton sec (source : MET, 1996, référence (10) de la bibliographie)



b) Suivi d'intensité sur une tresse – les fortes intensités et leur variation sont symptomatiques d'un béton humide et sensible aux conditions météo (épisodes pluvieux) (source : MET, 1996, référence (10) de la bibliographie)



c) Suivi d'intensité sur plusieurs tresses – Certaines tresses (appelées jauges) présentent de fortes intensités

Figure 119. Exemple de résultats d'une instrumentation d'ouvrage (source : J.-C. Bourcy, Ph. Demars, « Chapes d'étanchéité – Contrôle non destructif et dans le temps de leur efficacité »)

L'expérience montre qu'en dessous d'une certaine intensité le béton peut être considéré comme sec et donc que la chape d'étanchéité joue pleinement son rôle. *A contrario*, les dispositifs permettent indirectement, par la mesure des variations d'intensité, de suivre l'évolution de la résistivité du béton sous la chape et donc sa teneur en eau.

Le dispositif de contrôle de l'intensité du courant entre tresses fournit des résultats plus significatifs que celui basé sur la mesure d'intensité entre tresses et armatures. En effet, la présence d'humidité en provenance de la partie inférieure du tablier (condensation, projections) a pour effet de perturber l'impédance électrique du béton sans que la couche d'étanchéité soit défectueuse. De plus, les mesures sont également impactées par l'épaisseur d'enrobage des armatures. La variabilité de cette dernière rend difficile l'interprétation des données obtenues. Dans ce cas, seul le suivi dans le temps des courbes d'intensité obtenues permet de révéler une anomalie.

3.4 Autres applications

3.4.1 Contrôle des étanchéités de type géomembranes

Les géomembranes ont de nombreuses applications dont celle d'assurer l'étanchéité de systèmes tels que par exemple les bassins de rétention ou des installations de stockage de déchets. Pour cette dernière application, différentes méthodes de contrôles ont été mises au point pour la détection et la localisation de défauts de type « fuite » (11).

Certaines de ces méthodes, de par leur principe, sont susceptibles (moyennant des adaptations) d'être utilisées pour la surveillance de l'efficacité des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art.

La méthode « Système fixe de détection, de localisation et d'alarme », basée principalement sur le principe de l'étude de la conductivité électrique du matériau mis en œuvre, semble être intéressante pour une application aux chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art (figure 120). Des capteurs, positionnés selon une grille modélisée au préalable, sont placés dans le sol sous la géomembrane, à faible profondeur. Chaque capteur est relié par un câble électrique indépendant à un boîtier de contrôle situé à proximité de l'ouvrage. Après la pose de la géomembrane, de la couche de protection et de la couche de drainage, une source électrique est installée. Pour ce faire, une électrode est placée au-dessus de la géomembrane et une autre est mise à la masse dans le sol support de l'ouvrage. Un courant peut alors être appliqué. La densité de courant sous la géomembrane est ainsi mesurée par les différents capteurs et toute anomalie électrique est symptomatique d'une fuite dans la géomembrane. L'ensemble des mesures peut être envoyé par liaison téléphonique (fax-modem, e-mail) à un centre d'interprétation pour être analysé. Les défauts sont ainsi détectés et localisés.

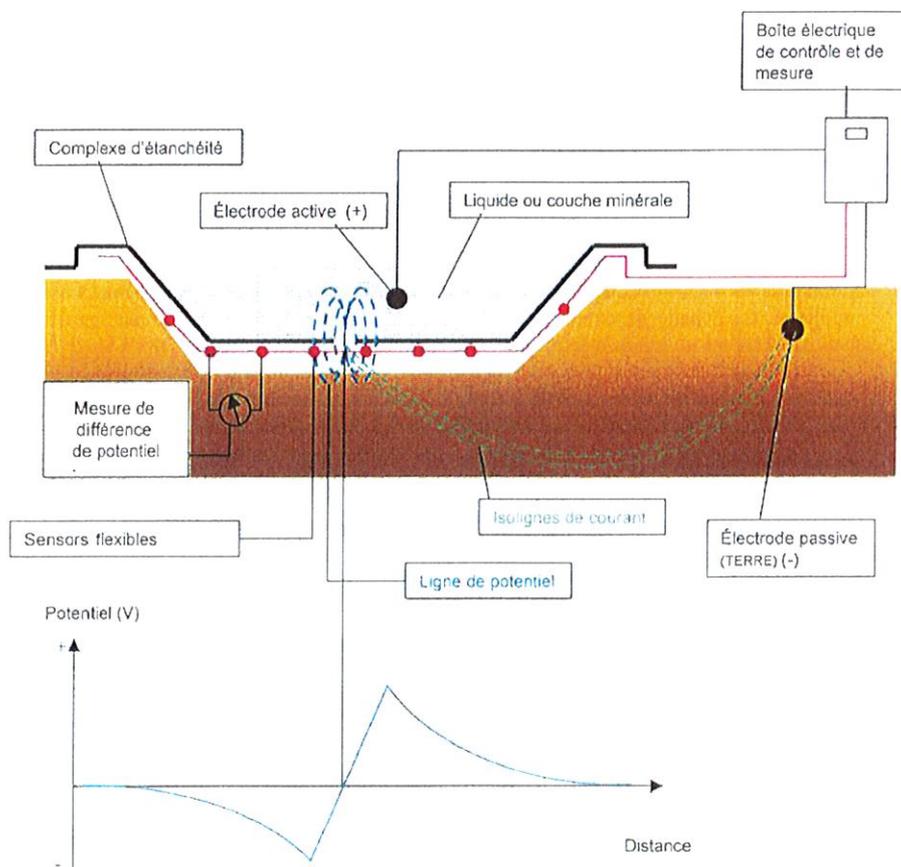


Figure 120. Schéma de principe de la méthode de « système fixe de détection, de localisation et d'alarme » (source : (11))

Moyennant une instrumentation préalable à la mise en œuvre de la chape (avec toutes les précautions que cela peut imposer) et la pose d'électrodes sur l'étanchéité, cette technique de surveillance pourrait être expérimentée sur les chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art.

3.4.2 Capteurs intégrés

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses avancées ont été effectuées sur la problématique de suivi du comportement du béton et de son instrumentation. Le développement de capteurs physico-chimiques intégrés aux nouvelles structures ou à celles existantes constitue une opportunité pour évaluer tout au long de la vie d'un ouvrage les conditions physico-chimiques dans lesquelles se trouve le béton et les aciers. Cette technologie est en cours de démocratisation et de nombreux capteurs sont désormais disponibles sur le marché. De par leur principe de fonctionnement et les résultats fournis, ces capteurs peuvent avoir des applications dans le cadre du suivi de l'efficacité des chapes d'étanchéité sur ouvrages d'art.

Ces capteurs sont mis en place à la construction de l'ouvrage (figure 121). Le plus souvent, ils sont fixés au premier lit d'armatures. Composés de plusieurs électrodes, ils donnent des informations sur les propriétés du béton d'enrobage (et ce, à différentes profondeurs) : température, résistivité, vitesse de corrosion par exemple. Positionnés dans le béton support de la chape d'étanchéité selon un maillage adapté, ils sont donc appropriés pour la détection d'infiltration d'eau sous la chape.

Moyennant un système d'acquisition de données, ils permettent le suivi en continu et à distance de l'efficacité de la chape d'étanchéité.

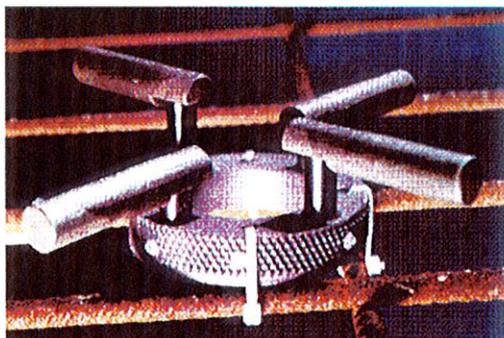


Figure 121. Exemple de capteur électrochimique à 4 électrodes (source : « Corrowatch », Force Technology, Danemark)

3.5 Conclusion

Les technologies disponibles sur le marché permettent d'envisager la mise en place à la construction de systèmes d'instrumentation permettant de suivre, en continu et à distance, l'efficacité des chapes d'étanchéité. Ces systèmes constituent, à l'heure actuelle, les seules méthodes non destructives permettant la détection et la localisation directes des défaillances des chapes d'étanchéité avant que ces dernières se manifestent extérieurement (infiltrations d'eau).

Sous réserve d'avoir été prévue lors de la conception de l'ouvrage, leur mise en œuvre en amont conduit à un surcoût faible au regard du coût global de l'étanchéité alors que les bénéfices sont considérables pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires dans le cadre de la gestion préventive et de la politique de maintenance de leurs ouvrages.

4. Bibliographie

- [1] NF EN 14695 : Feuilles souples d'étanchéité - Feuilles bitumineuses armées pour l'étanchéité de ponts et autres surfaces en béton circulables par les véhicules - Définitions et caractéristiques, AFNOR, avril 2010.
- [2] ETAG 033 « Guide pour les agréments techniques européens des systèmes d'étanchéité liquide pour tabliers de ponts », EOTA, à venir.
- [3] NF EN 12970 : 2000 « Asphalte coulé pour étanchéité - Définitions, spécifications et méthodes d'essai », AFNOR, décembre 2000.
- [4] Fauchard C., « Radar très hautes fréquences appliqué aux chaussées », Faculté des Sciences et Techniques de Nantes, mars 2001.
- [5] « Auscultation dynamique des structures de chaussée », Méthode d'essai n° 70, LCPC, mars 2009.
- [6] Sansalone M.J., Streett W.B., Impact echo : non-destructive evaluation of concrete and masonry, Bullbrier Press, 1997.
- [7] J.-M. Simonin et O. Abraham, "Impact Echo Method applied on bituminous materials", ISAP (International Conference On Asphalt Pavement), Québec, 2006.
- [8] Le Bastard C., « Apport de techniques de traitement du signal super et haute résolution à l'amélioration des performances du radar-chaussée », université de Nantes, novembre 2007.
- [9] J.-C. Bourcy, Ph. Demars, « Chapes d'étanchéité – Contrôle non destructif et dans le temps de leur efficacité », Roofing and waterproofing worldwide VI international conference, London, 30 avril-2 mai 1986.
- [10] Pont 84 à Longlier (autoroute E411), Campagne de mesures d'étanchéité de la chape du pont, rapport d'inspection, Ministère wallon de l'Équipement et des Transports, Direction générale des services techniques, juillet 1996.
- [11] Présentation des méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes, Comité français des géosynthétiques, juin 2003.

ANNEXES

Annexe 1 : Site expérimental du réseau

1. La problématique

Les méthodes d'investigations disponibles à la fin des années 1990 s'appuyaient essentiellement sur la réalisation d'essais destructifs ponctuels et délicats à mettre en œuvre (ouvertures de fenêtres, essais d'adhérence) conduisant à des résultats partiels souvent peu représentatifs de la qualité de réalisation d'une étanchéité.

Les inconvénients de ces méthodes ont conduit au développement d'une action de recherche s'appuyant sur les techniques de contrôles non destructifs (CND) et plus performantes (radar, caméra thermique infrarouge, méthodes soniques, etc.), l'objectif étant de définir et de préciser les potentialités de ces techniques.

Dans ce but, un site expérimental constitué de quatre dalles béton recouvertes de complexes d'étanchéité présentant divers défauts de mise en œuvre a été réalisé par le Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Autun à Margenne (à proximité d'Autun, en Saône-et-Loire).

Deux séries de dalles en béton ont été conçues selon le schéma ci-dessous : une première série destinée à l'étude des contrôles de réception non destructifs, la seconde affectée à la recherche d'humidité dans le béton situé sous la chape d'étanchéité, signe d'une défaillance de celle-ci.

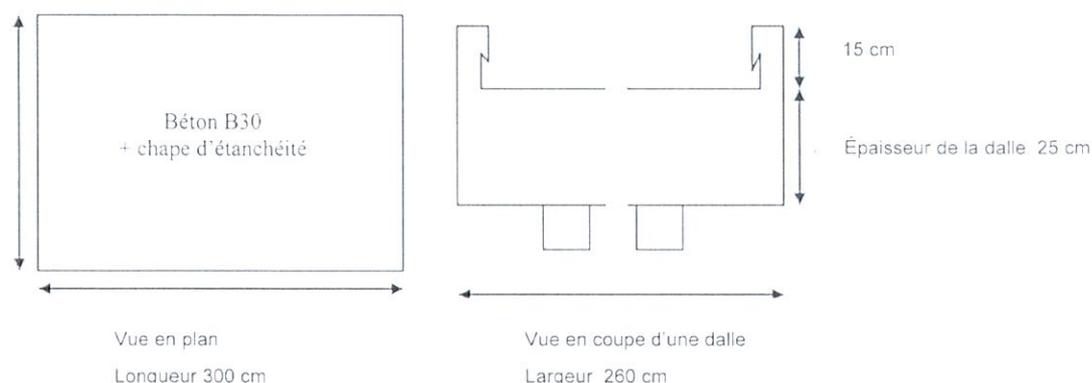


Figure 122. Schéma de principe des dalles tests du site de Margenne

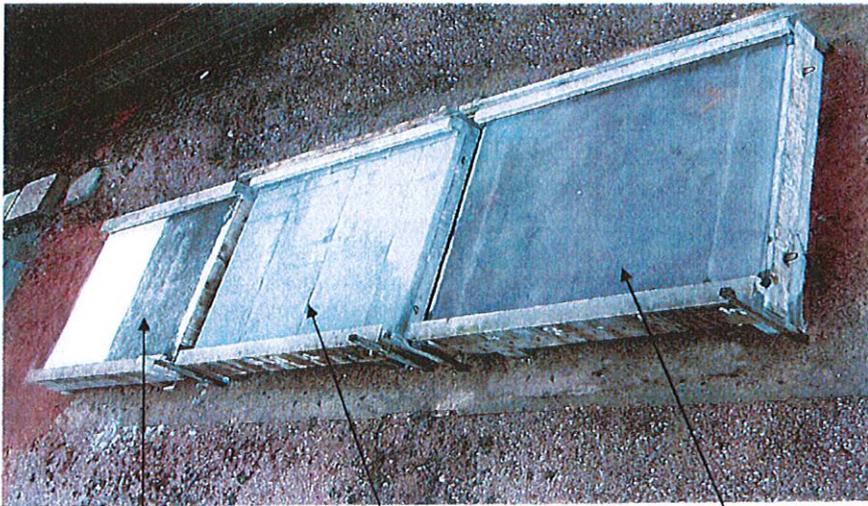
En 2009, une nouvelle dalle (500 x 200 cm) est venue compléter le site test. Celle-ci a été réalisée dans un but pédagogique dans le cadre de la formation qualifiante concernant le contrôle des chapes d'étanchéité en feuilles préfabriquées par thermographie infrarouge dispensée au Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Autun.

2. Dalles tests destinées au contrôle de réception des chapes d'étanchéité

Trois dalles béton ont été réalisées en 1998 puis recouvertes chacune en 1999, d'un complexe d'étanchéité différent, à savoir :

- un bicouche asphalte 8/22 (dalle n° 1) ;
- une feuille préfabriquée monocouche (dalle n° 2) ;
- un film mince adhérent au support FMAS/ SEL (dalle n° 3).

Le but de cette première série de dalles était de tester la mise en évidence de défauts à la réception du complexe d'étanchéité.



Dalle n° 3

Dalle n° 2

Dalle n° 1

Film mince adhérent

Feuille préfabriquée monocouche

Bicouche asphalte

Figure 123. Première série de dalles tests destinée au contrôle de réception des chapes d'étanchéité

Divers types de défauts ont été réalisés sur les complexes d'étanchéité mis en œuvre à savoir :

- Sur la chape de type asphalte / asphalte gravillonné :
 - variations d'épaisseur des couches respectives ;
 - humidification localisée du béton de la dalle avant application du vernis d'imprégnation ;
 - humidification réalisée sur le vernis d'imprégnation.
- Sur la chape de type feuille préfabriquée monocouche :
 - dégradations localisées de la feuille préfabriquée par poinçonnement ;
 - défauts d'exécution des recouvrements (présence d'air) ;
 - défauts d'adhérence ;
 - surchauffe de la feuille à la mise en œuvre.
- Sur la chape d'étanchéité de type FMAS / SEL :
 - défauts d'adhérence par application d'alcool polyvinylique sur le support béton ;
 - défauts de polymérisation réalisés par le non-respect des constituants du mélange ;
 - présence de zones poreuses sous l'étanchéité ;
 - dosages variables des produits mis en œuvre.

3. Dalles tests destinées à la recherche de la présence d'eau sous une chape d'étanchéité « en service »

Une quatrième dalle en béton, de composition similaire aux dalles réalisées en 1998, a été confectionnée en 2002. Elle présente la particularité de comporter des réservations de dimensions précises, d'une profondeur de 2 à 4 cm, dans lesquelles a été coulé un béton poreux (de 10 à 15 % de porosité). Un dispositif permet d'y injecter de l'eau afin de simuler la présence d'humidité sous une chape d'étanchéité (figure 124).

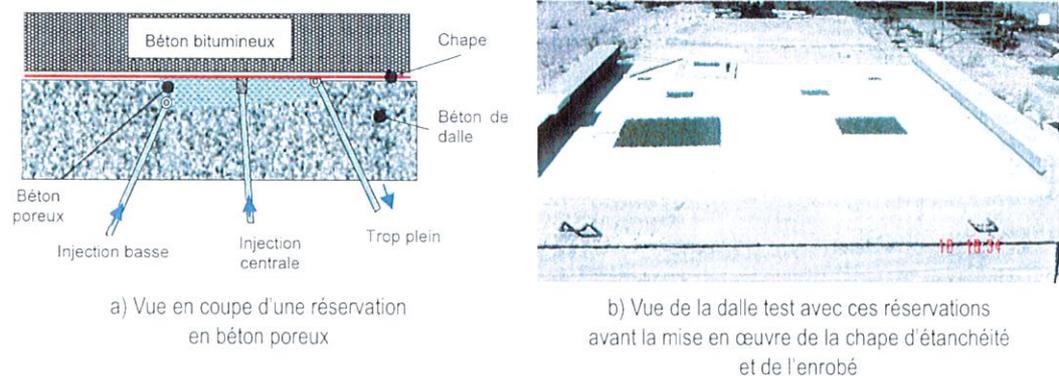


Figure 124. Dalle test simulant un ouvrage en service présentant une chape d'étanchéité défailante (infiltration d'eau)

Trois réservations complémentaires ont également été réalisées. Elles sont positionnées en partie superficielle du béton de la dalle au niveau de l'étanchéité et représentent des cavités de 20x20 cm d'une profondeur comprise entre 5 et 10 mm. L'objectif est de simuler la présence d'un film d'eau sous la chape d'étanchéité. Pour éviter le collage de la feuille préfabriquée monocouche dans les vides créés, un géotextile drainant a été positionné à l'intérieur des réservations (figure 125).

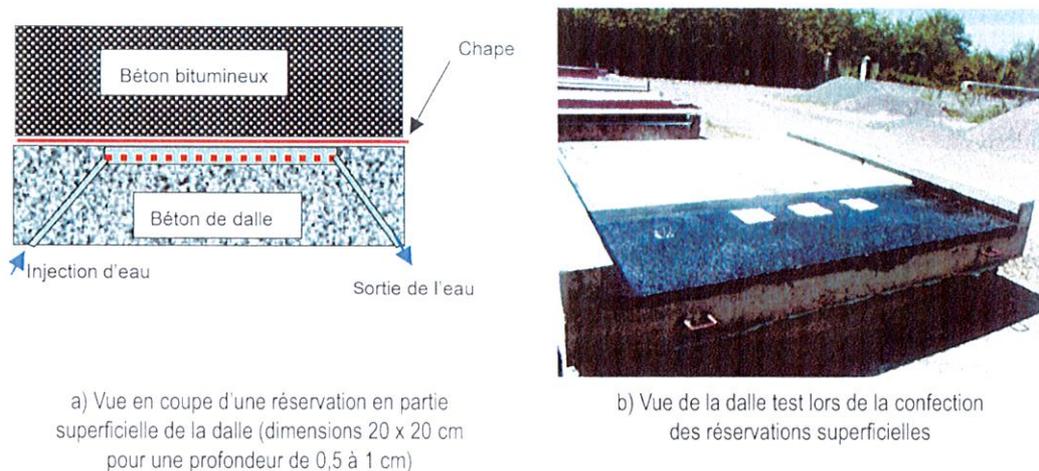


Figure 125. Dalle test - Simulation d'un film d'eau sous la chape d'étanchéité

Cette dalle a ensuite été recouverte d'une feuille préfabriquée monocouche recouverte de 7 cm de béton bitumineux (figure 126).



Figure 126. Vue de la dalle test recouverte de la couche de béton bitumineux

On distingue sur la droite, le dispositif d'injection d'eau dans les réservations en béton poreux (système gravitaire). Le récipient d'eau est positionné sur une balance pour un meilleur suivi de l'injection.

4. Dalle test dédiée à la formation des agents de contrôles

En 2009 et dans le cadre d'une formation aux contrôles de chapes en feuilles préfabriquées par thermographie infrarouge, une dalle test supplémentaire a été confectionnée sur le site test de Margenne.

La réalisation des premières séries de dalles étant ancienne, le vieillissement des produits mis en œuvre a conduit à l'apparition de nouveaux désordres mal maîtrisés. De plus, l'expérience acquise entre temps en matière de contrôle infrarouge des chapes d'étanchéité en feuilles préfabriquées a permis d'identifier des désordres consécutifs à une mise en œuvre défectueuse qui n'avaient pas été prévus initialement : défauts d'adhérence de produits de réparation, présence de ragréages de différente nature, rugosité excessive du support etc. La réalisation d'une nouvelle dalle test a donc été l'occasion de compléter le panel de défauts décelables par la thermographie infrarouge (figure 127).

À ce jour, cette dalle a permis la formation d'environ 30 agents au contrôle de chapes en feuilles préfabriquées par thermographie infrarouge.



a) Vue de la dalle n° 5 lors de sa confection

b) Cliché infrarouge partiel de la dalle test et des défauts réalisés

Figure 127. Dalle test dédiée à la formation des agents de contrôle à la thermographie infrarouge

Annexe 2 : Mesures *in situ* auscultation radar

- Pour la détermination de l'épaisseur des différentes couches de chaussée
- Pour la détection et la localisation d'humidité sous la chape d'étanchéité
- Pour la détection et la localisation d'hétérogénéités ou d'anomalies dans le support de la chape

1. Objet de la mesure et domaines d'application

1.1 Contexte

L'utilisation du radar pour l'auscultation non destructive des ouvrages de génie civil en béton s'intensifie, notamment depuis l'apparition sur le marché d'antennes hautes fréquences possédant de bonnes capacités de résolution et le perfectionnement des outils de traitement et d'interprétation. De par ses principes, cette technique s'inscrit pleinement dans la liste des moyens mobilisables pour le diagnostic des chapes d'étanchéité. De nombreux paramètres physiques des matériaux auscultés peuvent modifier les signaux radar, notamment la présence d'interfaces entre les couches de matériaux aux propriétés différentes, la présence d'hétérogénéités ou surtout la présence d'eau qui influe considérablement sur les propriétés électromagnétiques (EM) des matériaux de chaussée.

1.2 Domaine d'application

Cette technique à grand rendement permet de dresser une cartographie du tablier en identifiant des zones d'anomalie d'étendue plus ou moins importante sur ou sous la chape d'étanchéité (sous-épaisseurs, présence d'humidité par exemple).

L'auscultation radar est généralement effectuée sur l'ensemble du tablier mais peut intéresser des zones plus limitées. Elle nécessite dans la plupart des cas quelques essais destructifs pour l'étalonnage des mesures.

Elle offre ainsi plusieurs applications possibles dans le déroulement d'un diagnostic de chape d'étanchéité sur ouvrages en service :

La détermination de l'épaisseur des différentes couches de la chaussée : l'épaisseur de la couche de roulement, du complexe d'étanchéité (procédés asphalté ou MHC par exemple) et de l'éventuel renformis/reprofilage sont des informations capitales pour la formulation du diagnostic. Les sur ou sous-épaisseurs peuvent notamment être à l'origine d'un dysfonctionnement de la chape.

La recherche d'humidité sous la chape : cette humidité est susceptible de concerner le support béton ou un éventuel renformis ou reprofilage. La présence d'eau sous la chape est le signe manifeste d'une défaillance de cette dernière.

La détection et la localisation d'hétérogénéités ou d'anomalies spécifiques : ces anomalies peuvent se situer à l'interface ou dans le support de la chape d'étanchéité. Il peut s'agir par exemple de décollements, de délaminations ou d'autres altérations du béton support.

Dans les cas où des fenêtres de reconnaissance sont indispensables, la technique radar permet également de les planter de façon judicieuse au regard de la problématique.

2. Principe

2.1 Principes généraux

Le radar est un moyen d'auscultation non destructif, utilisant la réflexion d'ondes électromagnétiques sur les interfaces des couches de la chaussée pour obtenir une image continue de la structure auscultée (figure 128).

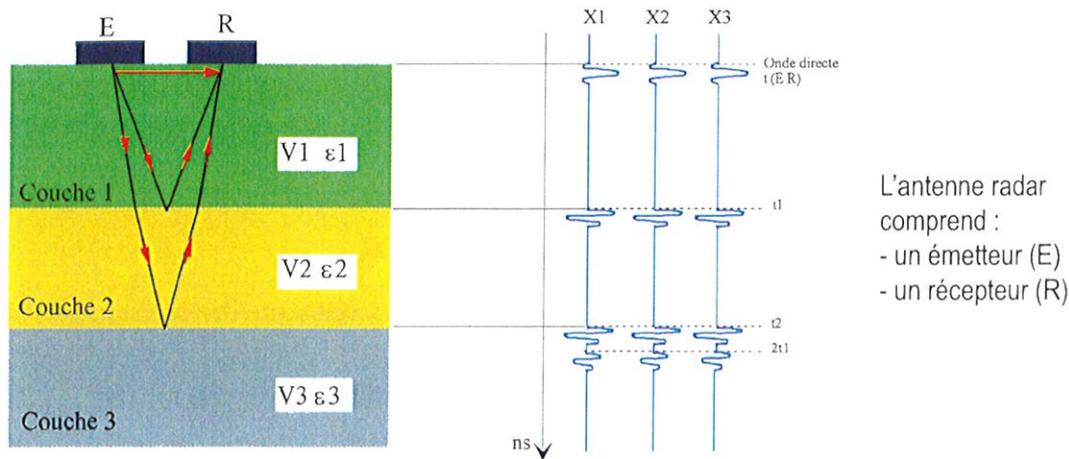


Figure 128. Principe d'auscultation par méthode radar

L'onde électromagnétique se propage dans la structure en s'atténuant et se trouve réfléchi partiellement sur les interfaces entre les différentes couches de chaussée présentant des contrastes de caractéristiques électromagnétiques (constante diélectrique). Il en est de même pour des hétérogénéités ponctuelles telles que les armatures du béton armé ou les gaines de précontrainte.

À chaque position du radar correspond un signal temporel, enregistré par l'antenne réceptrice, qui est constitué d'une succession d'échos d'amplitudes variables en fonction du temps.

2.2 Représentation des signaux radar

La juxtaposition de signaux obtenus lors du déplacement du radar permet de réaliser une représentation (distance, amplitude, temps de propagation) donnant des informations sur les interfaces entre des couches de matériaux de nature différente ou sur des hétérogénéités éventuelles.

La représentation généralement utilisée consiste à traduire, pour chaque trace, les niveaux d'amplitude par des niveaux de gris (ou des couleurs différentes). On obtient ainsi une « coupe-temps » ou « profil radar », qui schématiquement représente l'image des interfaces et hétérogénéités présentes dans la tranche de structure auscultée (figure 129).

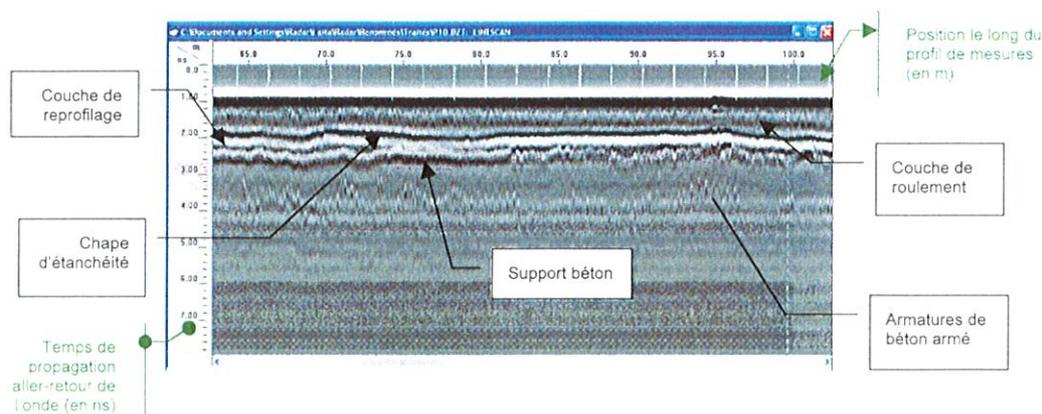


Figure 129. Extrait d'une coupe-temps

Du fait de l'ouverture du faisceau d'émission des antennes (90° environ), la signature sur la « coupe-temps » d'hétérogénéités très localisées (armatures par exemple) est représentée par une hyperbole. En effet, une partie de l'énergie émise latéralement par l'antenne est réfléchiée et détectée avant et après le passage à la verticale de l'objet.

2.3 Propagation des ondes dans les matériaux

La vitesse de propagation des ondes radar est reliée à la constante diélectrique (ϵ) du matériau ausculté :

$$V = c / \text{racine}(\epsilon'r) \text{ avec } c : \text{vitesse des ondes dans le vide } (\sim 30 \text{ cm/ns})$$

Le tableau 13 suivant donne à titre indicatif les valeurs typiques de la constante diélectrique et de la vitesse des ondes observées sur des matériaux courants :

Matériau	$\epsilon'r$	V (cm/ns)
Air	1	30
Eau*	80	3,3
Béton sec	4-6	15,0 – 12,3
Béton humide	12-16	8,7 – 7,5
Asphalte / Enrobé	4-6	15,0 – 12,3

* dépend du taux de minéralisation de l'eau

Tableau 13. Constante diélectrique et vitesse des ondes dans différents matériaux courants de génie civil

Les variations de constantes diélectriques présentées dans le tableau 13 s'expliquent notamment par la nature EM des granulats mais surtout par la porosité du matériau selon qu'il soit sec ou saturé.

L'échelle verticale de la coupe-temps est graduée en temps de trajet aller et retour, exprimé en nanosecondes (ns). Pour une estimation approchée de la profondeur des interfaces ou des anomalies, la relation reliant TT (temps de trajet A et R par mètre) à la constante diélectrique du matériau ($\epsilon'r$) pourra être utilisée.

$$(\text{Épaisseur ou Profondeur}) = V.TT/2 \text{ (en cm)}$$

Des mesures précises d'épaisseur de couche sur des sondages ou des carottes permettent également d'établir la relation entre le temps de propagation et la profondeur d'un objet détecté ou d'une couche de matériaux et d'obtenir ainsi une vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans chaque matériau.

2.4 Réflexion des ondes électromagnétiques

La réflectivité électromagnétique d'un béton est étroitement liée à son degré de saturation en eau et, dans une moindre mesure, à son degré de contamination par les chlorures. Une forte teneur en eau génère une augmentation de la constante diélectrique du béton et, de ce fait, une augmentation du coefficient de réflexion de l'interface entre la chape d'étanchéité et le support sous-jacent. Lors de l'auscultation

par RADAR d'un tablier de pont, l'amplitude du signal réfléchi au niveau de cette interface peut, par conséquent, être indirectement associée au degré d'humidité du support de la chape. Une forte amplitude de ce signal (forte réflexion) traduira une humidité relativement plus importante alors qu'une faible amplitude (faible réflexion) témoignera d'un matériau plus sec.

Remarque : sur des matériaux métalliques, la réflexion du signal est totale et aucun rayonnement n'est transmis. On ne pourra donc pas obtenir d'information sur les structures qui sont sous une feuille métallique, même si son épaisseur est de quelques dixièmes de millimètre (étanchéité de type B3A par exemple).

Les profondeurs auscultées par le radar varient de quelques centimètres à quelques mètres et dépendent de plusieurs facteurs :

- la conductivité du matériau qui est la principale cause de l'absorption de l'onde radar par celui-ci. Contrairement à certains sols (argileux par exemple) qui peuvent absorber de manière importante les ondes électromagnétiques, les matériaux constitutifs de la chaussée (bétons bitumineux et hydrauliques) permettent une bonne pénétration des ondes et donc une profondeur d'investigation suffisante. L'étude de l'amplitude du signal RADAR à l'interface entre l'étanchéité et le support sous-jacent pourra néanmoins nécessiter des corrections pour tenir compte de l'atténuation du signal dans la couche de roulement ;

- la fréquence de l'onde radar utilisée. Plus la fréquence émise est basse, plus la profondeur d'investigation est importante. La résolution, qui intervient sur la précision de la coupe-temps, varie également en fonction de celle-ci, cette précision étant d'autant meilleure que la fréquence est haute. Dans le cadre de l'auscultation des chapes d'étanchéité, la profondeur totale d'auscultation varie entre 4 et 20 cm environ et les plus petites épaisseurs de couches à ausculter sont de l'ordre de quelques centimètres. Des antennes de gammes de fréquence relativement haute, entre 1,5 et 3 GHz, seront donc privilégiées.

Il est à noter que, dans certains cas d'antennes classiques, la résolution radar peut rester insuffisante pour discriminer la présence d'eau au-dessus ou en dessous de la chape d'étanchéité. Une partie de cette information est néanmoins présente dans la mesure de l'écho de surface, sensible à l'état de l'enrobé et donc à son humidité. Enfin, les nouvelles technologies d'antennes (antennes hautes et très hautes fréquences), les nouvelles techniques de mesures (radar à saut de fréquence par exemple) et les traitements du signal (filtrage par exemple) permettent dorénavant d'obtenir de très bonnes résolutions.

3. Limites et précautions

Le déploiement de la technique radar est réservé aux équipes spécialisées en la matière et capables d'exploiter et d'interpréter les mesures dans le cadre d'une problématique liée aux chapes d'étanchéité.

La technique est donc valable mais sous réserve d'avoir pris en compte les éléments suivants :

- les mesures sont comparatives et leur interprétation peut être délicate ;
- le matériel utilisé doit être adapté à la recherche ;
- les éléments métalliques présents dans l'épaisseur auscultée peuvent notablement perturber les signaux, voire les réfléchir intégralement ;

- la présence d'eau sur et dans la couche de roulement modifie la vitesse des ondes radar.

4. Matériel

Le radar utilisé est de type impulsif. À chaque point de mesure, ce dernier émet une impulsion électromagnétique d'une durée voisine d'une nanoseconde transmise à la structure auscultée par l'intermédiaire d'une antenne.



a) Unité d'enregistrement



b) Antenne de 2GHz en configuration portée



c) Antennes en configurations tractée et portée



d) Antenne posée (ou de contact) sur chariot

Figure 130. Matériel radar et configurations d'antennes

Un appareil radar est constitué de 4 composants principaux : une antenne émettrice et une antenne réceptrice placées couramment dans un même boîtier (figure 130b), une unité de contrôle, qui génère les impulsions et traite les signaux reçus, et une unité d'enregistrement situés dans le corps du système radar (figure 130a).

L'utilisation d'antennes portées ou tractées (figures 130b et 130c) correspond à une auscultation à grand rendement sur des linéaires plutôt longs sachant qu'il est possible d'utiliser en parallèle plusieurs antennes identiques (par exemple une antenne par bande de roulement complétée d'une antenne centrale).

L'utilisation d'une antenne posée ou de contact (figure 130d) à l'aide d'un chariot constitue une alternative et permet d'être libre sur l'espacement entre profils de mesures et offre la possibilité de réaliser des profils transversaux.

5. Méthodologie

5.1 Préparation

Conformément à la démarche de diagnostic des chapes d'étanchéité, le déploiement de la technique d'auscultation radar sur un tablier est l'aboutissement d'une analyse préalable comprenant notamment l'analyse fine du dossier d'ouvrage et l'évaluation visuelle de la couche de roulement et de l'intrados du tablier. L'utilisation de cette technique est pertinente lorsque l'analyse précédente :

- montre la faisabilité technique du déploiement de la méthode radar ;
- montre la nécessité de déterminer l'épaisseur des différentes couches de la chaussée ;
- conduit à suspecter une présence d'eau sous la chape d'étanchéité ;
- conduit à suspecter des anomalies dans le support de la chape.

Pour préparer l'intervention terrain, l'équipe disposera au minimum des éléments suivants : coupe type de l'ouvrage, longueur et largeur du tablier, coupe type de la structure de chaussée (couche de roulement, type d'étanchéité, présence éventuelle d'un renformis ou d'un reprofilage). Cette phase de préparation permettra en outre d'affiner le mode opératoire décrit ci-après.

5.2 Conditions de déploiement de la technique

La technique d'auscultation radar est applicable sur tout type d'ouvrage en béton (armé ou précontraint). Pour les ouvrages en maçonnerie et en métal pour lesquels les retours d'expérience sont trop peu nombreux, la méthodologie proposée par le guide devra être validée et au minimum adaptée.

Le déploiement est possible quelle que soit la structure de la chaussée : présence de renformis, de reprofilage en béton hydraulique ou bitumineux. Attention : des variations trop importantes des épaisseurs ou de la nature (composition, compactage, etc.) de la couche de roulement peuvent compliquer l'interprétation des mesures. Toutes informations relatives à des rechargements ou des réparations localisées de la couche de roulement ayant été réalisés dans le passé doivent donc être communiquées à l'équipe d'intervention.

Toutefois, l'application de la technique radar – pour la détection d'anomalies (humidité, hétérogénéités, altérations) sous la chape d'étanchéité – ne peut être envisagée dans le cas des systèmes de chape comprenant des éléments métalliques (chape d'étanchéité de type B3A par exemple) ; ces derniers venant parasiter le signal, voire le réfléchir intégralement.

La présence d'eau sur la couche de roulement limite l'application de la technique. On évitera donc d'intervenir par temps pluvieux. Dans le cas où l'intervention est précédée d'un épisode pluvieux, un délai minimal de 24 heures avant la réalisation des mesures radar semble raisonnable : délai nécessaire pour le drainage et le séchage d'une quantité raisonnable d'eau présente dans la couche de roulement. En effet, la présence d'eau dans l'enrobé, qui peut être variable dans l'épaisseur comme dans le plan, modifie la vitesse des ondes radar et donc l'estimation des profondeurs faussant ainsi l'interprétation des mesures.

L'intervention impose des restrictions de circulation : l'auscultation se faisant en général par voie de circulation, elle nécessite la coupure successive de chaque voie du tablier.

Il s'agit d'une technique à grand rendement. Les mesures sont réalisées en continu avec un pas de mesure centimétrique (classiquement de 100 à 200 mesures par mètre). Une heure d'auscultation permet d'envisager entre 100 et 500 mètres de linéaire de mesures.

5.3 Mode opératoire

5.3.1 Implantation des mesures

D'une manière générale, le pas et l'implantation des mesures (nombre et espacement) sont conditionnés par la taille supposée des anomalies à rechercher.

Dans le cas particulier des chapes d'étanchéité, l'auscultation est réalisée suivant des profils linéaires longitudinaux, régulièrement répartis transversalement, de préférence sur la totalité de la longueur du tablier (figure 131). Dans un premier temps, un espacement entre profils longitudinaux de 0,5 à 1,0 mètre doit être envisagé. Dans un second temps et selon les spécificités de la problématique, on pourra envisager de cibler l'auscultation sur une zone plus restreinte du tablier en adoptant un pas plus fin entre les profils longitudinaux et en les complétant éventuellement de profils de mesures transversaux.

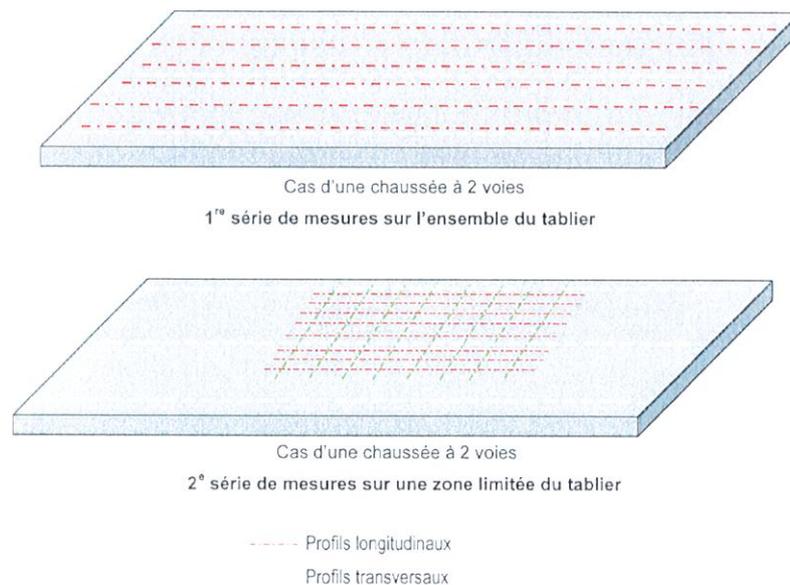


Figure 131. Implantation des profils de mesures

5.3.2 Réalisation des mesures

Plusieurs dispositifs de mesures peuvent être envisagés :

Dans le cas du **radar à antenne portée** (figure 132), l'antenne n'est pas en contact avec la chaussée et peut être embarquée par un véhicule. Le rendement de l'auscultation est relativement grand puisque l'acquisition est faite à environ 10/20 km/h. Cette technique est donc particulièrement bien adaptée aux ouvrages de grandes dimensions. Néanmoins, au regard du lobe de rayonnement de l'antenne et de sa distance à la chaussée, la précision de la mesure est relativement faible : la mesure intègre une surface plus importante qui peut lisser l'information et masquer les

anomalies ponctuelles. De plus, cette configuration de mesures n'est pas adaptée à des espacements faibles entre profils (inférieurs à 1 m). Enfin, cette configuration ne permet pas la réalisation de profils transversaux. Ce type d'intervention doit donc être réservé en première phase d'auscultation (« dégrossissage ») ou lorsque les surfaces de tablier à ausculter sont très importantes.



Figure 132. Antenne portée (1,5 GHz)

Le radar à antenne posée (ou de contact) (figure 133) permet quant à lui de réaliser des profils longitudinaux et transversaux relativement fins (pas compris entre 0,2 et 1,0 m). À noter que les profils transversaux nécessitent un marquage préalable sur la chaussée. Il est d'un rendement moins élevé que la technique à antenne portée mais présente une meilleure précision : la configuration permet l'utilisation d'antennes de plus hautes fréquences (supérieures à 2 GHz).

Quel que soit le dispositif (porté ou de contact), ce dernier doit disposer d'un système de repérage : roue codée et pige de positionnement transversale.



a) Antenne sur chariot/poussette avec roue codée et tige de positionnement latérale

b) Antenne sur chariot/poussette - Vue du pupitre de commande

c) Antenne avec manche de guidage

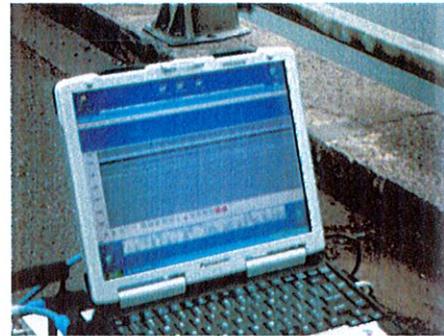
Figure 133. Radar à antenne posée (ou de contact)

Le système d'acquisition et de monitoring (figure 133) permet de visualiser en temps réel les profils radar et de faire une première analyse (sommaire) de l'auscultation sachant que l'analyse et de l'interprétation sont réalisées *a posteriori*.

De plus, cette phase est importante pour positionner de manière optimale les sondages d'étalonnage en les marquant (à la peinture par exemple) sur les profils de mesures considérés.



a) Antenne portée (véhicule)



b) Antenne posée (chariot)

Figure 134. Dispositif de monitoring

5.3.3 Carotte d'étalonnage

Les carottes d'étalonnage doivent être limitées en nombre (1 ou 2) car elles perforent le plus souvent l'étanchéité et sont difficilement réparables (réparation dans les règles de l'art : voir chapitre 4 § 4.2.1.2). Un diamètre de 80 mm sera suffisant dans la plupart des cas. La mesure précise de l'épaisseur des différentes couches permettra ensuite l'étalonnage des signaux radar indispensable à leur exploitation (détermination de la vitesse de propagation des ondes dans les différentes couches / figure 135).

Ces sondages permettront de caractériser l'état des interfaces (décollement, porosité anormale par exemple). De plus, un carottage à sec pourra permettre de vérifier la présence ou l'arrivée d'eau.

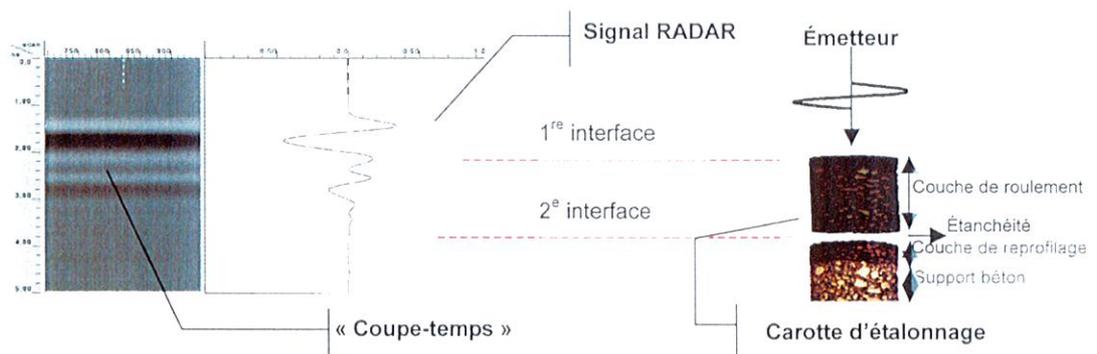


Figure 135. Principe d'étalonnage à partir de carottes

La chronologie est la suivante :

- implantation des carottes suite à la visualisation rapide des profils (§ 5.3.2) ;
- mesure radar complémentaire à l'emplacement où sera prélevée la carotte ;
- carottage (figure 136) ;

- mesure manuelle de l'épaisseur des différentes couches ;
- observation du sondage et enfin réparation (chapitre 4 § 4.2.1.2).

La connaissance du temps de propagation (obtenu à partir de la coupe-temps) et la détermination de l'épaisseur (obtenue à partir des carottes d'étalonnage) permettent de calculer la vitesse de propagation V de l'onde radar dans la couche de roulement (§ 2.3) et ainsi de déduire l'épaisseur de cette couche pour chaque position le long du profil radar.



Figure 136. Réalisation d'un carottage d'étalonnage

Autrement dit, la connaissance de V permet de transformer les « coupe-temps » en « coupe-profondeur » où l'échelle des ordonnées est alors exprimée en mètre (figure 137).

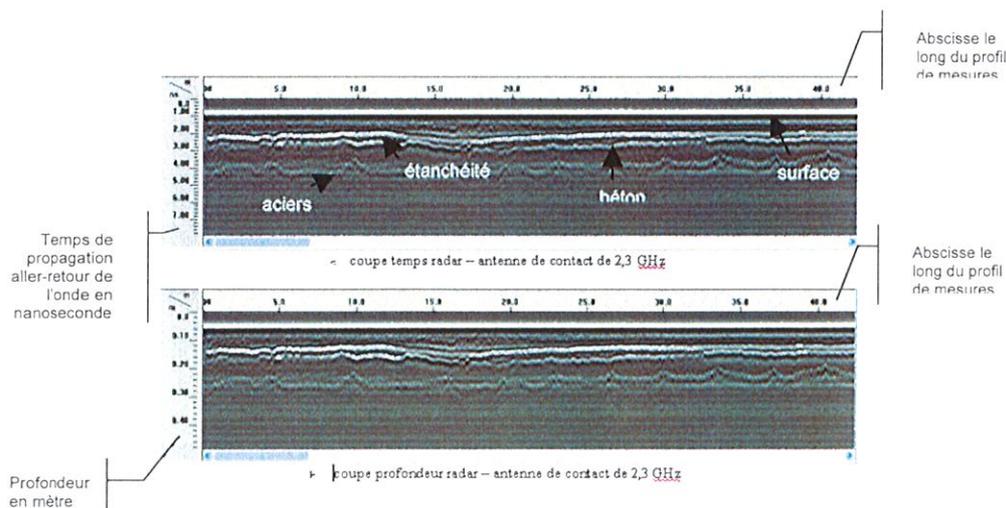


Figure 137. Exemple de coupe-temps (a) et de coupe-profondeur (b)

Alternative au carottage :

Pour les mesures en configuration « antenne portée », une alternative au carottage est de déterminer la constante diélectrique (ϵ_r) de la couche de roulement à partir

d'une mesure radar statique sur une plaque métallique posée sur la route. Le rapport d'amplitude entre l'écho de surface sur la couche de roulement et cette première mesure donne en continu la valeur recherchée ε'_r , par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$\varepsilon'_{r1} = \left[\frac{1 + A_1 / A_m}{1 - A_1 / A_m} \right]^2 \quad [\text{sans dimension}]$$

où A_1 et A_m représentent respectivement les amplitudes maximales des échos de surface et sur la plaque métallique. La relation $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r}}$ permet alors de calculer la vitesse de l'onde radar dans la couche

de roulement puis son épaisseur pour chaque position le long du profil radar.

Cette approche est d'autant plus intéressante qu'elle permet de prendre en compte les éventuelles variations de vitesse dans la couche de roulement dues à l'hétérogénéité de l'enrobé (vieillesse, dégradations variables, compacité) ou à une éventuelle variation d'humidité au sein de celle-ci (due à un épisode pluvieux par exemple). Il faut cependant prendre quelques précautions quant aux dimensions de la plaque métallique qui doivent rester supérieures à :

$$L > 2,5h \text{ [m]}$$

où h correspond à la distance entre le bas de l'antenne et la chaussée, afin d'éviter les effets de bords sur la mesure de l'amplitude A_m .



Figure 138. Étalonnage d'antennes portées (fréquence centrale de 2 GHz) sur une plaque métallique

6. Exploitation et présentation des résultats

6.1 Détermination de l'épaisseur des différentes couches de la chaussée

À l'issue de l'auscultation radar du tablier l'équipe d'intervention dispose d'autant de « coupe-profondeur » que de profils de mesures (§ 5.3.2). Chaque profil doit alors faire l'objet d'un traitement consistant à pointer les temps d'arrivée des ondes

réfléchies sur les interfaces étudiées. L'opérateur en charge du traitement doit s'assurer du bon choix de l'interface, de la pertinence et de la continuité du pointé (figure 139).

Exemples d'interface :

- surface de la couche de roulement
- chape d'étanchéité / support béton
- chape d'étanchéité / couche de reprofilage
- couche de reprofilage / support béton

Les logiciels fournis avec les matériels radar courants peuvent réaliser ce traitement de façon automatique et génèrent des fichiers de type ASCII. Ces fichiers contiennent la position (x, y) des points de mesures, la profondeur des interfaces et l'épaisseur des différentes couches sous réserve d'avoir pris en compte la vitesse des ondes radar estimée lors de l'étalonnage (voir § 5.3.3).

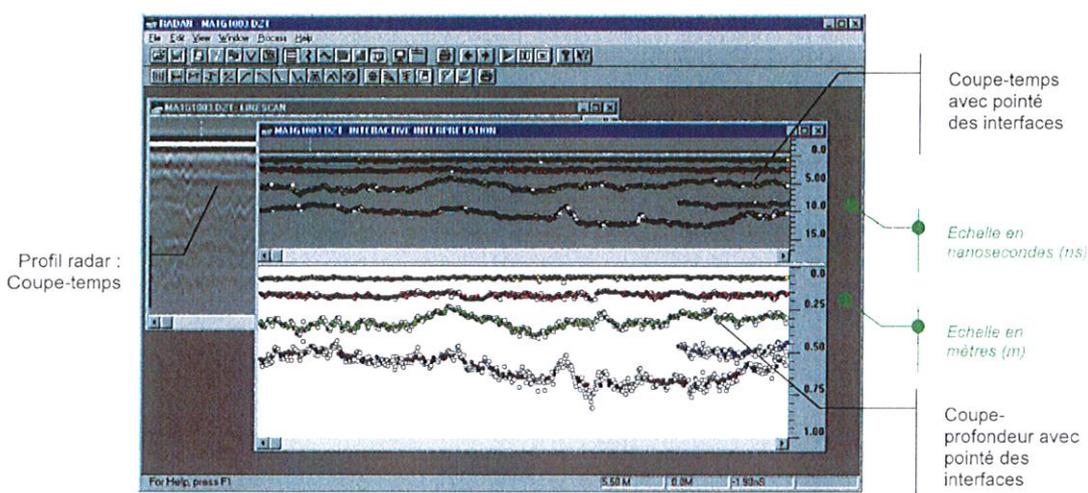


Figure 139. Exemple de pointé sur un profil radar réalisé sur structure de chaussée à l'aide d'un logiciel de traitement et de visualisation radar

Il est alors possible de représenter l'épaisseur de ces couches sous forme de cartographie couleur iso-valeur (figure 140). Ce type de représentation est utile pour l'analyse et la formulation du diagnostic (localisation de sur ou sous épaisseur par exemple). L'échelle des épaisseurs en fausses couleurs peut être simplifiée sous forme de classes correspondant par exemple aux exigences du marché ou recommandations techniques (aide à l'interprétation).

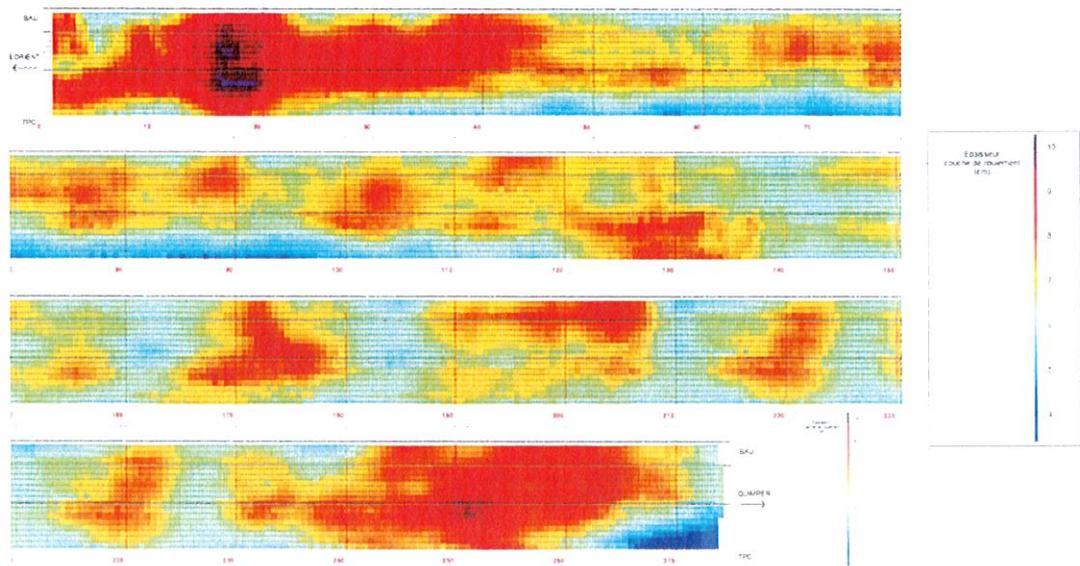
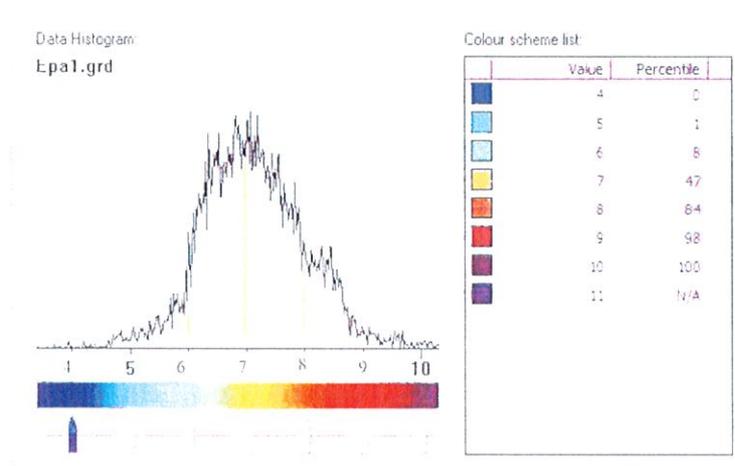


Figure 140. Exemple de cartographie des épaisseurs de la couche de roulement d'un tablier

En parallèle, à partir des fichiers de valeurs, il est également possible d'effectuer des analyses statistiques sous forme d'histogramme d'épaisseurs (figure 141) permettant de quantifier la dispersion, le sur ou sous-dimensionnement des épaisseurs :



Exemple d'un procédé d'étanchéité FPM - On constate qu'environ 50% des épaisseurs est inférieure à 7 cm, épaisseur minimale exigée dans le marché

Figure 141. Distribution des épaisseurs de la couche de roulement

6.2 Détection et localisation d'humidité sous la chape d'étanchéité

6.2.1 Traitement

Lors du traitement des données radar, au moment du pointé (voir § 6.1), on enregistre un paramètre complémentaire qui est l'amplitude du signal radar réfléchi sur l'interface entre la chape et son support. On rappelle que la présence d'eau sous la chape d'étanchéité modifie fortement cette amplitude comme le montre la figure 142, où la zone humide se manifeste par une amplitude plus élevée (contraste EM plus important).

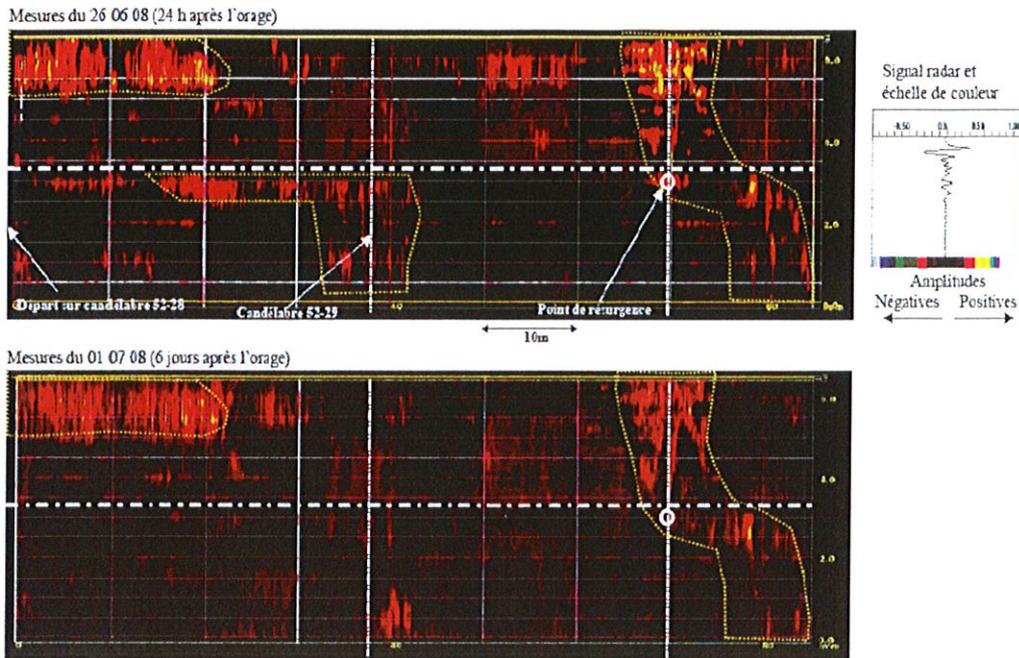


Figure 142. Cartographie de l'amplitude du signal radar immédiatement sous la chape d'étanchéité

Cet exemple montre deux cartographies d'amplitudes radar réalisées au même endroit sur un ouvrage, 24h et 6 jours après un événement pluvieux. Les couleurs les plus claires représentent les amplitudes positives du signal qui est fonction du coefficient de réflexion, et inversement pour les couleurs sombres. Dans ce cas, les amplitudes positives marquées sont dues à la présence d'eau. Six jours après l'orage, l'atténuation des amplitudes positives (visible sur la seconde cartographie) indique une diminution de l'eau sous le complexe d'étanchéité.

En cas de détection d'une anomalie au sein ou en surface de la couche de roulement (nids-de-poules par exemple), les échos radar sur les couches inférieures sont suffisamment perturbés pour qu'il soit recommandé de les enlever du traitement.

Dans le cas particulier d'un tablier reprofilé, le pointé et l'étude des amplitudes peuvent être réalisés sur le maximum central du double écho issu de la réflexion du signal sur les deux interfaces du reprofilage. En effet, en cas de défaillance de la chape d'étanchéité, l'eau est piégée dans l'épaisseur du reprofilage.

Il faut noter que l'amplitude du signal dépend aussi d'autres paramètres comme l'épaisseur de la couche de roulement qui entraîne une atténuation du signal radar. Une variation significative de l'épaisseur va donc entraîner une variation d'amplitude dans le même rapport à contraste EM identique ; variation qui peut être prise pour une forte variation d'humidité. Pour s'affranchir de ces variations d'épaisseur de la couche de roulement, l'amplitude brute du signal radar doit être corrigée (figure 144). Cette correction est effectuée à partir de la courbe de régression obtenue à partir du nuage de points (amplitudes, épaisseurs) issus de tous les profils de mesures (figure 143). Il est alors possible de corriger l'amplitude des effets de l'épaisseur par l'équation suivante : $\text{amplitude_corrigée} = \text{amplitude_brute} - f(\text{épaisseur})$ (figure 145).

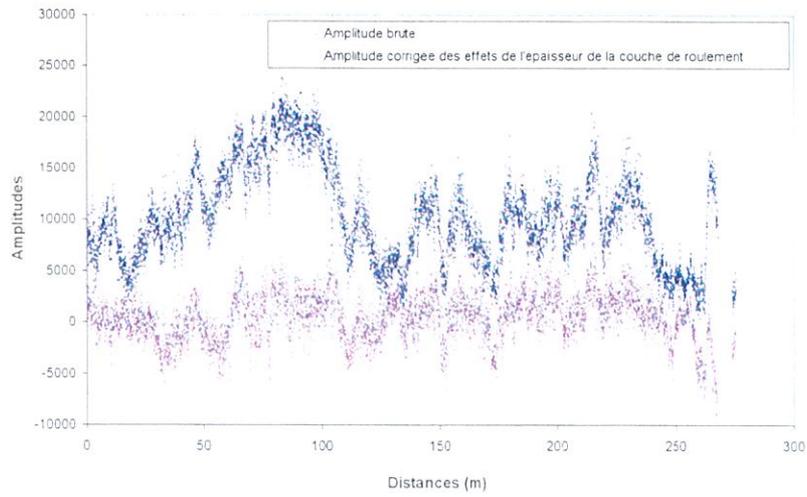


Figure 144. Correction de l'amplitude brute - Exemple sur un profil de mesures

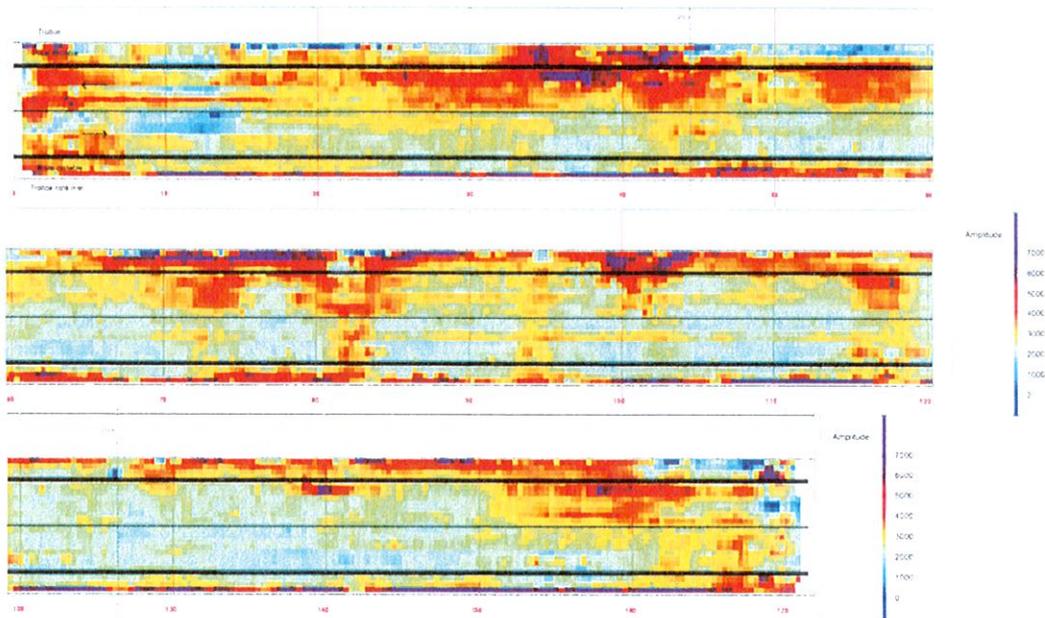


Figure 145. Exemple de cartographie des amplitudes corrigées

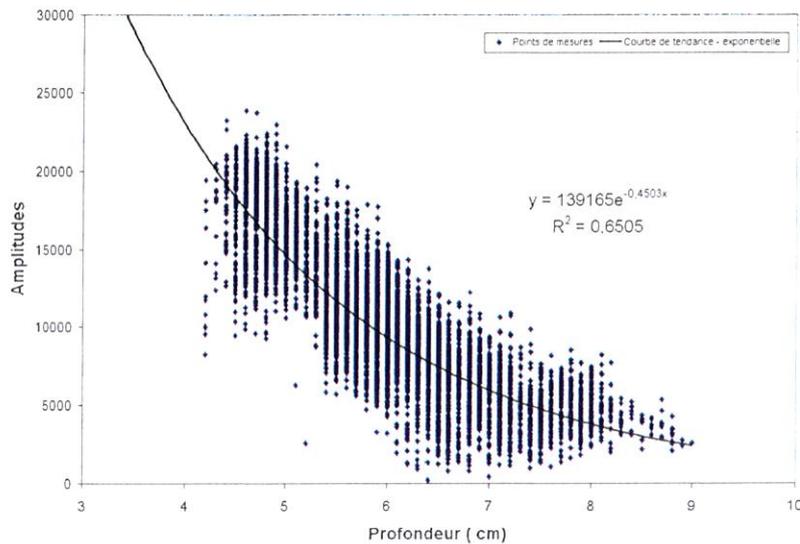


Figure 143. Étude de corrélation entre l'amplitude brute du signal et l'épaisseur de la couche de roulement

6.2.2 Interprétation

La cartographie « amplitude_corrigeée » permet d'identifier un certain nombre de zones significatives : faibles, moyennes et fortes amplitudes. Il convient alors d'effectuer, par échantillonnage, une analyse approfondie des coupes-temps correspondant à ces zones. Cette analyse permet d'interpréter correctement les amplitudes et d'éviter les diagnostics erronés.

En effet, une amplitude élevée peut s'expliquer par une présence d'eau mais peut également avoir d'autres origines :

- disparition d'une couche dans la structure de chaussée ;
- superposition de plusieurs couches de faibles épaisseurs non discriminées par la mesure radar (manque de résolution) et dont les amplitudes s'additionnent ;
- réflexion du signal sur des armatures du tablier insuffisamment enrobées se confondant avec la réflexion sur le support béton ;
- décollement de la chape d'étanchéité ;
- etc.

À l'inverse, de faibles amplitudes ne doivent pas être automatiquement considérées comme représentatives de zones saines (figure 146).

Enfin, il convient d'insister sur le fait que, dans cette méthode de traitement, la cartographie des « amplitudes corrigées » ne montre que des variations relatives des amplitudes du signal électromagnétique au niveau de la chape par rapport à un état « moyen » inconnu. Les sondages (ou fenêtres de reconnaissance) sont donc indispensables pour caler les différentes classes d'amplitudes en fonction de l'état réel du complexe « étanchéité / couche de roulement » ausculté.

Recommandation : La ou les premières fenêtres de reconnaissance seront positionnées dans les zones suspectées de plus forte humidité (présentant les plus fortes amplitudes). En cas de résultats négatifs (pas ou peu d'humidité constatée), on pourra s'affranchir des autres fenêtres de reconnaissance dans les zones *a priori* plus saines.

6.3 Détection d'hétérogénéités ou d'anomalies dans le support de la chape d'étanchéité

La visualisation des profils radar, indépendamment de l'étude des cartographies d'amplitudes corrigées, permet d'apporter des informations complémentaires sur la géométrie interne de la structure ou de détecter d'éventuelles anomalies. Cette approche complémentaire et qualitative doit permettre d'enrichir et de fiabiliser l'évaluation de l'ouvrage.

L'essentiel de l'analyse s'appuie sur l'étude des coupes-temps. Elle peut apporter des informations relatives à la géométrie ou aux propriétés EM des matériaux.

Concernant les informations géométriques, l'analyse peut permettre notamment d'obtenir des détails relatifs à la position des armatures, à l'épaisseur du tablier, à une couche d'enrobé mise en œuvre en deux passes, à la disparition d'une interface (disparition de la couche de reprofilage par exemple), etc.

Concernant les informations sur les matériaux : les anomalies dans le signal radar peuvent être symptomatiques d'un changement ou d'une altération des propriétés des matériaux tels que : des délaminations, des nids-de-cailloux, de l'humidité excessive dans l'épaisseur, une porosité anormale ou une modification des conditions de continuité entre les différentes couches (décollement par exemple).

Conclusion sur l'exploitation et la présentation des auscultations radar

Quelle que soit l'application envisagée (mesures des épaisseurs, détection d'humidité et d'anomalies), l'interprétation des mesures doit être confiée exclusivement à un spécialiste « radar » associé à un spécialiste « chaussée sur ouvrage d'art ». Leur interprétation définitive nécessitera dans la plupart des cas l'ouverture de fenêtres de reconnaissance positionnées par les images radar (profils ou cartographies).

Ce positionnement radar valorise ces fenêtres qui deviennent alors représentatives d'une zone spécifique. Inversement, ces dernières permettent d'étalonner et de quantifier les informations radar.

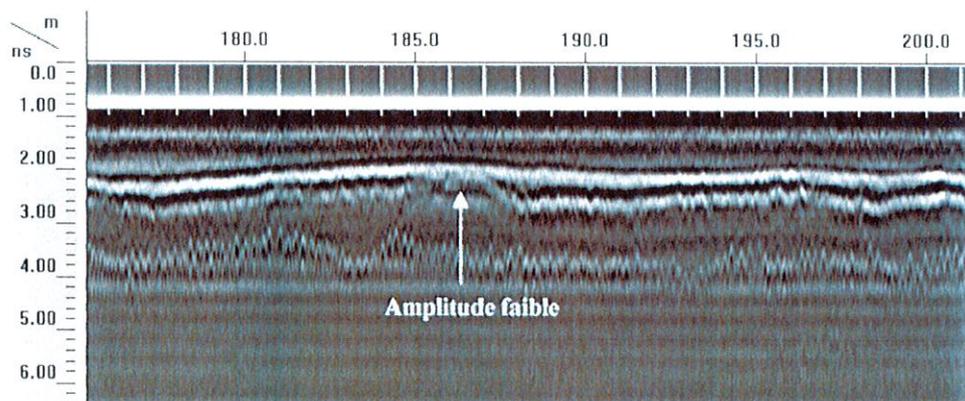


Figure 146. Exemple de coupe-temps

Dans l'exemple ci-dessus, les faibles amplitudes sont liées à une diminution de l'épaisseur de la couche de reprofilage sous l'étanchéité.

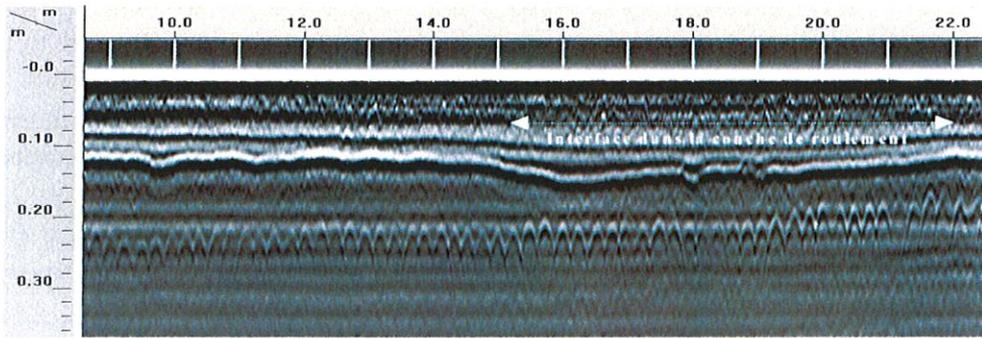


Figure 147. Exemple de coupe-profondeur

Dans l'exemple ci-dessus, une interface apparaît dans la couche de roulement entre les abscisses 15 et 22 m du profil indiquant une mise en œuvre de la couche de roulement en deux passes. L'amplitude peu marquée indique en général un bon collage entre les deux couches.

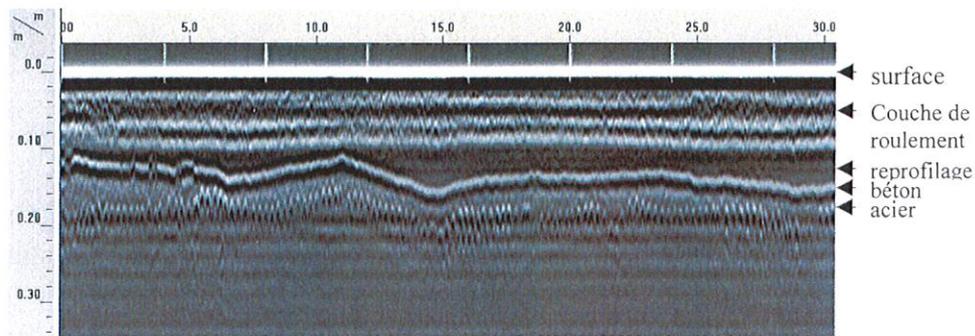


Figure 148. Exemple de coupe-profondeur

Dans l'exemple ci-dessus, on observe une variation importante de l'épaisseur de la couche de reprofilage.

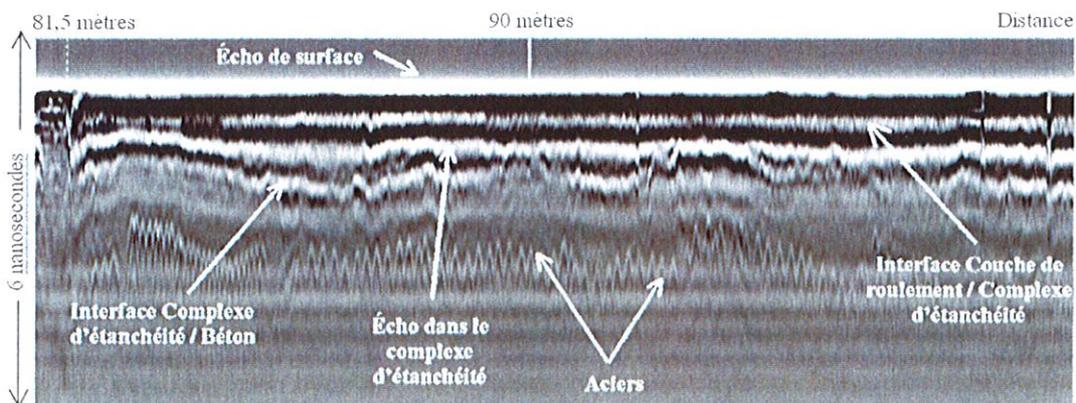


Figure 149. Exemple de coupe-temps

Dans l'exemple ci-dessus, la coupe-temps apporte les indications complémentaires suivantes :

- un écho visible ponctuellement dans le complexe d'étanchéité avec de fortes variations d'amplitude indique la présence de défauts au sein de cette couche. Les réflexions de forte amplitude peuvent être la conséquence de la présence d'eau ;
- la réflexion à l'interface « complexe d'étanchéité / béton » est parfois masquée ou perturbée par les amplitudes très fortes du signal rencontrées dans le complexe d'étanchéité ;
- l'interface « couche de roulement / étanchéité » présente de fortes variations d'amplitudes qui sont probablement la conséquence d'une forte humidité ou d'une présence d'eau.

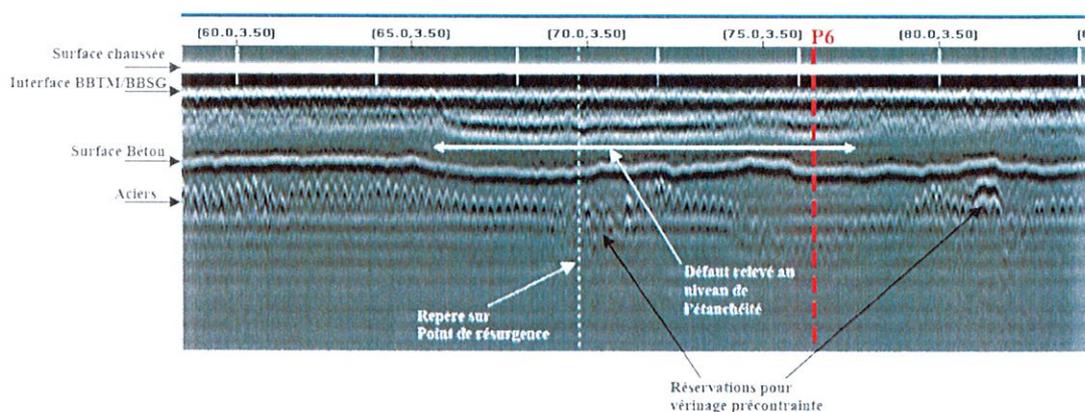


Figure 150. Exemple de coupe-profondeur

Dans l'exemple ci-dessus, la coupe-profondeur permet de détecter une anomalie dans la couche de reprofilage sous le système d'étanchéité. Il s'agit d'une anomalie symptomatique d'une présence d'eau.

7. Méthodes et essais associés

En complément de la technique radar, pour son application à la détection d'humidité sous la chape d'étanchéité, et dans le but d'affiner son interprétation, il convient (si l'analyse préalable en montre la faisabilité et l'opportunité) d'y associer la technique d'auscultation neutronique dont l'objet spécifique est la détection d'humidité dans la structure de chaussée (voir l'annexe 4 dédiée à cette méthode). Cette technique permettra de confirmer le diagnostic de suspicion d'humidité sous la chape. Elle apportera également des informations complémentaires sur d'éventuelles variations d'humidité au sein de la couche de roulement (suite à un épisode pluvieux par exemple) et donc de délimiter les zones pour lesquelles des doutes sur la fiabilité des interprétations radar existent.

Des mesures de compacité à l'aide d'un gammadensimètre de chantier pourront être utiles pour lever tout doute sur des hétérogénéités présentes dans les couches de la chaussée.

La superposition des cartographies radar avec les relevés effectués lors de l'examen visuel de la couche de roulement et de la sous-face du tablier pourra compléter l'interprétation des mesures et la formulation du diagnostic.

Enfin, dans la plupart des cas, l'auscultation radar du tablier ne permettra pas de formuler définitivement le diagnostic et il conviendra de la compléter par l'ouverture

de fenêtres de reconnaissance. Ces dernières pourront être judicieusement implantées à l'aide des cartographies évoquées dans les paragraphes précédents (figure 151).

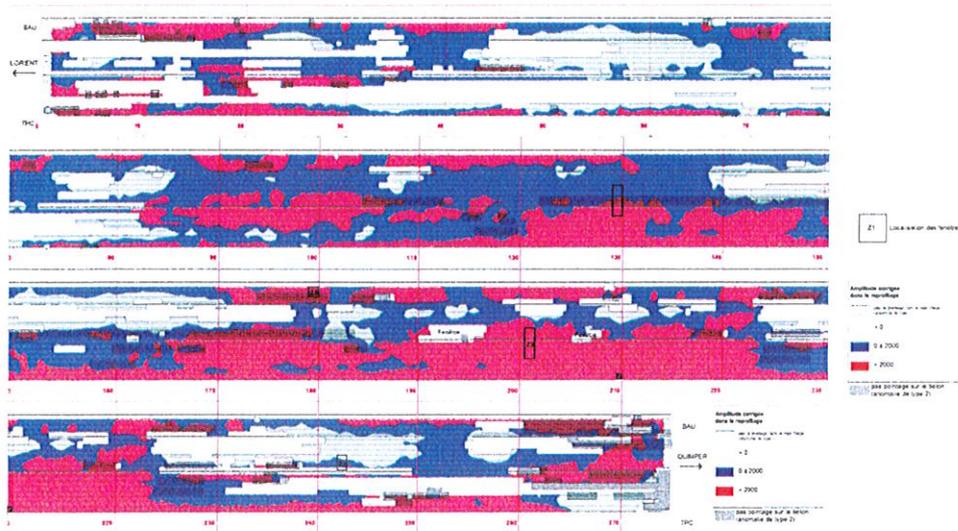


Figure 151. Implantation de fenêtre de reconnaissance à l'aide de la cartographie des amplitudes corrigées

8. Bibliographie

- [1] De Bosset C., Robert A., Dumitrescu T., Belhia A., « *Mise au point d'une méthode pour localiser les défauts d'étanchéité et rechercher divers défauts dans le béton des tabliers des ponts par voie non destructive* », Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie – Office fédéral des routes, Suisse, 1991.
- [2] Dérobert X., Coffec O., « *Investigation radar de structure – Performances envisageables pour des applications sur ouvrages d'art* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 230, 2001, pp. 57-66.
- [3] Balaÿssac J.-P., Laurens S., Rhazi J., « *Utilisation du radar pour la détection de zones à risque de corrosion dans le béton armé* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 237, 2002, pp. 99-102.
- [4] Dérobert X., « *Techniques radar appliquées au génie civil* », Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, SI9, 2003, 109 pages.
- [5] Laurens S., Balaÿssac J.-P., Rhazi J., Bisaro J.-P., « *Influence de l'humidité de surface du béton sur l'onde directe du radar* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 239, 2002, pp. 71-78.
- [6] Garciaz J.-L., Perrin J.-L., « *Application du radar géophysique à l'évaluation des variations de permittivité et de résistivité de surface des matériaux – Conception d'une antenne spécifique et traitement des données* », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 239, 2002, pp. 65-70.

Annexe 3 : Mesures *in situ* auscultation par thermographie infrarouge

- Pour la détection et la localisation de la présence d'une lame d'air sous la chape d'étanchéité consécutive à des défauts d'adhérence ou de décollement.
- Pour l'optimisation de l'implantation de fenêtres de reconnaissance.

1. Objet du diagnostic et domaine d'application

1.1 Contexte

La thermographie infrarouge, technique d'origine militaire, est couramment utilisée depuis plusieurs années pour le contrôle non destructif dans de nombreux domaines tels que la maintenance électrique et le bâtiment. La recherche de ponts thermiques et de défauts d'isolation est, dans ce dernier cas, son intérêt principal. Plus récemment, elle a été utilisée avec succès pour le contrôle de mise en œuvre des matériaux composites destinés aux renforcements de structures en béton armé et la réception des chapes d'étanchéité en feuilles préfabriquées bitumineuses, cas pour lesquels son intérêt réside dans l'aspect non destructif et global des contrôles.

1.2 Domaine d'application

L'auscultation par thermographie infrarouge est une technique non destructive. Elle est généralement effectuée sur l'ensemble du tablier mais peut intéresser des zones plus limitées. Cette technique est à haut rendement et permet de dresser une cartographie des températures de surface du tablier en identifiant des zones d'anomalies thermiques d'étendue plus ou moins importante révélées au niveau de l'examen de la surface. Elle est d'autant plus pertinente que les hétérogénéités thermiques sont situées à proximité de celle-ci.

La technique d'auscultation par thermographie infrarouge offre ainsi plusieurs applications possibles dans le déroulement d'un diagnostic de chape d'étanchéité sur ouvrages en service :

Détection et localisation de décollements dans et sous le complexe étanchéité/couche de roulement, notamment pour qualifier l'étendue de ce type de désordres

Détection de zones hétérogènes ou homogènes dans l'optique de la réalisation de fenêtres de reconnaissance du complexe d'étanchéité/couche de roulement.

2. Principe de l'examen par thermographie infrarouge

Tout corps situé à une température supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique principalement dans les bandes de 1 à 100 μm (figure 152). L'œil humain est sensible aux longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 μm alors que la

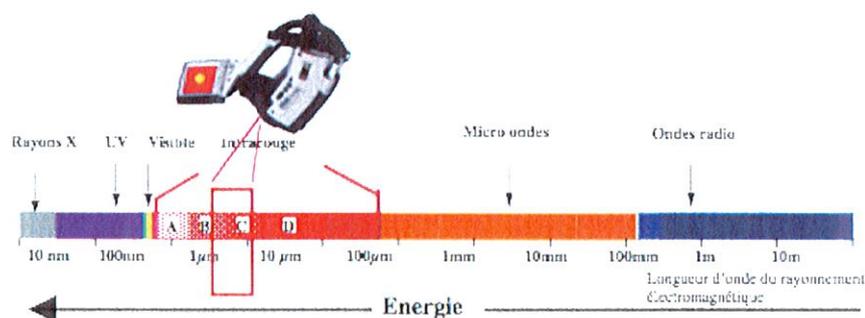


Figure 152. Spectre du rayonnement électromagnétique

gamme de travail de la caméra infrarouge, pour le domaine d'application concerné, se situe entre 7 et 13 μm . Elle permet donc de fournir une image de la température de surface en deux dimensions.

Basée sur le principe de la détection du flux thermique émis par la surface observée et sa transformation sous forme d'une image visible, cette technique permet de déterminer la présence d'hétérogénéités révélatrices d'une conductivité thermique différente des matériaux constitutifs de la structure auscultée (figure 153).

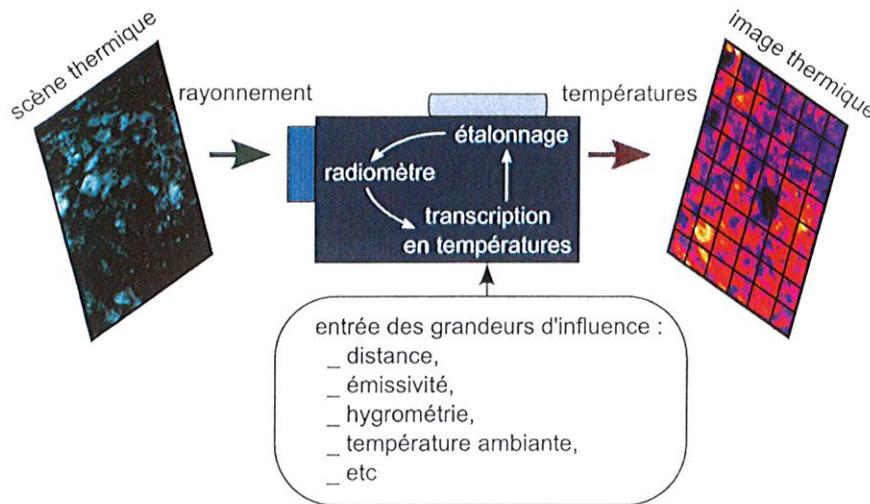


Figure 153. Schéma de principe de fonctionnement d'une caméra infrarouge

La présence d'air, conséquence de décollements du complexe d'étanchéité, joue un rôle d'isolant, favorisant ainsi la montée en température de la surface du matériau alors exposé au rayonnement solaire. Cette variation en température sera d'autant plus élevée que la surface et/ou l'épaisseur de la lame d'air incluse sera(ont) importante(s). L'analyse de l'image thermographique fournie peut ainsi donner des informations pertinentes sur l'étendue du défaut ainsi révélé (figures 154 et 155).

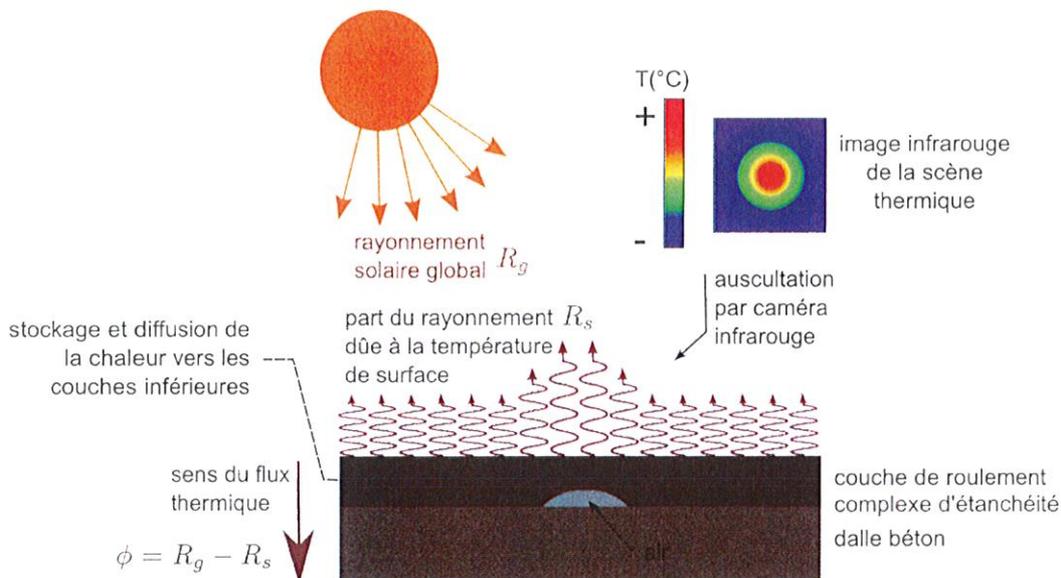


Figure 154. Schéma de principe de détection de la présence de décollements de la couche d'étanchéité sous sollicitation solaire (diurne)

La cartographie des défauts peut ainsi être réalisée *in situ* ou *a posteriori* et conduire à la réalisation d'investigations ciblées telles que, par exemple, l'ouverture de fenêtres de reconnaissance afin de caractériser plus précisément la nature de l'anomalie rencontrée.

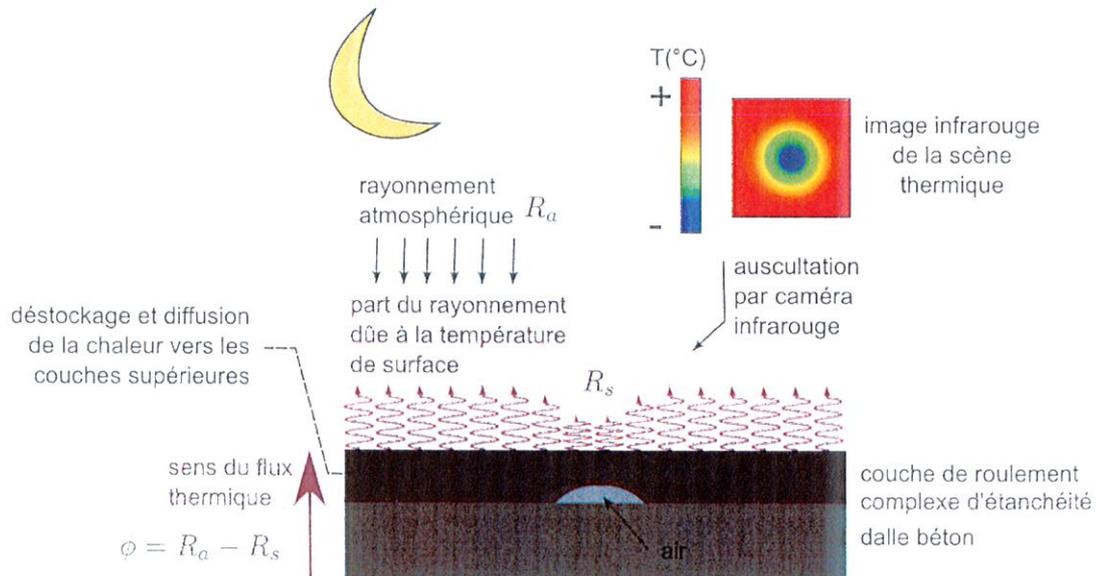


Figure 155. Schéma de principe de détection de la présence de décollements de la couche d'étanchéité lors d'une phase de refroidissement (nocturne)

3. Limites et précautions

Cette méthode d'investigation nécessite d'une part un personnel qualifié, et d'autre part des conditions de mise en œuvre très particulières pour que les images fournies soient exploitables. Il est donc nécessaire de respecter les points suivants :

- ▶ l'acquisition des images thermographiques doit être effectuée à des périodes où le contraste thermique jour/nuit est élevé. Ces conditions se rencontrent principalement durant la période estivale, l'ensoleillement étant maximal avec un flux solaire important. Mais l'examen à d'autres périodes peut être envisagé pour peu que le contraste thermique jour/nuit soit élevé ;
- ▶ d'une manière générale, les mesures en début de matinée et en fin de journée seront privilégiées. Néanmoins, au regard de la complexité des échanges thermiques, la réalisation de plusieurs mesures « test » au cours de la journée afin d'identifier le moment où le contraste sera maximum est recommandée. Il est également possible d'intervenir de nuit, le flux thermique étant inversé, les images fournies seront en négatif ;
- ▶ la pluie et l'humidité présentes sur l'ouvrage rendent inopérante la thermographie infrarouge, les phénomènes thermiques générés par l'évaporation de l'eau étant bien plus importants que ceux produits par d'éventuels défauts du complexe d'étanchéité/couche de roulement. À un niveau moindre, un vent important (> 5 m/s) est néfaste à l'observation du flux thermique à la surface de la couche de roulement en raison des phénomènes de convection générés ;
- ▶ afin de limiter les perturbations thermiques provenant du passage des véhicules (échauffement au droit des pneumatiques, des carters et échappements) la circulation sur la voie examinée doit être interrompue au moins quatre heures avant l'examen et,

bien sûr, durant toute sa durée. Cette remarque concerne particulièrement les ouvrages très circulés. De même, les phénomènes d'ombres (murs antibruit, lampadaires, végétation, etc.), qui peuvent parasiter la sollicitation thermique, doivent être pris en compte ;

- l'utilisation d'un point haut tel qu'un véhicule surélevé (camion, fourgon, ou mieux nacelle, potence sur véhicule) permet d'élargir le champ de vision couvert par la caméra et par là même de mieux apprécier les éventuelles hétérogénéités thermiques ;
- l'épaisseur maximale d'investigation, au regard des phénomènes thermiques mis en jeu, est de l'ordre de dix centimètres (couches de roulement et d'étanchéité confondues), toutefois les meilleurs résultats sont obtenus avec des épaisseurs inférieures à 7 cm.

Dans tous les cas, il convient, au préalable, de procéder à un examen visuel de la couche de roulement afin de repérer tout défaut de surface (salissures, marquage routier, défauts d'enrobé, etc.). La saisie simultanée de l'image visible et infrarouge permet, dans certains cas, d'associer l'anomalie thermique à un défaut de surface. De plus, l'association des deux images rend le repérage plus facile.

4. Matériel

4.1 Caméra infrarouge

Les caractéristiques recommandées pour le diagnostic des chapes d'étanchéité sont les suivantes :

- **sensibilité (NETD¹⁵) < 80 mK** à une température d'utilisation de 20 °C ;
- **plage de température concernée de -10 à +120 °C** ;
- **matrice d'acquisition : minimum 320 x 240 éléments** ;
- **réponse spectrale de 7,5 à 13 μm** ;
- la focale de l'optique devra être adaptée à la distance des surfaces à observer, on pourra retenir comme valeur guide une optique fournissant un champ de vision de 24° x 18°. Une optique grand angle (45° x 34°) peut également être utilisée, elle présente l'intérêt d'offrir une profondeur de champ étendue réduisant d'autant les mises au point nécessaires ;

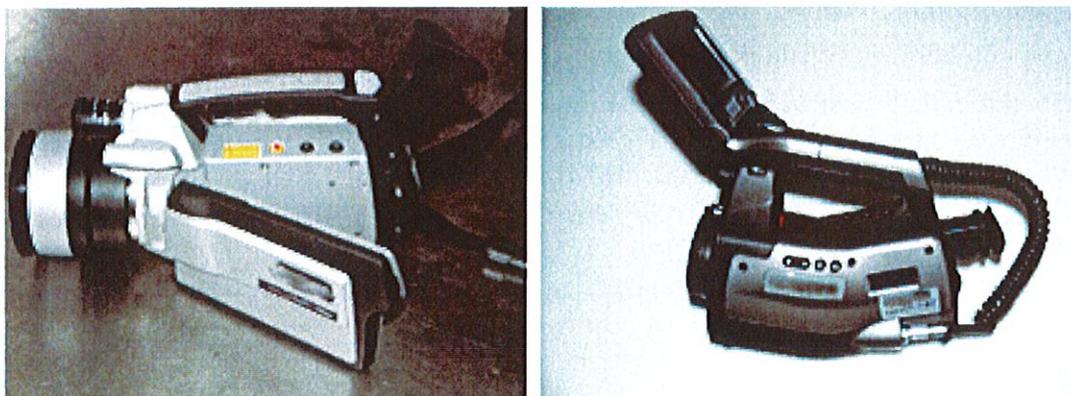


Figure 156. Exemples de caméra infrarouge utilisables pour le diagnostic par thermographie infrarouge

15. NETD : Noise Equivalent Temperature Difference

- stockage des images thermographiques sur un support adapté (carte mémoire, disque dur, etc.). Une connexion à un micro-ordinateur pour le stockage des données, voire le pilotage de la caméra, peut, en outre, permettre l'enregistrement de séquences filmées et offre un confort d'utilisation appréciable ;
- la présence d'un viseur optique est indispensable, car l'utilisation d'une caméra munie seulement d'un écran LCD peut s'avérer délicate en cas d'ensoleillement.

4.2 Équipements divers

Outre le matériel classique de visite d'ouvrage, les matériels suivants peuvent être utiles :

- odomètre pour le repérage des défauts et anomalies ;
- dispositif de marquage au sol ;
- éventuellement pied photographique roulant ;
- thermohygromètre, thermomètre de contact, anémomètre ;
- appareil photo numérique ;
- micro-ordinateur équipé de logiciels spécifiques pour le traitement *in situ* des thermographies et éventuellement le pilotage de la caméra ;
- GPS.

5. Méthodologie

5.1 Préparation

Conformément à la démarche de diagnostic des chapes d'étanchéité, le déploiement de la technique d'auscultation par thermographie infrarouge sur un tablier est l'aboutissement d'une analyse préalable comprenant notamment l'étude du dossier d'ouvrage et l'évaluation visuelle de la couche de roulement et de l'intrados du tablier. L'utilisation de cette technique est pertinente lorsque l'analyse préalable :

- montre la faisabilité technique, en raison notamment de l'épaisseur du complexe d'étanchéité/couche de roulement. Si les éléments fournis par le dossier d'ouvrage sont incertains, il est fortement recommandé de procéder à une reconnaissance des épaisseurs des couches au radar ;
- conduit à suspecter une présence de décollements (par l'apparition de fissurations circulaires notamment) ;
- recommande la réalisation de fenêtres de reconnaissance.

Le déploiement de la technique infrarouge est réservé aux équipes spécialisées en la matière et capables d'exploiter et d'interpréter les images thermographiques fournies dans le cadre d'une problématique liée aux chapes d'étanchéité. La qualification du personnel dans le domaine du contrôle des chapes d'étanchéité par thermographie infrarouge doit être exigée.

Pour préparer l'intervention terrain, l'équipe disposera au minimum des éléments suivants : coupe transversale courante et longueur du tablier, coupe détaillée de la structure de chaussée en place avec les épaisseurs correspondantes (couche de roulement, type d'étanchéité, présence éventuelle d'un renformis ou d'un reprofilage), historique des interventions.

Le phasage de l'intervention sera étudié de manière à obtenir un contraste thermique optimal en tenant compte des contraintes d'exploitation de l'ouvrage et

notamment de la neutralisation de la circulation. Les prévisions météorologiques sont évidemment à prendre en compte.

5.2 Conditions de déploiement de la technique

La circulation automobile et le stationnement de véhicules sur l'ouvrage auront été interrompus plusieurs heures avant l'examen.

Il s'agit d'une technique à grand rendement. La présence de deux opérateurs est fortement recommandée pour les ouvrages de grandes dimensions, le poids de la caméra et la fatigue visuelle étant importants lors des phases de contrôle prolongées. Ce second opérateur pourra également repérer les défauts ou anomalies thermiques relevées à la caméra. Dans le cas de réalisation de séquences thermographiques (série d'images pour un traitement ultérieur), un opérateur manipule la caméra et le second assure et contrôle le bon fonctionnement des enregistrements.

Il est utile de procéder à un repérage sur l'ouvrage à l'aide d'une bombe aérosol de peinture argentée qui présente l'avantage d'être détectable dans le spectre infrarouge et dans le spectre visible. Cette disposition est indispensable dans le cas de l'enregistrement de séquences thermographiques.

5.3 Mode opératoire

5.3.1 Implantation et réalisation des images thermographiques

L'auscultation est réalisée par balayage de l'ensemble de la zone à investiguer dans le champ de la caméra suivant des profils linéaires, longitudinaux de préférence, sur la totalité de la longueur du tablier (figure 157). Ces profils sont régulièrement répartis transversalement sur la largeur du tablier (1 profil par voie de circulation par exemple). L'espacement entre profils doit être tel qu'il existe un recouvrement entre les différentes zones parcourues.

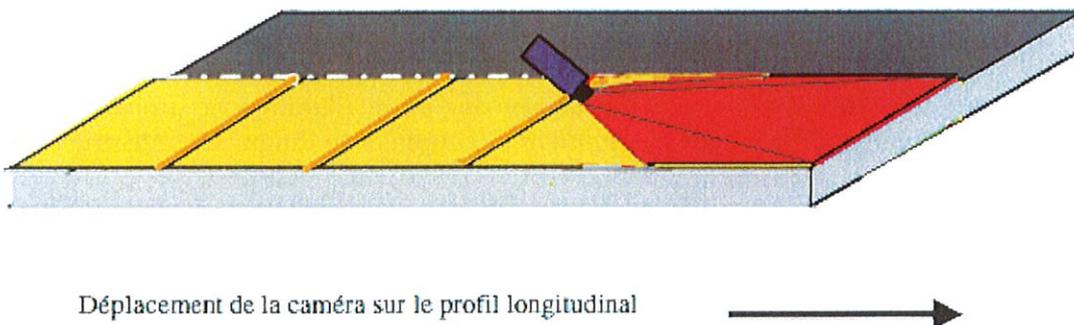


Figure 157. Exemple de méthode d'acquisition d'images thermographiques

L'acquisition des thermographies est réalisée de manière à ce que, sur un même profil longitudinal, l'ensemble de la surface de l'ouvrage soit enregistré. En général, une image tous les 5 m par voie examinée est suffisante pour un objectif grand angle. Sur des ouvrages de très grandes dimensions, afin de réduire le nombre de clichés à exploiter, seules les zones présentant des anomalies thermiques peuvent faire l'objet d'une telle saisie.

La largeur du champ qu'il est possible d'examiner est fonction de l'objectif de la caméra selon la formule suivante

$$L = 2D \cdot \tan(\alpha/2) \text{ (figure 158).}$$

L'utilisation d'un point haut, nacelle par exemple, pour réaliser les prises de vues permet de couvrir un champ de vision plus important et d'apprécier plus finement la position, la dimension et le contraste des éventuelles hétérogénéités thermiques grâce à une incidence normale (figure 159). Le fait d'être situé à une position verticale permet également de limiter les phénomènes de réflexion.

D'une manière générale, on s'assurera que l'angle formé entre l'axe de visée de la caméra et la verticale soit toujours inférieur à 30° (figure 159).



Figure 158. Largeur du champ de vision de la caméra

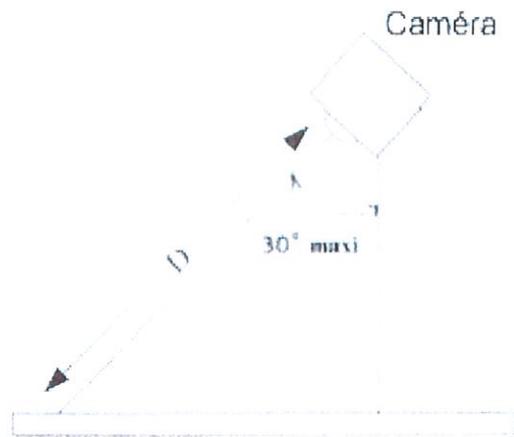


Figure 159. Position de la caméra

5.3.2 Essais complémentaires

La thermographie est un moyen d'auscultation permettant de révéler les hétérogénéités thermiques mais il est nécessaire d'effectuer une, voire plusieurs, fenêtres de reconnaissance à partir de la couche de chaussée de manière à pouvoir interpréter plus précisément les images obtenues.

En outre, il est fortement conseillé de réaliser des essais d'adhérence (norme NF P 98-282) de la chape d'étanchéité de manière à compléter le diagnostic effectué à la caméra.

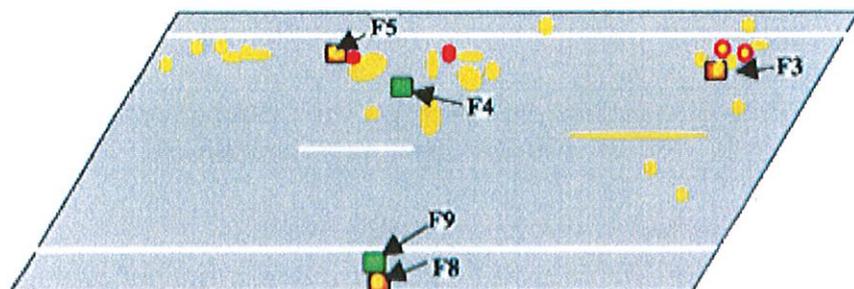
6. Exploitation et présentation des résultats

Les images thermographiques sont disponibles en temps réel et permettent le repérage, au traceur de chantier par exemple, des anomalies sur la chaussée. Ceci afin de préciser éventuellement la position de fenêtres de reconnaissance en vue d'un diagnostic.

Un rapport est ensuite établi en reportant schématiquement l'ensemble des anomalies constatées avec leur implantation et leurs dimensions apparentes. Les images thermographiques pourront illustrer le rapport, elles seront utilisées sans traitement ou avec la mise en œuvre d'un logiciel de fusion permettant la superposition d'images infrarouges sur les mêmes images visibles.

On fera figurer dans le rapport les conditions de l'examen et notamment les paramètres météorologiques avec la température ambiante et la température de surface à différents moments de la journée.

Les résultats des investigations complémentaires telles que la réalisation de fenêtres seront joints aux observations, avec leur implantation précise, de manière à valider les interprétations (figures 160, 161 et 162).



- Hétérogénéités thermiques repérées à la caméra infrarouge
- Fissuration périphérique des zones de cloquage
- Dégradations de la couche de roulement
- Emplacement des fenêtres de reconnaissance (zones "saines")
- Emplacement des fenêtres de reconnaissance (zones "défectueuses")

Figure 160. Exemple de présentation des désordres relevés à la caméra infrarouge



Figure 161. Vue de la voie lente et de l'emplacement des fenêtres F6 (zone hétérogène) et F7 (zone homogène) (épaisseur d'enrobé : 8 cm)

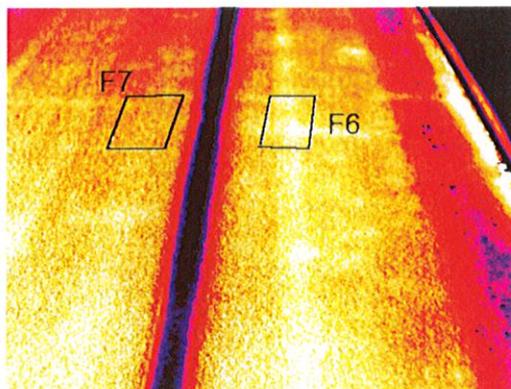


Figure 162. Vue infrarouge de la même zone. On relève des hétérogénéités sur l'emplacement de la fenêtre F6 avec une température supérieure de 1,5 °C par rapport à l'emplacement de la zone F7

7. Méthodes et essais associés

Le déploiement de la thermographie infrarouge s'inscrit dans une démarche globale de diagnostic pouvant associer différentes techniques d'auscultation telles que par exemple le RADAR ou les fenêtres de reconnaissance.

Il est pertinent d'appliquer cette technique après une auscultation RADAR et préalablement à des ouvertures de fenêtres de reconnaissance. La superposition

d'une cartographie des épaisseurs d'enrobé (effectuée par auscultation RADAR) pourra permettre de s'assurer que les images thermographiques n'ont pas été perturbées par des épaisseurs d'enrobé trop faibles ou trop importantes.

8. Bibliographie

Fascicule 67 titre 1 du CCTG : Art 11.3.2.3 : « Cloques Gonfles » et article 12.4 « *Dispositions particulières aux étanchéités par feuille préfabriquée* » - partie « commentaires ».

Norme NF P 98-282, *Produits d'étanchéité pour ouvrage d'art – Mesure d'adhérence au support. Essai en laboratoire ou in-situ à vitesse de déplacement contrôlée*, AFNOR, juin 2007.

Pajani D., « *Mesure par thermographie infrarouge* », Ed ADD, 1989.

Gaussorgues G., « *La thermographie infrarouge - Principes, technologie, applications* ».

de Bosset C., Robert A., Dumetriescu T., Belhia A., « *Mise au point d'une méthode pour localiser les défauts d'étanchéité et rechercher divers défauts dans le béton par voie non destructive* », BOSCOMER Services SA-Office fédéral des Routes Mandat de recherche OFR n° 82/89 6406-1, pp. 10-22, 44-45, 81-86.

Cannard H., Fragnet M., Pero F., Thaveau M.-P., « *Le contrôle non destructif de réception des chapes d'étanchéité des ponts routiers par thermographie infrarouge* », Bulletin ouvrages d'art du Sétra n° 56 de novembre 2007, pp. 24-27.

Annexe 4 : Mesures *in situ* auscultation neutronique

– Pour la détection et la localisation d'humidité.

1. Objet de la mesure et domaines d'application

1.1 Contexte

Les sondes neutroniques sont très utilisées en géotechnique/géologie pour la caractérisation des sols. Les appareils type « TROXLER » sont utilisés couramment par les équipes de contrôle des travaux routiers (qualité des enrobés) mais essentiellement en fonctionnement « gammadensimètre – densimètre » et très peu en fonctionnement « sonde neutronique – humidimètre ». Certaines sociétés de diagnostic d'étanchéité l'utilisent pour des expertises de réservoirs, de caves, de toitures terrasse et également de tunnels et de ponts. De par ses principes, cette technique s'inscrit pleinement dans la liste des moyens mobilisables pour le diagnostic des chapes d'étanchéité.

1.2 Domaine d'application

L'auscultation neutronique est une technique non destructive. Elle est généralement effectuée sur l'ensemble du tablier mais peut intéresser des zones plus limitées. Elle peut nécessiter, dans certains cas, quelques essais destructifs pour l'étalonnage des mesures. Cette technique est à faible rendement et permet de dresser une cartographie du tablier en identifiant des zones d'anomalie (humidité) d'étendue plus ou moins importante dans la couche de chaussée et le support béton.

La technique d'auscultation neutronique offre ainsi plusieurs applications possibles dans le déroulement d'un diagnostic de chape d'étanchéité sur ouvrages en service :

- ▶ détection et localisation d'humidité dans et sous le complexe étanchéité/couche de roulement ;
- ▶ mesure de teneur en eau dans la couche de roulement et dans le support béton (sous réserve d'un étalonnage/calibrage préalable) ;
- ▶ mesure de densité sèche et humide¹⁶.

2. Principe

Basée sur le principe de la thermalisation neutronique, cette technique permet de déterminer la teneur en eau de la chaussée et du support béton. L'hydrogène de l'eau contenue dans le matériau ausculté ralentit les neutrons émis par la source radioactive. Un détecteur à hélium situé dans la partie inférieure de l'appareil capte les neutrons ainsi ralentis.

L'énergie provient d'une source neutronique radioactive : l'américium 241 (Am241), qui, en irradiant l'oxyde de béryllium, provoque un bombardement à très haute fréquence de 70 000 neutrons par seconde. Cette émission produit une réaction atomique avec l'hydrogène présent dans le matériau ausculté. Comme elle est parfaitement constante, plus l'énergie est absorbée, plus il y a d'hydrogène, donc de l'eau.

Les neutrons émis par la source Am 241 pénètrent le matériau en y subissant le phénomène de thermalisation : les particules sont ralenties à un point tel que de nouvelles collisions restent sans effet sur leur vitesse. Le compteur à hélium, qui est sensible aux neutrons thermalisés, ne détecte pas les particules rapides et, par conséquent, les relevés obtenus sont directement proportionnels à la teneur en hydrogène du matériau testé.

¹⁶. Certains appareils seulement (voir § 4).

3. Limites et précautions

Le déploiement de la technique est réservé aux équipes spécialisées en la matière et capables d'exploiter et d'interpréter les mesures dans le cadre d'une problématique liée aux chapes d'étanchéité.

L'intérêt de la technique réside dans sa sensibilité spécifique à l'hydrogène. La technique est donc valable mais sous réserve d'avoir pris en compte les éléments suivants :

- les mesures sont comparatives et leur interprétation peut être délicate ;
- l'emploi d'une source radioactive nécessite des précautions particulières (périmètre de radioprotection, qualification du personnel, etc.) ;
- la technique mesure l'humidité sous la sonde ; il peut donc être difficile de différencier l'eau dans la couche de roulement de celle sous la chape¹⁷ (dans ce cas des mesures depuis la sous-face du tablier peuvent être envisagées) ;
- la technique peut être limitée par la profondeur d'investigation (P_i) de l'appareil (entre 10 et 30 cm). Elle est donc inopérante, avec certains appareils, pour des épaisseurs d'enrobé trop importantes ($> P_i$).

4. Matériel

4.1 Sonde neutronique de surface

Le matériel comprend un système de production d'énergie (source neutronique radioactive : Am 241) et un système de réception (compteur à hélium sensible aux neutrons thermalisés). L'appareil réalise des mesures de surface (on parle de sonde de surface - figure 163). Les mesures sont non destructives.

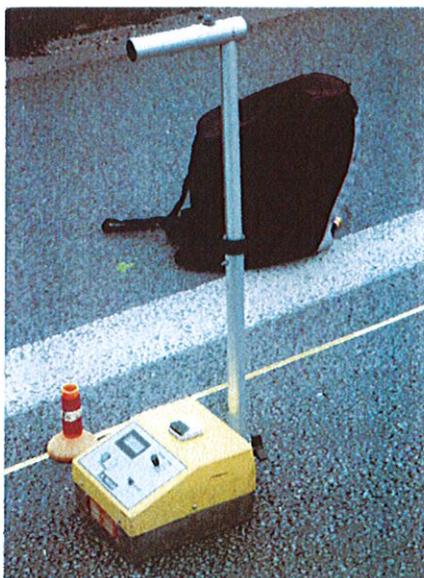


Figure 163. Exemple de sonde neutronique de surface

17. On peut s'affranchir de cette difficulté sous réserve d'effectuer un calibrage et des corrections particulières (voir plus loin).

4.2 Sonde mixte de surface

Certains appareils couramment employés dans le domaine des travaux routiers pour le contrôle du compactage de l'enrobé permettent également de faire des mesures de densité (on parle alors de sonde mixte). Cette fonction peut être utile notamment pour l'étalonnage/calibrage de la sonde neutronique.

En effectuant des mesures par rétrodiffusion, l'appareil (fonctionnant cette fois en « gammadensimètre ») permet alors de déterminer la masse volumique du matériau ausculté grâce au comptage de photons émis par une source radioactive (Césium 137). Des compteurs Geiger situés à la base de l'appareil détectent les photons gamma et un microprocesseur convertit leurs relevés par des valeurs correspondantes en masse volumique (figures 164 et 165).

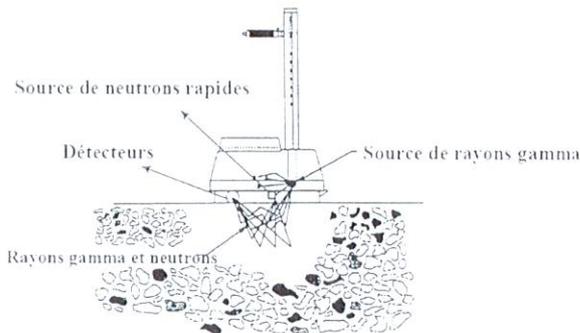


Figure 164. Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la masse volumique – En position « sonde de surface »

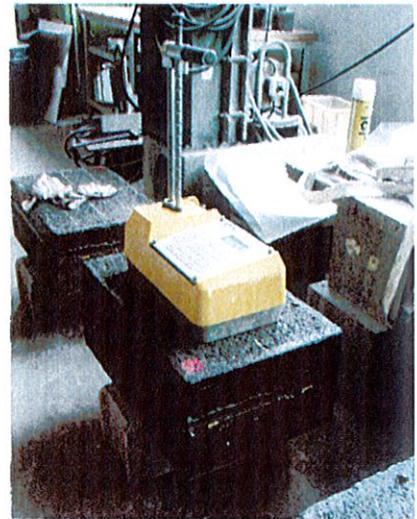


Figure 165. Exemple de sonde mixte (modèle TROXLER 3450)

4.3 Sonde de profondeur

D'autres types de sondes (sondes de profondeurs) permettent également de réaliser des mesures en profondeur (figure 166). Dans cette configuration la source d'émission est introduite dans la structure auscultée à la profondeur désirée dans un

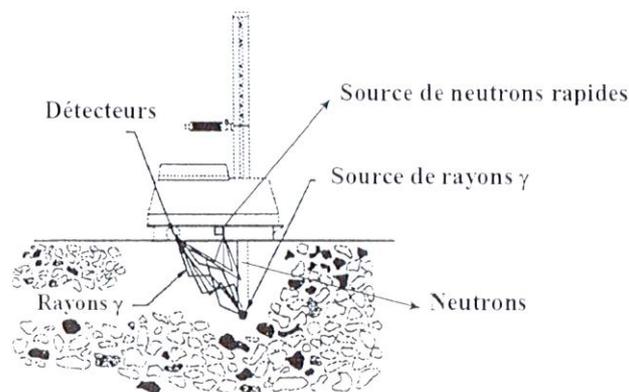


Figure 166. Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la masse volumique – En position « sonde de profondeur ».

trou préalablement exécuté. Cette technique nécessite donc un forage préalable et perd ainsi son caractère non destructif. Les mesures sont effectuées par incrément de 25 ou 50 mm sur une profondeur allant jusqu'à 300 mm.

Malgré son caractère destructif, l'appareil présente l'avantage d'accéder à un profil de teneur en eau dans l'épaisseur de la chaussée et du support béton. Dans la suite du document, seules les sondes de surface sont traitées.

5. Méthodologie

5.1 Préparation

Conformément à la démarche de diagnostic des chapes d'étanchéité, le déploiement de la technique d'auscultation neutronique sur un tablier est l'aboutissement d'une analyse préalable comprenant notamment l'analyse fine du dossier d'ouvrage et l'évaluation visuelle de la couche de roulement et de l'intrados du tablier. L'utilisation de cette technique est pertinente lorsque l'analyse précédente :

- montre la faisabilité technique du déploiement de la méthode neutronique ;
- conduit à suspecter une présence d'eau sous la chape d'étanchéité.

Le déploiement de la technique neutronique est réservé aux équipes spécialisées en la matière et capables d'exploiter et d'interpréter les mesures dans le cadre d'une problématique liée aux chapes d'étanchéité.

Pour préparer l'intervention terrain, l'équipe disposera au minimum des éléments suivants : coupe type de l'ouvrage, longueur et largeur du tablier, coupe type de la structure de chaussée avec les épaisseurs correspondantes (couche de roulement, type d'étanchéité, présence éventuelle d'un renformis ou d'un reprofilage).

5.2 Conditions de déploiement de la technique

La technique d'auscultation neutronique est applicable sur tout type d'ouvrage (ouvrages en béton armé, en béton précontraint, en maçonnerie ou en métal). Le déploiement est possible quelle que soit la structure de la couche de chaussée : présence de renformis, de reprofilage en béton hydraulique ou bitumineux sous réserve que la chaussée ait une épaisseur totale inférieure à la profondeur d'investigation de la sonde neutronique utilisée.

Attention néanmoins, car des variations trop importantes de l'épaisseur de la couche de roulement peuvent compliquer l'interprétation des mesures. Toutes informations relatives à des rechargements ou des réparations localisées de la couche de roulement ayant été réalisés dans le passé doivent donc être communiquées à l'équipe d'intervention.

La présence d'eau sur et dans la couche de roulement peut rendre délicate l'interprétation ultérieure des mesures. On évitera donc d'intervenir par temps pluvieux. Dans le cas où l'intervention est précédée d'un épisode pluvieux, un délai d'environ 48 heures avant la réalisation des mesures neutronique semble raisonnable : délai nécessaire pour le drainage et le séchage de l'eau présente dans la couche de roulement.

L'intervention nécessite des restrictions de circulation. L'auscultation se faisant en général par voie de circulation, elle nécessite la coupure successive de chaque voie du tablier.

Il s'agit d'une technique à faible rendement. Elle peut être utilisée en mesures ponctuelles ou en mesures globales sur la totalité de la surface du tablier par exemple. On parle dans ce cas de radiographie par émission neutronique. Le rendement est d'environ 100 m²/heure. Le temps de mesure est réglable (entre 15 et 60 secondes). Plus le temps de mesure est long, plus le nombre de neutrons émis est important et plus la mesure sera précise.

L'équipe manipulatrice de l'appareil doit être déclarée à l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire). Un périmètre de sécurité de 5 m autour de l'appareil doit être respecté pendant les mesures. Cette méthode de mesure faisant appel à une source radioactive, l'utilisateur devra disposer d'une habilitation conforme aux exigences de la réglementation en vigueur. Le propriétaire de l'appareil doit disposer en permanence d'une licence valide. Tout usager doit porter sur lui un dosimètre afin de surveiller son exposition aux radiations aussi bien durant l'emploi de l'appareil que durant son nettoyage.

Bien qu'il n'y ait pas de risque d'irradiation excessive en fonctionnement normal, un danger potentiel existe en cas d'utilisation incorrecte de l'appareil.

5.3 Mode opératoire

5.3.1 Implantation et réalisation des mesures

L'auscultation est réalisée suivant des profils linéaires longitudinaux de préférence sur la totalité de la longueur du tablier. Ces profils sont régulièrement répartis transversalement sur la largeur du tablier (3 profils par voies de circulation par exemple / figure 167). Dans un premier temps, un espacement entre profils longitudinaux d'environ 1 mètre doit être envisagé. Dans un second temps et selon les spécificités de la problématique, on pourra envisager de cibler l'auscultation sur une zone plus restreinte du tablier en adoptant un pas plus fin entre les profils longitudinaux.

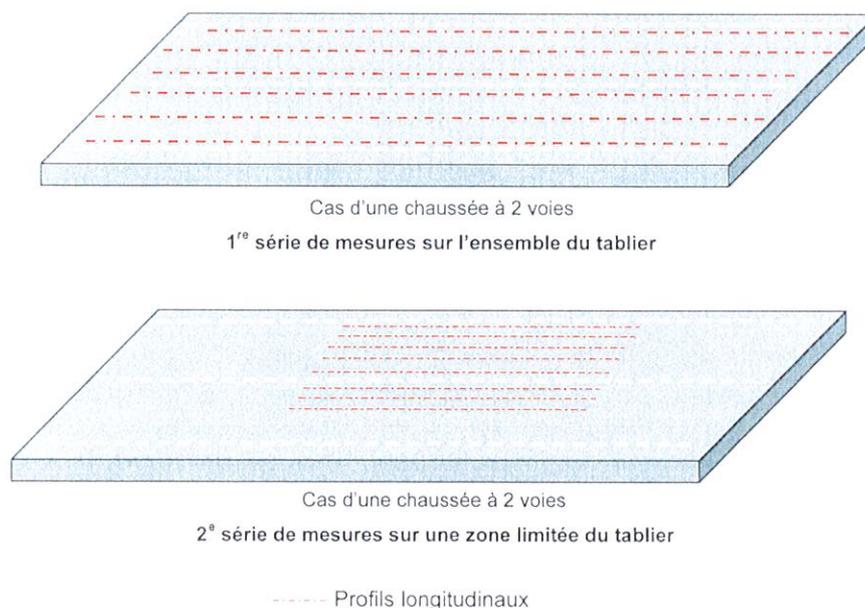


Figure 167. Implantation des mesures neutroniques

Sur un profil donné, les mesures sont effectuées avec un pas compris entre 0,5 et 1 mètre. Dans les zones suspectes ou à risque, le maillage de mesures pourra être affiné (inférieur à 0,5 mètre) afin de localiser précisément les éventuels points d'infiltration.

5.3.2 Carotte d'étalonnage

Les carottes d'étalonnage doivent être limitées en nombre (2 ou 3) car elles perforent le plus souvent l'étanchéité et sont difficilement réparables. Un diamètre de 50 mm sera suffisant dans la plupart des cas. La mesure précise de l'épaisseur de la couche de roulement permettra ensuite d'effectuer une éventuelle correction des mesures neutroniques (voir § 6). Pour cette correction d'épaisseur, on pourra utilement s'appuyer sur les résultats d'une auscultation radar (cartographie des épaisseurs) qui serait conduite en parallèle de l'auscultation neutronique. Enfin, il est recommandé de faire réaliser sur les différentes couches de la carotte des mesures de teneur en eau pour la vérification et le calibrage de la sonde neutronique.

Remarque : la mesure de la teneur en eau peut également être réalisée sur la base d'un prélèvement de poudre en utilisant une méthode utilisant du carbure de calcium.

La chronologie est la suivante : implantation des carottes, mesure neutronique ponctuelle à l'emplacement où sera prélevée la carotte, carottage (effectué « à sec »), mesure manuelle de l'épaisseur des différentes couches, mesure de la teneur en eau et enfin réparation du carottage (voir chapitre 4 § 4.2.1.2).

En alternative aux carottes d'étalonnage, une mesure de densité et de teneur en eau à l'aide d'une sonde de profondeur pourra être envisagée. Contrairement à la sonde neutronique de surface, qui donne une estimation globale de la teneur en eau sous la sonde, la sonde de profondeur permet d'accéder au profil de densité et de teneur en eau dans la couche de chaussée et le support béton (figure 168). Cette mesure nécessite un forage préalable qu'il conviendra de réparer avec les mêmes exigences qu'une carotte.

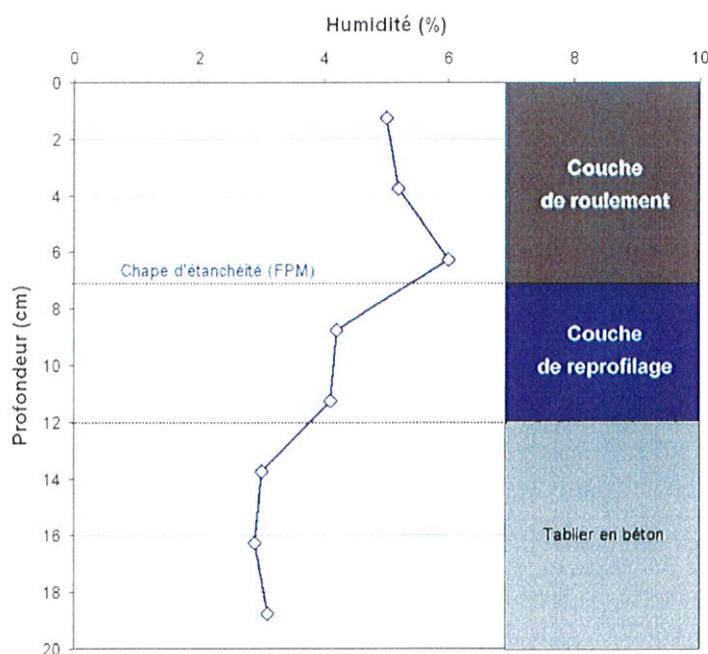


Figure 168. Exemple de profil de teneur en eau obtenu avec une sonde de profondeur

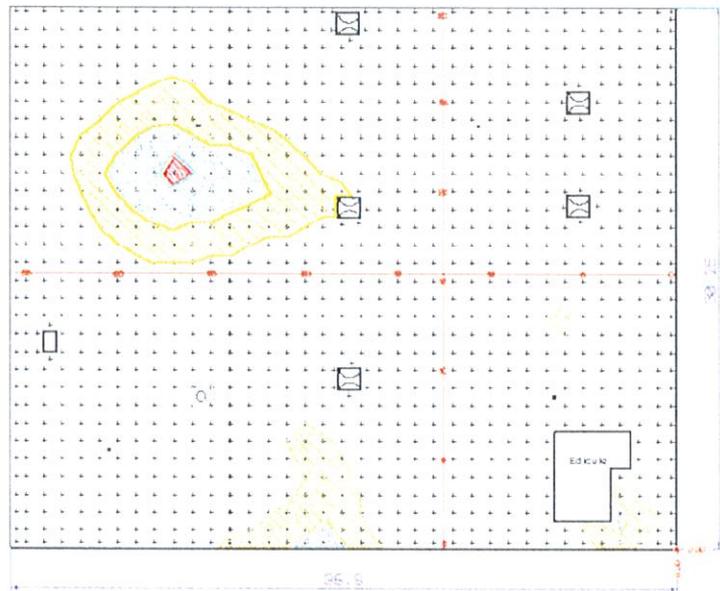
6. Exploitation et présentation des résultats

Les résultats peuvent être disponibles immédiatement, notamment dans le cas de mesures ponctuelles sans étalonnage/calibrage. Dans les autres cas, une exploitation des mesures prenant en compte d'éventuels essais complémentaires sur le matériau ausculté est nécessaire (épaisseurs, densité et teneur en eau).

L'interprétation des résultats est effectuée sur la base d'une cartographie (radiographie neutronique) en niveau de couleur (figure 169). La cartographie permet de mettre en avant les zones relativement plus riches en eau susceptibles d'être des zones d'infiltration ou de stagnation d'eau.

Cartographie à l'échelle d'une toiture terrasse

- + Point de mesure
- Quadrillage de la surface
Mesure tous les mètres
- Echelle 1/100 Réductions format A3
- Début du quadrillage
- 0 10 20 Décimètres
- Infiltration importante
Origine zone rouge
- Infiltration moyenne
Origine zone bleue
- Début d'infiltration

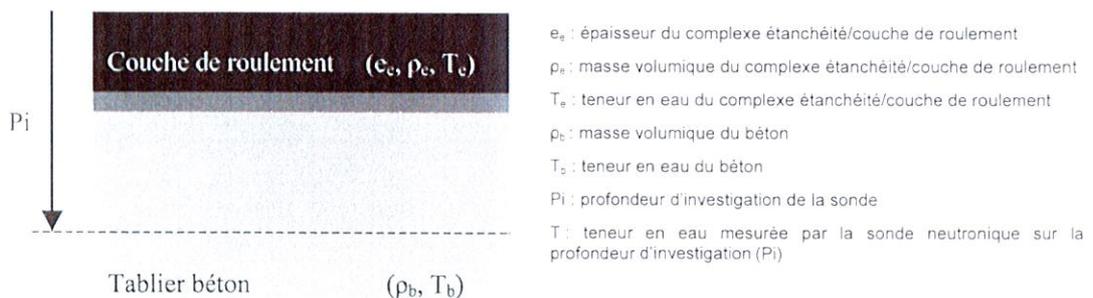


Teneur en hydrogène dont H2O des matériaux contrôlés

- Zone très humide de 170 kg/m³ et plus
- Zone légèrement humide de 57 kg/m³ à 91 kg/m³
- Zone humide de 102 kg/m³ à 135 kg/m³
- Zone de condensation de 48 kg/m³ à 51 kg/m³
- Zone intacte de 34 kg/m³ à 43 kg/m³

Figure 169. Exemple d'une radiographie neutronique

De façon courante, les mesures neutroniques sont interprétées en relatif à partir d'une cartographie permettant d'identifier des zones de fort gradient. Les mesures neutroniques permettent également d'estimer la teneur en eau (en absolu) du support béton sous réserve d'un étalonnage/calibrage (voir § 5.3.2) et d'une correction (figure 170).



$$T_b = (k + 1).T - k.T_e \quad \text{avec } k = \frac{\rho_e \cdot e_e}{\rho_b \cdot (P_i - e_e)}$$

T_e peut être déterminée par un essai de teneur en eau sur prélèvement ou par une mesure neutronique (sur une profondeur d'investigation $P_i = e_e$);

e_e peut être mesurée par auscultation radar, par carotte d'étalonnage ou par l'ouverture d'une fenêtre d'auscultation;

ρ_e peut être déterminée par un essai sur prélèvement ou par gammadensimétrie;

ρ_b peut être déterminée par un essai sur prélèvement ou prise égale à 2,3 t/m³ par défaut.

7. Méthodes et essais associés

La superposition de la radiographie neutronique, avec les relevés effectués lors de l'examen visuel de la couche de roulement et de la sous-face du tablier, pourra également orienter l'interprétation des mesures et la formulation du diagnostic.

La superposition d'une cartographie des épaisseurs d'enrobé (effectuée par auscultation radar) pourra permettre enfin de s'assurer que les mesures neutroniques n'ont pas été perturbées par des épaisseurs d'enrobé trop faibles ou trop importantes.

Dans certains cas, on pourra compléter l'auscultation neutronique par des mesures au gammadensimètre ou avec une sonde neutronique de profondeur.

Enfin, dans la plupart des cas, l'auscultation neutronique du tablier ne permettra pas à elle seule de formuler définitivement le diagnostic et il conviendra de l'associer à une auscultation radar et de la compléter par l'ouverture de fenêtres de reconnaissance. Ces dernières pourront être judicieusement implantées à l'aide de la cartographie évoquée dans le paragraphe précédent (zones de fort gradient d'une part et sans gradient d'autre part par exemple).

8. Bibliographie

Norme ASTM C1040/C1040M-08, *Standard test methods for in place density of unhardened and hardened concrete, including roller compacted concrete by nuclear methods.*

Norme ASTM D6938-08a, *Standard test methods for in place density and water content of soil and soil-aggregate by nuclear methods.*

Norme ASTM D2950-09, *Standard test methods for in place density of bituminous concrete in place by nuclear methods.*

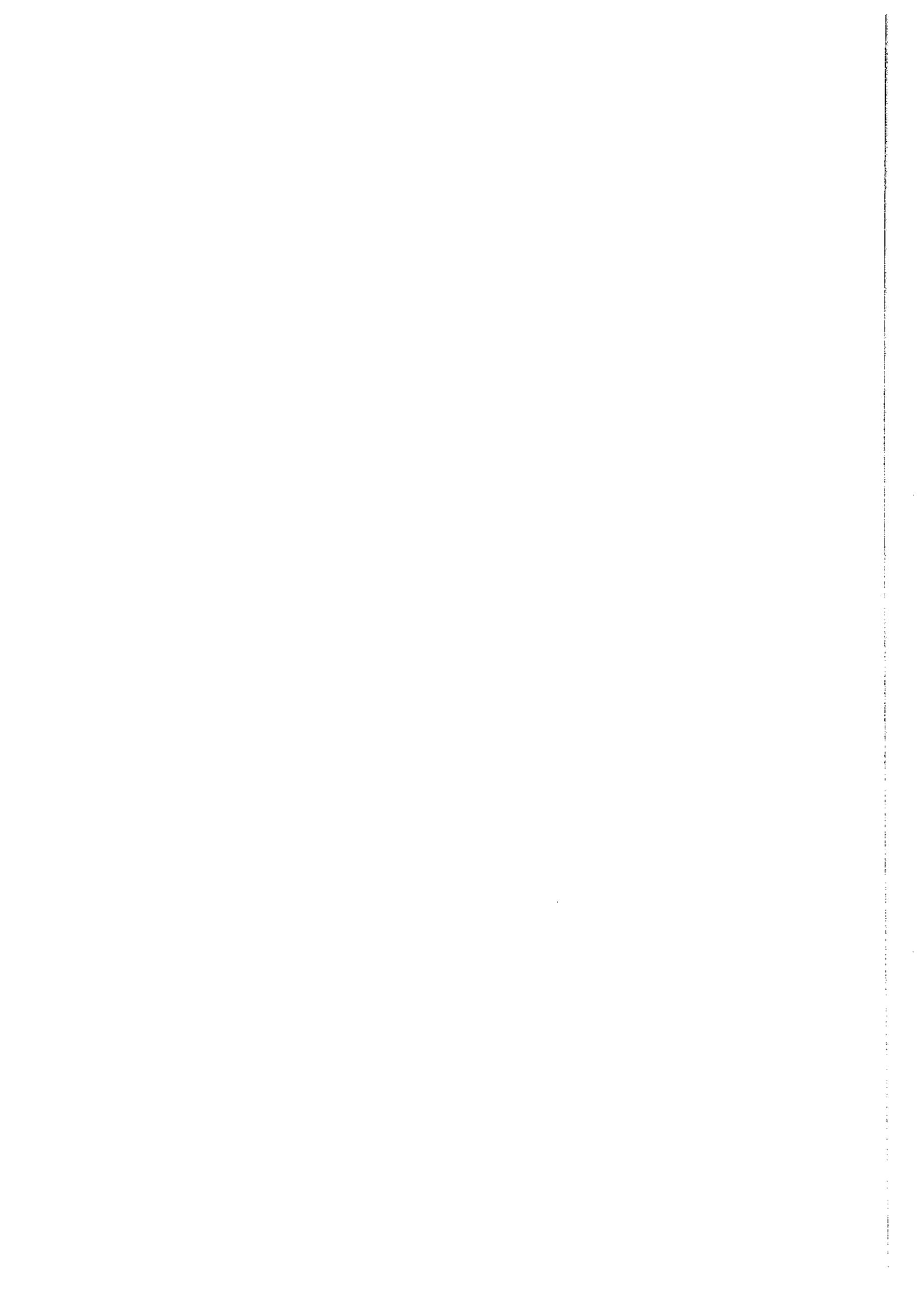
Mode d'emploi de l'appareil

Arslan A. et AL., "The performance and radiation exposure of some neutron probes in measuring the water content of the topsoil layer", *Aust. Soil Res.*, 35, 1997, pp. 1397-1407.

Grisoni J.-C., Mino T., Thorin R., Unvois J.-P., « Les diagraphies nucléaires développées par les LPC – Applications aux études de sites et au suivi d'ouvrages difficiles », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 168, 1990, pp. 5-13.

Agence internationale de l'énergie atomique, « *Field soil-water properties measured through radiation techniques* », Technical Reports Series, n° 312, IAEA, Vienna, 1984.

Ménard J., Cariou J., « *Diagraphies de densité et de teneur en eau – Sondes nucléaires de premières générations* », rapport de recherche LPC, n° 82, 1978, 45 pages.





L'étanchéité est un paramètre clé de la durabilité des ouvrages. Elle constitue, en effet, une barrière s'opposant à la pénétration de l'eau plus ou moins chargée en divers éléments agressifs pour la structure.

Sur les ouvrages en service, elle est prise en sandwich entre le tablier et la couche de roulement et l'évaluation de son état et de son efficacité en est d'autant plus complexe.

L'établissement du projet de réfection et sa réalisation est rendu délicat par la nécessaire prise en compte de nombreuses contraintes (exploitation, raccordement à l'existant, qualité du support, etc.).

Ce guide donne des recommandations pour la conduite du diagnostic des chapes d'étanchéité en service en s'appuyant sur des outils d'investigations spécifiques (dont certains font appel à des techniques de contrôle non-destructif). Il propose une démarche structurée pour définir des solutions de réfection adaptées et les moyens de suivi et de contrôle correspondant.

Ce guide traite des ouvrages en service dont l'étanchéité est mise en œuvre sur un support en béton mais aussi sur un renformis ou une couche de reprofilage en béton ou en micro-béton bitumineux.

The waterproofing system is a key parameter of the durability of bridges. A waterproofing layer constitutes a barrier to provide penetration in the structure of water with the aggressive elements that this latter can contain.

As the waterproofing layer is placed between the bridge deck and the wearing course, the evaluation of its integrity and efficiency remains complex for existing structures.

The establishment of the rehabilitation project and its implementation are difficult because of the need to consider numerous parameters : traffic management, relation to the existing structure; quality of support, etc...

This guide gives recommendations to conduct an evaluation of a waterproofing system based on specific investigations (some of which rely on non-destructive evaluation techniques). It proposes a methodical approach to identify appropriate rehabilitation solutions and the corresponding means of monitoring and control.

This guide covers the structures in which the waterproofing system is implemented on a concrete support but also on a concrete re-shaping surface or a re-profiling layer made of concrete or micro bituminous concrete.



9 782720 825910

ISSN 1151-1516

ISBN 978-2-7208-2591-0

Réf : TMCHAPOA
Prix : 90 Euros HT



Système de
management de la qualité
certifié sous le n° 9915173
pour les sites
de Paris et de Nantes