

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
Marion GAONACH

MESURE IN-SITU DE LA TENEUR EN EAU AVEC SONDES DANS LES
MATÉRIAUX RECYCLÉS TRAITÉS À FROID AVEC UNE ÉMULSION DE BITUME

MONTRÉAL, LE 19 MARS 2012

©Tous droits réservés, Marion Gaonach, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel Perraton, directeur de mémoire
Département génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Alan Carter, codirecteur de mémoire
Département génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Olard, président du jury
Département génie de la construction à l'École de technologie supérieure et société Eiffage
Travaux Publics

M. Cédric Sauzéat, membre du jury
École Nationale des Travaux Publics de l'État

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 FÉVRIER 2012

À L'ÉCOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ÉTAT

REMERCIEMENTS

Je souhaite adresser ici mes plus vifs remerciements à mon directeur de recherche, M. Daniel Perraton, Ing., D.S.C.A., sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Je le remercie pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien, tant technique que moral, tout au long de ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à mon codirecteur de recherche M. Alan Carter, Ing., Ph.D. pour la qualité de son enseignement et ses encouragements.

Je remercie chaleureusement mes collègues et amis du LCMB pour la bonne humeur et l'entente qui a régné toute cette année. En particulier, j'adresse ma gratitude à Thomas Diffiné, Sébastien Lamothe et Francis Bilodeau pour leurs soutiens et leurs aides dans la réalisation de mes essais.

Je n'oublie pas mes nombreux amis québécois du canoë de béton qui m'ont fait partager leur culture et ont rendu mon séjour inoubliable.

Enfin, je remercie mes parents et mes frères pour leur soutien sans faille.

MESURE IN-SITU DE LA TENEUR EN EAU AVEC SONDES DANS LES MATÉRIAUX RECYCLÉS TRAITÉS À FROID AVEC UNE ÉMULSION DE BITUME

Marion GAONACH

RÉSUMÉ

Le degré de performance des enrobés recyclés et traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume est fortement tributaire de l'évolution de la teneur en eau au sein de leur microstructure. La mesure in-situ de la teneur en eau à l'aide de sondes d'humidité est donc une étape primordiale dans le développement d'une méthode de formulation plus cohérente pour ce type de matériaux.

À travers la revue de la littérature, ce mémoire revient sur les propriétés des matériaux recyclés traités à froid avec une émulsion et sur le rôle de l'eau dans l'évolution de leur résistance mécanique. Les principales technologies utilisées pour la mesure in-situ de la teneur en eau sont présentées par la suite.

La stratégie expérimentale choisie dans le cadre de ce projet s'articule autour de la réalisation d'une planche d'essai et du développement d'un programme d'essais en laboratoire. Afin d'exploiter au mieux les mesures réalisées in-situ, trois facteurs susceptibles d'influencer la réponse des sondes d'humidité (la période) sont étudiés : la teneur en eau, la température et la porosité.

Ainsi il apparaît qu'une augmentation de la teneur en eau entraîne une hausse de la période mesurée par la sonde, une tendance qui s'accroît avec la température. Par ailleurs la période peut être décrite comme une fonction linéaire de la température ou de la porosité au sein du matériau étudié.

L'analyse des résultats permet la mise au point d'un modèle d'étalonnage des sondes propre au matériau étudié. Appliqué aux mesures réalisées dans la planche d'essai, ce modèle rend finalement possible la mesure de la teneur en eau in-situ dans un matériau recyclé traité à froid à l'aide d'une émulsion de bitume.

Mots clés : enrobé recyclé, émulsion de bitume, teneur en eau, température, porosité.

MESURE IN-SITU DE LA TENEUR EN EAU AVEC SONDES DANS LES MATÉRIAUX RECYCLÉS TRAITÉS À FROID AVEC UNE ÉMULSION DE BITUME

Marion GAONACH

ABSTRACT

Structural performance of cold recycled asphalt pavement depends on the changes in water content inside the asphalt's microstructure. So the real-time monitoring of moisture in a pavement is an important step to improve the mix design of cold recycled asphalt.

Through literature, this paper deals with the properties of cold recycled asphalt pavement and the role of water in their structural resistance. Then, some devices used to measure soil water contents are introduced.

The experimental strategy developed for this project is based on the linking of in-situ measurements and laboratory experiments. To exploit the collected data, three factors that could influence the probe response (period) are carefully studied : the water content, the temperature and the porosity.

The experiments bring out that the period measured increases with the water content. A rise which is more significant when the temperature is high. Moreover, the period can be describe as a linear function of the temperature or the porosity.

From the analysis of these results, a calibration model for the probes has been developed. Finally, the application of this model to the data collected in-situ allows a correct measurements of the water content in a cold recycled asphalt.

Keywords : recycled asphalt, water content, temperature, porosity.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	29
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
1.1 La chaussée bitumineuse.....	5
1.1.1 La structure de la chaussée	5
1.1.2 L'enrobé bitumineux.....	7
1.1.2.1 Introduction	7
1.1.2.2 Le squelette granulaire	7
1.1.2.3 Le liant.....	8
1.1.2.4 La rhéologie des enrobés bitumineux.....	10
1.2 Les matériaux recyclés.....	11
1.2.1 Introduction.....	11
1.2.2 Classification des matériaux recyclés, des MR.....	11
1.3 Les enrobés recyclés	15
1.3.1 Introduction.....	15
1.3.2 Composition et nomenclature des enrobés recyclés	15
1.4 Les enrobés recyclés à froid.....	17
1.4.1 Introduction.....	17
1.4.2 Recyclage en place à froid	18
1.4.2.1 Introduction	18
1.4.2.2 Classification des techniques.....	18
1.4.3 En centrale	21
1.4.4 Les liants hydrocarbonés.....	22
1.4.4.1 Introduction	22
1.4.4.2 La mousse de bitume	22
1.4.4.3 L'émulsion de bitume.....	23
1.4.5 La cure	29
1.4.6 Les applications	29
1.4.7 Limites d'application	30
1.4.8 L'eau : un facteur déterminant.....	31
1.4.8.1 Le rôle de l'eau dans la formulation de l'enrobé recyclé.....	31
1.4.8.2 Le processus d'évacuation de l'eau.....	31
1.5 La mesure in-situ de la teneur en eau dans un sol.....	32
1.5.1 Introduction.....	32
1.5.2 Notions relatives à l'utilisation des sondes WCR.....	33
1.5.2.1 Introduction	33
1.5.2.2 Champ électromagnétique.....	33
1.5.2.3 Onde électromagnétique.....	34
1.5.2.4 Permittivité.....	34
1.5.3 Les débuts de la technologie TDR	36
1.5.3.1 Introduction	36

1.5.3.2	Développement des sondes à tiges métalliques.....	37
1.5.3.3	Le principe TDR.....	38
1.5.3.4	Relation entre la teneur en eau volumique et la permittivité relative apparente.....	38
1.5.3.5	Les évolutions.....	40
1.5.4	La technologie WCR (Water Content Reflectometry).....	43
1.5.4.1	Introduction	43
1.5.4.2	Étalonnage	46
CHAPITRE 2 APPROCHE GLOBALE DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL		49
2.1	Phase I : Réalisation d'une planche d'essai	51
2.2	Phase II : Programme d'essais en laboratoire	52
2.2.1	Introduction.....	52
2.2.1.1	Étude des facteurs influençant la réponse des sondes à l'aide d'éprouvettes instrumentées	53
2.2.2	Étude de l'effet de la température et la porosité sur la réponse des sondes WCR	54
2.2.2.1	Effet de la température	54
2.2.2.2	Effet de la porosité	56
2.3	Phase III : Exploitation des mesures in-situ	58
2.3.1	Introduction.....	58
2.3.2	Analyse de l'évolution de la teneur en eau	58
2.3.3	Validation des résultats	58
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....		59
3.1	Réalisation d'une planche d'essai	59
3.1.1	Notion de zone de confinement	61
3.1.2	Mesure de la température à proximité des sondes	62
3.1.3	Étapes de mise en place des sondes	62
3.2	Reconstitution du matériau de confinement en laboratoire.....	69
3.2.1	Caractérisation du MR5 utilisé pour la confection du MR5-TFE-B.....	70
3.2.1.1	Échantillonnage et préparation du MR5.....	70
3.2.1.2	Caractérisation du MR5.....	72
3.2.2	Étude du matériau MR5-TFE-B.....	73
3.2.2.1	Échantillonnage in-situ.....	73
3.2.2.2	Mesure de la teneur en bitume et granularité du MR5-TFE-B (avant et après extraction)	73
3.2.3	Formulation du matériau de confinement en laboratoire	76
3.2.3.1	Introduction	76
3.3	Réalisation d'éprouvettes instrumentées pour évaluer l'influence de la température et de la porosité	79
CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS		81
4.1	Résultats sur l'étude de la sensibilité des sondes à la présence d'eau	81
4.1.1	Longueurs effectives (L_{ef}) et temps de délais (t_d) des sondes WCR.....	81
4.1.2	Mesure de la période dans l'air et dans l'eau.....	82

4.1.3	Détection de l'eau liée	85
4.2	Présentation des résultats traitant de l'effet de la température et de la porosité sur la réponse d'une sonde WCR.....	88
4.2.1	Avant-propos.....	88
4.2.2	Résultats de l'étude sur l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR	91
4.2.2.1	Contrôle de la stabilité de la température mesurée à chaque palier	92
4.2.2.2	Temps de réponse de la sonde WCR à un changement de température.....	97
4.2.2.3	Influence de la température sur la période mesurée	99
4.2.3	Effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR	103
	CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS	107
5.1	Influence conjuguée de la teneur en eau et de la température sur la réponse des sondes WCR.....	108
5.2	Modèle d'étalonnage.....	111
5.2.1	Introduction.....	111
5.2.2	Évolution des constantes a et b en fonction de la teneur en eau	111
5.2.3	Définition d'un modèle d'étalonnage	113
5.2.4	Validation du modèle en laboratoire.....	115
5.2.4.1	Introduction	115
5.2.4.2	Modèle d'étalonnage du manufacturier.....	115
5.2.4.3	Les limites du modèle.....	118
5.2.4.4	Conclusion pour le modèle.....	122
5.3	Analyse des données collectées in-situ	123
5.3.1	Application du modèle aux mesures réalisées in-situ	123
5.3.1.1	Introduction	123
5.3.1.2	Les premières semaines d'instrumentation	126
5.3.1.3	Les premières semaines d'instrumentation	126
5.3.1.4	Le début de la période hivernale	128
5.3.1.5	Après 10 mois d'acquisition.....	129
5.3.2	Extrapolation des données in-situ	131
5.3.3	Conclusion sur l'application du modèle d'étalonnage aux mesures in-situ	134
5.4	Analyse du facteur porosité.....	135
5.4.1	Correction du facteur porosité	138
5.4.2	Validation du modèle corrigé.....	144
	CONCLUSION.....	149
ANNEXE I	PROCÉDURE POUR LA RÉALISATION D'UNE ÉPROUVETTE INSTRUMENTÉE	153
ANNEXE II	SCELLAGE D'UNE ÉPROUVETTE INSTRUMENTÉE	157

ANNEXE III	FORMULATION DU MATÉRIAU DE CONFINEMENT EN LABORATOIRE	159
ANNEXE IV	LONGUEURS EFFECTIVES ET TEMPS DE DÉLAIS.....	163
ANNEXE V	ÉTALONNAGE DES THERMOCOUPLES.....	167
ANNEXE VI	CARACTÉRISATION DES ÉPROUVETTES.....	173
ANNEXE VII	BILAN DES CYCLES DE VARIATION DE LA TEMPÉRATURE	179
ANNEXE VIII	EXPLOITATION DES MESURES RÉALISÉES DANS LA PLANCHE D'ESSAI.....	183
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	187

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Exigences particulières pour les matériaux recyclés Tiré de la norme NQ 2560-600	13
Tableau 1.2	Exemples d'utilisation des matériaux recyclés au Québec Tiré de la norme NQ 2560-600	14
Tableau 1.3	Classification française des retraitements à froid Reproduit et adapté de Brosseau (Retraitement en place des chaussées, 2007)	19
Tableau 1.4	Classification des options de retraitement en place à froid au Québec Tiré de Perraton (Cours Science et technologie des matériaux, ETS, 2011)	20
Tableau 1.5	Caractéristiques des trois types de retraitement en place à froid au Québec Reproduit et adapté de Blais (Intervention de retraitement en place à froid, 2007)	21
Tableau 1.6	Teneur en bitume de l'émulsion et utilisation Tiré de ISTED (1989)	24
Tableau 1.7	Volume effectif de mesure des sondes TDR Tiré de O'Connor et Dowding (1999)	41
Tableau 1.8	Caractéristiques des différentes sondes TDR utilisées dans la mesure de la teneur en eau Tiré de O'connor et Dowding (1999)	42
Tableau 2.1	Détails des différentes phases composant le programme expérimental de ce projet de recherche.....	50
Tableau 3.1	Distribution des différentes classes granulométriques du MR5 utilisé pour la confection du matériau MR5-TFE-B mis en œuvre avenue des Érables.....	71
Tableau 3.2	Résultats des mesures de densité d'absorption sur le MR5	72
Tableau 3.3	Résultats des essais d'extraction de bitume sur le MR5	73
Tableau 3.4	Résultats des essais d'extraction de bitume sur le mélange MR5-TFE-B échantillonné in-situ.....	74
Tableau 3.5	Résultats des analyses granulométriques, réalisées avant et après extraction du bitume, sur le matériau MR5-TFE-B échantillonné in-situ	75

Tableau 3.6	Résultats des mesures de teneurs en eau réalisées sur les matériaux MR5-TFE-B échantillonné in-situ	76
Tableau 3.7	Résultats des analyses granulométriques de la phase minérale réalisées sur le MR5 et le MR5-TFE-B tamisé après extraction du bitume	79
Tableau 3.8	Liste des essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche en fonction du paramètre étudié	80
Tableau 4.1	Périodes mesurées dans l'air à 23,0°C	83
Tableau 4.2	Périodes mesurées dans l'eau distillée à 22,8°C	84
Tableau 4.3	Périodes mesurées à température ambiante dans la fraction 0/5 du MR5 séché à 50°C et à 100°C	86
Tableau 4.4	Périodes mesurées dans le Ray-car sec (2,5/5), le quartz (0,63/1,25) sec et le MR5 sec (0/5) (T=23,0°C, porosités similaires)	88
Tableau 4.5	Teneur en eau en cours d'essais au sein de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 ; $d_s=1,625$	92
Tableau 4.6	Points paliers définis pour les essais de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 ($w=14,3%$; $\theta=23,2%$)	100
Tableau 4.7	Points palier définis pour les cinq essais réalisés dans le cadre de l'étude sur l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR ...	101
Tableau 4.8	Points palier définis pour les trois éprouvettes réalisées dans le cadre de l'étude sur l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR.....	104
Tableau 5.1	Équation des courbes de tendance établis à partir des essais sur l'étude de l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR (porosité de l'éprouvette $n=33,9%$)	109
Tableau 5.2	Périodes calculées à partir des droites de régression de la Figure 4.10 pour les cinq essais réalisés à partir de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9.....	110
Tableau 5.3	Valeurs des coefficients définissant a et b pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 ($d_s=1,625$)	113
Tableau 5.4	Équation des courbes de tendance établis à partir des essais sur l'étude de l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR.....	137
Tableau 5.5	Périodes calculées pour trois éprouvettes étudiées	138

Tableau 5.6	Périodes corrigées à $T=22,8^{\circ}\text{C}$, de manière à ce soustraire aux écarts de la teneur en eau volumique dans les éprouvettes testées : valeurs correspondantes à une teneur en eau volumique fictive de 23,2%139
Tableau 5.7	Résultats de l'application du modèle pour une correction de l'effet de la porosité.....144

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Illustration de la structure d'une chaussée bitumineuse Reproduit et adapté de SETRA-LCPC (1997).....6
Figure 1.2	Classes de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation $ \epsilon $ et de la température T Tiré de Olard (2003)9
Figure 1.3	Comportements "types" des enrobés bitumineux à températures fixées, (ϵ) déformation - (N) nombre de chargements Tiré de Di Benedetto et De La Roche (1998).....11
Figure 1.4	Classification québécoise des matériaux recyclés Reproduit et adapté de Marquis <i>et al.</i> (1998).....12
Figure 1.5	Composition d'enrobé recyclé de type MR5 traité à l'aide d'une émulsion de bitume à sa mise en place (sans vide).....16
Figure 1.6	Composition d'enrobé recyclé de type MR5 traité à l'aide d'une émulsion de bitume après mûrissement (sans vide).....17
Figure 1.7	Schématisation d'un tensioactif Reproduit et adapté de Young <i>et al.</i> (1998, p. 72).....25
Figure 1.8	Orientation des tensioactifs dans le cas d'une émulsion huile dans l'eau Reproduit et adapté de Young <i>et al.</i> (1998, p. 72).....26
Figure 1.9	Les différentes familles de tensioactifs Tiré de Young <i>et al.</i> (1998, p. 72).....27
Figure 1.10	Schématisation de la polarisation d'orientation des dipôles.....35
Figure 1.11	Système de mesure de la constante diélectrique d'un matériau entre deux tiges métalliques parallèles Reproduit et adapté de Herkelrath <i>et al.</i> (1991).....37
Figure 1.12	Sonde WCR de type CS616 développée par Campbell Scientific, Inc. Tiré de Campbell Scientific, Inc. (2006)44
Figure 2.1	Schéma des différentes couches de la structure de la chaussée instrumentée (coupe transversale).....51
Figure 2.2	Schématisation du positionnement des sondes dans une éprouvette instrumentée (coupe transversale).....54

Figure 3.1	Localisation de la planche d'essai avenue des Érables à Montréal (QC) Tiré de GoogleMap	59
Figure 3.2	Schéma du positionnement des sondes WCR et des thermocouples dans la chaussée bitumineuse instrumentée dans le cadre de la planche d'essai avenue des Érables (coupe transversale)	60
Figure 3.3	a) Tamisage du matériau MR5-TFE en chantier; b) Fraction 0/5 du matériau MR5-TFE tamisé	63
Figure 3.4	Délimitation de la zone d'instrumentation dans la couche fraîchement compactée	64
Figure 3.5	Excavation d'une surface d'environ 1m ² jusqu'à la profondeur prédéfinie pour le positionnement de la sonde d'humidité	64
Figure 3.6	Protection du matériau excavé à l'aide d'un polythène	64
Figure 3.7	Réalisation de la zone de confinement dans la couche fraîchement mise en place	65
Figure 3.10	Recouvrement de la sonde avec le matériau de confinement (fraction 0/5 de MR5-TFE)	67
Figure 3.11	Compactage de la zone de confinement après mise en place de la sonde d'humidité.....	67
Figure 3.12	Positionnement du thermocouple à proximité de la tête de la sonde	68
Figure 3.13	Séparation du MR5 en quatre classes granulométriques en vue d'une reconstitution.....	70
Figure 4.1	Schéma du positionnement des thermocouples dans l'éprouvette (coupe transversale)	89
Figure 4.2	Évolution des températures T1,T2 et T3 lors des 100 premières minutes d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3	90
Figure 4.3	Évolution des températures T1,T2 et T3 entre la 1500 ^{ème} et la 1600 ^{ème} minutes d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-2,3	90
Figure 4.4	Évolution de la température de consigne de l'enceinte et de celle des thermocouples (T2 et T3), en cours d'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3.....	93
Figure 4.5	Zoom sur l'évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 en cours d'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3	95

Figure 4.6	Zoom sur l'évolution des températures T2 et T3 au sein de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 pour $T_{\text{consigne}}=45^{\circ}\text{C}$	96
Figure 4.7	Évolution de la période mesurée par la sonde WCR et de la température des thermocouples T2 et T3 au cours d'un cycle de variation de la température de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3	97
Figure 4.8	Zoom sur l'évolution de la période mesurée par la sonde WCR et les températures T2 et T3 entre la 1000 ^{ème} et la 1200 ^{ème} minute d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3	98
Figure 4.9	Variation de la période mesurée en fonction de la température moyenne au sein du corps d'épreuve pour le cycle de température de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3	100
Figure 5.1	Variation de la période calculée en fonction de la teneur en eau massique sur l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 à partir des droites de régression de la Figure 4.10	110
Figure 5.2	Variations de la pente a et de l'ordonnée à l'origine b des droites décrivant la relation entre la période et la température, en fonction de la teneur en eau volumique ($d_s=1,625$).....	112
Figure 5.3	Application de l'équation d'étalonnage du manufacturier et de celle établie à partir de notre protocole aux données relatives à l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 ($d_s=1,625$; $\theta=23,2\%$)	116
Figure 5.4	Évolution de la teneur en eau volumique calculée en fonction du temps après application de notre modèle d'étalonnage aux mesures de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3	118
Figure 5.5	Calcul des teneurs en eau volumiques à partir du modèle quadratique de l'éprouvette MR5-TFE-33,9	119
Figure 5.6	Zoom sur les calculs des teneurs en eau volumiques à partir du modèle quadratique.....	120
Figure 5.7	Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 29 août 2011	125
Figure 5.8	Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 30 octobre 2010	126

Figure 5.9	Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 29 novembre 2010 et le 30 décembre 2010	129
Figure 5.10	Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 août 2011 et le 28 août 2011	131
Figure 5.11	Évolution de la teneur en eau massique à deux niveaux instrumentés de la couche de MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 29 août 2011	133
Figure 5.13	Variation de la période corrigée en fonction de la porosité du milieu (T=22,8 °C)	140
Figure 5.14	Variation de la période relative en fonction de la porosité du milieu (T=22,8 °C)	141
Figure 5.15	Variation de la période en fonction de la température par rapport à l'éprouvette de référence MR5-TFE-B-33,9-14,3	142

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

%c	Pourcentage de ciment
c_0	Vitesse de la lumière dans le vide
D_{br-EC}	Dosage de bitume résiduel de l'émulsion ciblée
d_{mb}	Densité du mélange brute
d_{mm}	Densité maximale du mélange
%E	Pourcentage d'émulsion d'ajout
ERF	Enrobés recyclés à froid
f	Fréquence de l'onde électromagnétique
F_{br-E}	Fraction de bitume résiduel dans l'émulsion
GA	Granulat d'apport
GAE	Granulat d'agrégats d'enrobé
GAB	Granulat d'agrégat de béton
GER	Granulat d'enrobé recyclé
GNM	Grosseur Nominale Maximale
HLB	Balance hydrophile/lipophile
K_a	Constante diélectrique apparente ou permittivité du milieu
L_{ef}	Longueur effective des tiges métalliques équipant une sonde WCR CS616
LA	Liant d'apport
LAE	Liant d'agrégats d'enrobé
LER	Liant d'enrobé recyclé
LH	Liant hydraulique

XXIV

M_c	Masse de ciment
$M_{\text{eau.ag}}$	Masse d'eau dans l'agrégat
$M_{\text{eau.E}}$	Masse d'eau dans l'émulsion
$M_{\text{eau.ajout}}$	Masse d'eau d'ajout
$M_{H.ag}$	Masse humide de d'agrégats
$M_{HT.ag}$	Masse humide totale de l'échantillon
MLPC	Matériel Laboratoire des Ponts et Chaussées
MR	Matériaux recyclés
MR5-TFE	Enrobé recyclé de type MR5 traité à froid à l'aide d'une émulsion de bitume
$M_{S.ag}$	Masse sèche d'agrégats
$M_{ST.ag}$	Masse sèche totale de l'échantillon
M_{TE}	Masse d'émulsion totale
$M_{T.eau}$	Masse d'eau totale nécessaire
MTQ	Ministère des Transports du Québec
Ω	Résistance électrique (Ohm)
t	Le temps
TDR	Time Domain Reflectometry
TFE	Traité à froid avec une émulsion de bitume
θ	Teneur en eau volumique
μ	Perméabilité magnétique d'un milieu
v	Vitesse de propagation d'une onde
V_v	Volume de vide
V_T	Volume total

ω	Teneur en eau massique
$\% \omega_{ag}$	Teneur en eau de l'agrégat
ω_{cible}	Teneur en eau optimale de compaction
WCR	Water Conter Reflectometry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m mètre
cm centimètre
mm millimètre
 μm micromètre

Aire

m^2 mètre carré
 cm^2 centimètre carré
 mm^2 millimètre carré

Volume

m^3 mètre cube
 cm^3 centimètre cube
 mm^3 millimètre cube

UNITÉS DE MASSE

Masse

kg kilogramme
g gramme
mg milligramme

UNITÉS DE TEMPS

h heure
min minute
s seconde
 μs microseconde

Fréquence

MHz mégahertz
Hz hertz

Capacité électrique

F farad

UNITÉS CALORIFIQUES

$^{\circ}\text{C}$ degré Celsius

INTRODUCTION

Ces dernières années ont vu apparaître une prise de conscience collective quant aux effets à long terme du réchauffement climatique. Témoins et acteurs des négligences passées, les gouvernements et industriels ont finalement décidé d'agir ensemble, en faveur d'un développement plus durable dès 1992 lors du sommet de Rio. Ainsi, le protocole de Kyoto, proposé en 1997, fut le premier traité international visant une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Aujourd'hui ratifié par 141 pays, les mesures proposées par ce protocole n'ont cependant pas été jugées nécessaires par deux des plus gros producteurs de pétrole brut au monde, les Etats-Unis et le Canada. Néanmoins, malgré l'opposition du gouvernement canadien à suivre les objectifs proposés par ce protocole, en 2002 la province de Québec s'est engagée à respecter ses exigences.

L'industrie routière, qui a souvent été pointée du doigt par les associations écologiques, s'investit depuis près de 20 ans dans la recherche et l'innovation pour répondre aux contraintes environnementales de notre société. Préserver les ressources naturelles non renouvelables, réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie tout en cherchant à optimiser les performances, tels sont les objectifs développés par les centres de recherche et les laboratoires universitaires.

Directement inscrit dans cette politique de développement durable, le projet de recherche présenté dans ce mémoire s'intéresse aux enrobés recyclés à froid (ERF) et traités à l'aide d'une émulsion de bitume. Les ERF permettent, entre autres, le recyclage de matériaux bitumineux par la réutilisation d'agrégats d'enrobé issus du décohéssionnement d'une chaussée usée, le fraisât. Pouvant être composés à 100% d'agrégats d'enrobé, ils permettent ainsi de réduire considérablement la consommation de matières premières et donc, les coûts financiers et énergétiques liés à leur extraction et à leur transport.

Par ailleurs, la production des ERF étant réalisée à température ambiante et non à 160°C-180°C comme les enrobés à chaud traditionnels, ils constituent ainsi une alternative moins énergivore et plus écologique grâce à une réduction de 10% des émissions de gaz à effet de serre lors de leur fabrication (Navaro, 2011).

Principalement utilisés lors de la construction ou de la réhabilitation de couches de base pour chaussées souples à faible trafic, les enrobés à froid traités avec une émulsion de bitume peuvent être réalisés in-situ (en place) ou en centrale. Pour les ERF traités en place, l'agrégat utilisé est issu du décohesionnement d'une partie de la chaussée existante, alors que pour ceux traités en centrale, les agrégats peuvent être constitués selon différentes proportions de fraisât d'enrobé, de béton de ciment concassé et de granulats vierges. Dans les deux cas, un facteur va jouer un rôle essentiel dans la qualité du mélange, l'eau. Déjà présente dans l'émulsion de bitume, l'eau est également ajoutée au mélange lors du malaxage comme agent d'enrobage. En effet, l'eau permet de réduire l'énergie nécessaire à un bon enrobage du squelette granulaire par le bitume et limite la ségrégation de l'émulsion sur une fraction granulaire aux dépens d'une autre. Aidant également à la bonne maniabilité du matériau, l'eau d'ajout est donc indispensable à la réalisation d'ERF traités à l'émulsion de bitume. Cependant, d'après Jean-Pierre Serfass, ancien directeur technique et développement chez SCREG (entreprise du groupe COLAS), une particularité de ces matériaux bitumineux est d'être considérés comme des matériaux évolutifs qui voient leurs caractéristiques mécaniques augmenter sous l'effet du mûrissement du liant et de la consolidation sous trafic. La présence d'eau dans le mélange, et plus précisément, sa capacité à être évacuée va donc être un critère essentiel à l'obtention d'une montée en cohésion optimale et rapide.

En outre, bien qu'en pratique les ERF aient fait leurs preuves en terme de performances et de durabilité, il n'existe, à ce jour, aucune norme au Québec encadrant la formulation de tels matériaux (Croteau et Lee 1997). En effet, seule une méthode d'essai (LC26-002) est proposée par le Ministère des Transport du Québec . L'adaptation de certains critères et outils, tels que la presse à cisaillement giratoire, étant toujours à l'étude, il est donc difficile

de créer des corrélations entre le chantier et les essais en laboratoire. Par conséquent, le développement de ces matériaux reste limité du fait de grandes incertitudes.

Dans le but de développer une méthode de formulation adaptée aux matériaux recyclés et traités à froid, il apparaît donc primordial de suivre et d'analyser l'évolution de la teneur en eau mesurée in-situ afin de faciliter la reproductibilité en laboratoire. C'est là le but de ce projet de recherche qui par l'instrumentation de deux couches de matériaux bitumineux traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume a permis de mettre en lumière les variations de la teneur en eau et de la température au sein de ce type de matériau ; deux paramètres qui interviennent directement dans le calcul de l'état de contraintes-déformations dans la structure de la chaussée.

Le travail exposé dans ce mémoire est lié au projet Recherche et Développement Coopérative (RDC), initié par le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG), qui est rendu possible grâce à la collaboration de six partenaires industriels québécois : Bitume Québec, DJL, Inspecsol, McAsphalt, Sintra et Talon Sebeq. En effet, dans le cadre des activités de la RDC, une première planche d'essai instrumentée a été réalisée à l'automne 2010 avec comme l'un des principaux objectifs visés le suivi de l'évolution de la teneur en eau et de la température dans deux couches de matériaux recyclés (MR5) et traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume. Trois sondes CS616 de type WCR (*Water Content Reflectometer*) ainsi que trois thermocouples ont ainsi été positionnés à différentes profondeurs dans la structure de la chaussée. Ces sondes permettent de mesurer en continu la période d'une onde électromagnétique carrée, dont la vitesse dépend de la permittivité diélectrique du matériau. La période enregistrée (en microseconde) est par la suite transformée à l'aide d'une équation empirique en teneur en eau volumique. Les principaux axes de ce projet, outre la phase d'instrumentation, ont donc été d'exploiter les mesures réalisées par des sondes d'humidité par une reproduction du matériau en laboratoire et de développer un protocole d'étalonnage pour les sondes. Une démarche qui est détaillée dans ce mémoire.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre vise à présenter une revue de la documentation liée à ce projet de recherche. Ainsi, la première partie revient sur la structure d'une chaussée ainsi que sur la composition et la rhéologie de l'enrobé dans son ensemble. Les différents procédés de fabrication des matériaux recyclés et traités à froid ainsi que leurs applications sont ensuite mis en lumière. Puis, un sous-chapitre s'intéresse au rôle de l'eau dans la conception puis dans l'évolution des caractéristiques de ce type de matériau. Finalement, il est question des différentes technologies utilisées dans la mesure de la teneur en eau d'un sol, en particulier la technologie de *Time Domain Reflectometry* (TDR).

1.1 La chaussée bitumineuse

1.1.1 La structure de la chaussée

Il est courant de définir une chaussée comme l'empilement de couches granulaires et/ou bitumineuses de différentes épaisseurs. De par sa composition, chaque couche possède alors une fonction propre qui peut contribuer à la capacité structurelle de la chaussée ou au confort des usagers. On distingue les chaussées bitumineuses, au sein desquelles les couches liées sont traitées aux liants hydrocarbonés bien que les couches de fondation et/ou de base (*Voir* Figure 1.1) peuvent être constituées de graves traitées ou non traitées, et les chaussées rigides, constituées d'un revêtement en béton de ciment (Proteau, 2005). Dans le cadre de ce mémoire, seules des chaussées bitumineuses sont étudiées.

Généralement composée de 3 à 4 couches, la structure de chaussée repose sur le sol support surplombé d'une couche de forme granulaire qui aide à la répartition des charges. La sous-fondation et la fondation (respectivement identifiées comme la fondation et la base en France) constituent le corps de la chaussée (l'assise en France) (*Voir* Figure 1.1). Cette partie

de la structure participe à la résistance mécanique de la chaussée et, dans le cas de matériaux traités, travaille principalement en traction sous l'effet des charges verticales induites par le trafic. Enfin, les couches de surface sont composées d'une couche de liaison qui protège le corps de la chaussée et d'une couche de roulement qui assure la sécurité et le confort des usagers.

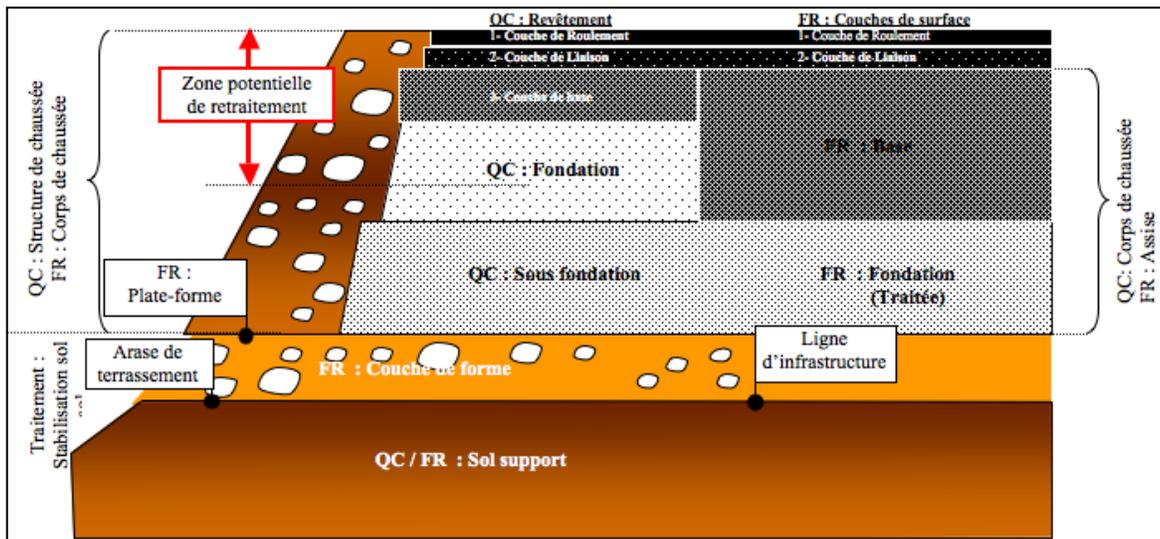


Figure 1.1 Illustration de la structure d'une chaussée bitumineuse
Reproduit et adapté de SETRA-LCPC (1997)

Conçues pour durer 20 à 30 ans avec un bon entretien, les chaussées bitumineuses sont conçues en fonction des caractéristiques mécaniques visées à long terme, notamment sous l'effet du trafic. Les attentes envers une couche de roulement et une couche de base seront logiquement différentes et par conséquent la composition, et les propriétés de l'enrobé choisi vont varier selon les besoins.

1.1.2 L'enrobé bitumineux

1.1.2.1 Introduction

Langlois *et al.* (2001) définissent un enrobé bitumineux comme « un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume » où les granulats composent 95% (% massique) du mélange et le liant bitumineux seulement 5%. Di Benedetto et Corté (2004) précisent également que « selon leur fonction et leur localisation dans la structure de la chaussée, différentes compositions d'enrobés bitumineux peuvent être utilisées ». Néanmoins, ce sont toujours le squelette granulaire et le liant qui détermineront leurs caractéristiques mécaniques et fonctionnelles (Di Benedetto et Corté, 2004). En particulier, on qualifie le comportement mécanique du squelette granularité comme élasto-plastique en tout temps alors que celui du bitume évolue sous l'effet de la température et de la fréquence de sollicitation. Ainsi, il est courant de définir un enrobé bitumineux comme étant un matériau thermosensible et viscoélastique, puisque son comportement mécanique dépend à la fois de la température et de la fréquence de sollicitation.

1.1.2.2 Le squelette granulaire

Le squelette granulaire de l'enrobé est défini par la nature, la taille et la forme des particules qui le composent. Ces trois facteurs ont un impact direct sur la capacité du squelette à distribuer les charges imposées à l'enrobé. Il est notamment essentiel d'ajuster la granulométrie du mélange (continue ou discontinue, ouverte ou dense) en fonction des caractéristiques physiques et mécaniques recherchées.

Le filler, qui représente la portion granulaire passant le tamis de 80 μ m, permet de combler en partie les vides du squelette sans toutefois augmenter de manière significative sa capacité portante car la majorité du filler va se mélanger au liant bitumineux pour former un mastic, aussi appelé mortier bitumineux (Harris et Stuart, 1995). Le filler, en comblant les vides interstitiels, va augmenter la compactibilité de l'enrobé et améliorer la cohésion du mortier bitumineux (Tremblay, 2001).

1.1.2.3 Le liant

Le bitume et ses dérivés (bitumes modifiées, émulsion ou mousse bitumineuse) forment la famille des liants hydrocarbonés. Issu de la chimie du pétrole, le bitume est un « produit complexe composé de différents hydrocarbures de poids moléculaire élevé », il est principalement composé d'une phase soluble dans l'heptane, les maltènes, et d'une phase insoluble constituée par les asphaltènes (Di Benedetto et Corté, 2004). Ce sont les concentrations des différentes phases qui vont alors influencer sur les propriétés rhéologiques du bitume.

Le bitume est avant tout un matériau thermosensible dont les caractéristiques gouvernent directement le comportement mécanique de l'enrobé à hautes et basses températures. En effet, si en dessous du point de congélation il se comporte comme un solide vitreux élastique et fragile, à haute température (>80°C) en revanche, le bitume devient un fluide newtonien peu visqueux. Entre les deux, il passe par les domaines viscoélastiques linéaires et non linéaires (*Voir* Figure 1.2) (Di Benedetto et Corté, 2004). On parle également de la « susceptibilité cinétique » du bitume, c'est à dire sa capacité à réagir aux variations de fréquences de sollicitation.

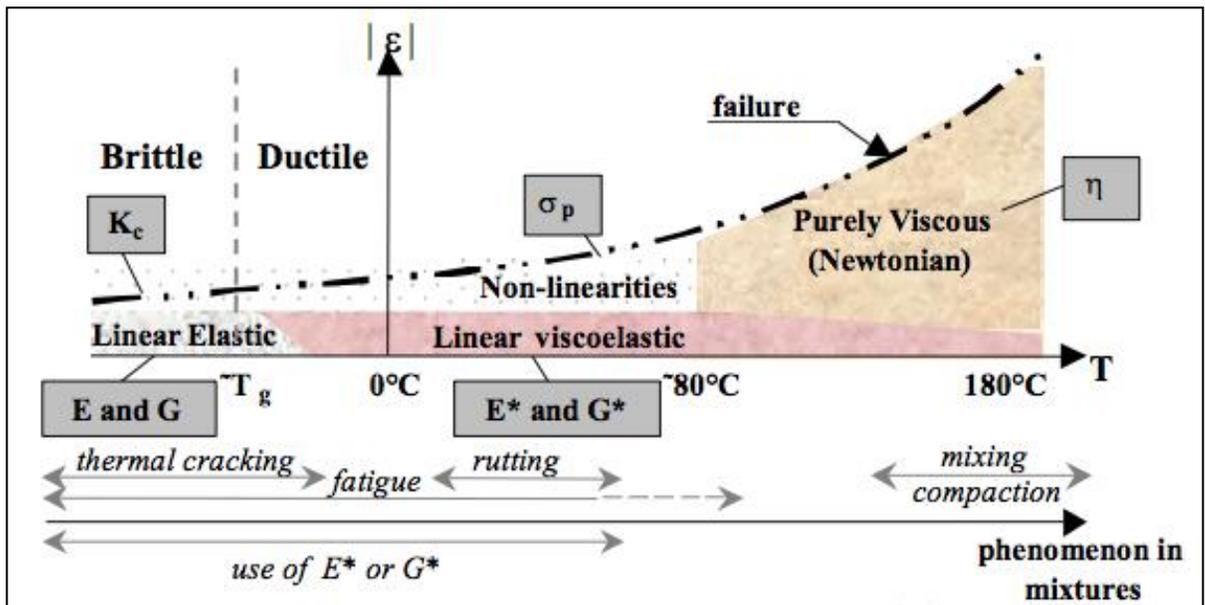


Figure 1.2 Classes de comportement des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation $|\epsilon|$ et de la température T
Tiré de Olard (2003)

En France, la classification des bitumes destinés à l'industrie routière se fait en fonction de leur pénétrabilité (NF EN 1426) et de l'essai de température bille-anneau (NF EN 1427). L'essai de pénétrabilité est réalisé à 25°C et mesure au dixième de millimètre la profondeur de pénétration d'une aiguille surplombée d'un poids de 100g dans le bitume et maintenue en surface pendant 5 secondes. Un bitume classé 20/30 (pénétrabilité entre 20 et 30 dixièmes de millimètre) est donc plus dur que celui classé 35/50 (pénétrabilité entre 35 et 50 dixièmes de millimètre). L'essai de température bille-anneau permet quant à lui de déterminer la température à laquelle s'enfonce une bille d'acier à travers le bitume remplissant le cercle intérieur d'un anneau de laiton placé dans un bain à température contrôlée. Un bitume 55-63 dont le point de ramollissement est entre 55°C et 63°C (représentatif d'un bitume de pénétrabilité 20/30) est donc plus dur qu'un bitume 50-58 dont le point de ramollissement est entre 50°C et 58°C (représentatif d'un bitume de pénétrabilité 35/50).

Au Québec, un bitume est évalué en fonction de son grade de performance. On définit alors la plage de température correspondant à un bon rendement du bitume. Par exemple, un bitume classé PG 58-28 n'est pas considéré sensible à l'orniérage pour toutes les températures en service de l'enrobé en dessous de 58°C et devient sujet à la fissuration thermique en dessous de -28°C. Un enrobé constitué d'un bitume de classe PG 64-28 offre donc une meilleure résistance à l'orniérage qu'un autre enrobé constitué d'un bitume de PG 58-28 mais n'apportera aucune protection supplémentaire à basse température.

Il est possible de modifier la rhéologie d'un bitume par l'ajout de polymères pour en améliorer ses caractéristiques. L'ajout de polymères permet par exemple d'élargir la plage de performance du PG. Dans la construction routière, il est fréquent d'utiliser des bitumes de type élastomères qui sont modifiés par l'ajout de 10% à 15 % de SBS (styrène-butadiène-styrène) (Di Benedetto et Corté, 2004).

1.1.2.4 La rhéologie des enrobés bitumineux

La rhéologie de l'enrobé est fortement tributaire de celle du liant. L'enrobé est donc un matériau thermo-rhéologiquement sensible. Pour traduire ce phénomène, il est courant de réaliser des essais homogènes sur l'enrobé où varient la contrainte de déformation et le nombre de cycles de sollicitation. Ces essais sont dits homogènes car l'état de contrainte et de déformation est le même en tout point de l'éprouvette testée (Di Benedetto et Corté, 2004). En traçant alors la représentation graphique de la déformation en fonction du nombre de cycles de sollicitation pour une température fixée (*Voir Figure 1.3*), il est possible d'observer quatre comportements distincts. Un comportement non-linéaire tout d'abord, correspondant à de grandes déformations et très peu de cycles de chargement. Puis, pour de faibles déformations on distingue un comportement viscoélastique linéaire qui, lorsque le nombre de cycles atteint plusieurs dizaines de milliers, donne lieu au phénomène de fatigue du matériau bitumineux. Enfin, le dernier comportement, qui précède la rupture du matériau, se traduit par des déformations permanentes (ornières à l'échelle de la route).

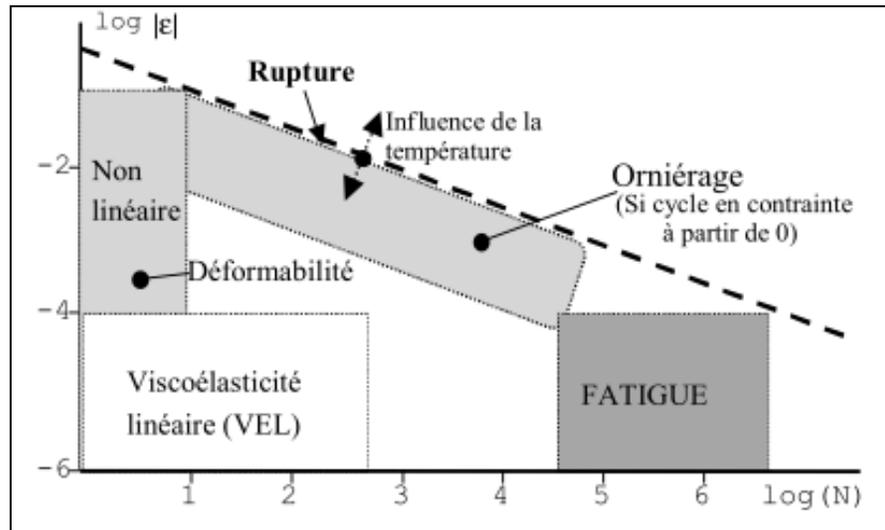


Figure 1.3 Comportements "types" des enrobés bitumineux à températures fixées, (ϵ) déformation - (N) nombre de chargements
Tiré de Di Benedetto et De La Roche (1998)

1.2 Les matériaux recyclés

1.2.1 Introduction

Un fraisât d'enrobé ou de béton est un matériau lié décohésionné, foisonné puis récupéré par un processus de fraisage fournissant des morceaux (granulats) de tailles variées (LCPC-SETRA, 2007). Ces matériaux recyclés, également appelés agrégat d'enrobé (AE) ou agrégat de béton (AB), sont utilisés depuis une trentaine d'années dans la fabrication d'enrobés ou comme source granulaire dans des applications de génie civil.

1.2.2 Classification des matériaux recyclés, des MR

Procédés largement plébiscités au Québec par le ministère des Transports (MTQ) et encadrés par la méthode d'essai LC26-002, les matériaux sont classés en fonction de la nature et de la proportion des agrégats constituant leurs squelettes granulaires (Voir Tableau 1.1). La Figure

1.4 propose une représentation schématique de cette classification québécoise des MR, qui va du MR-1 au MR-7.

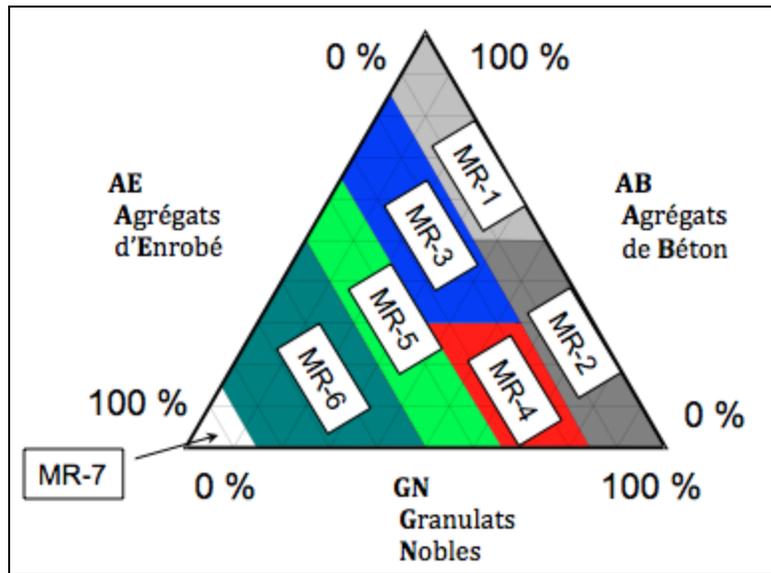


Figure 1.4 Classification québécoise des matériaux recyclés
Reproduit et adapté de Marquis *et al.* (1998)

Notons également que les matériaux recyclés de type MR-5 et MR-7 sont les plus courants au Québec et que dans le cadre de ce projet de recherche, les deux enrobés recyclés TFE (Traités à Froid à l'aide d'une Émulsion) étudiés sont des MR5.

Tableau 1.1 Exigences particulières pour les matériaux recyclés
Tiré de la norme NQ 2560-600

Catégorie de matériau recyclé	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
Constituants (%)	(pourcentage en masse des constituants)						
Résidus de béton (AB)	≤ 50	> 50	≤ 30	> 30	< 65	< 50	< 15
Résidus d'enrobés (AE)	≤ 15	≤ 15	> 15 et ≤ 35	> 15 et ≤ 35	> 35 et ≤ 50	> 50 et ≤ 85	> 85
Granulats naturels (GA)	≥ 35	< 50	> 35 et < 85	< 55	< 65	< 50	< 15
Utilisation	Remblai, transition, couche anticontaminante, couche filtrante, coussin et enrobement de conduite, fondation, sous-fondation, couche de roulement granulaire et accotement*					Remblai et accotement*	
* Les utilisations identifiées sont données à titre informatif.							

Le choix du type de matériau recyclé se fait en fonction de l'utilisation visée. Ainsi, le Tableau 1.2 expose différents exemples d'applications.

Tableau 1.2 Exemples d'utilisation des matériaux recyclés au Québec
Tiré de la norme NQ 2560-600

UTILISATION	CATÉGORIES DE MATÉRIAUX RECYCLÉS						
	MR-1	MR-2	MR-3	MR-4	MR-5	MR-6	MR-7
Couches de roulement granulaire (routes non revêtues)	*	*	*	*	*	4	4
Fondation	*	*	2	2	2	4	4
Sous-fondation et transition	*	*	*	*	*	4	4
Coussin, enrobement de conduite et couche anticontaminante	*	*	*	*	*	4	4
Couche filtrante autour d'une conduite perforée	4	4	4	4	4	4	4
Accotement	*	*	*	*	*	1	1
Remblai	*	*	*	*	*	3	3
LÉGENDE							
*	Recommandé dans toutes les circonstances						
1	Recommandé dans les endroits où le risque d'érosion est élevé (aux points bas du profil, dans les pentes, à l'intérieur des courbes et à proximité des ponceaux)						
2	Recommandé sous réserve d'une vérification de l'épaisseur du revêtement bitumineux prévu dans le projet. Peut impliquer une augmentation de l'épaisseur des couches d'enrobé bitumineux.						
3	Peu recommandé pour des épaisseurs de plus d'un mètre (densifié pour des couches ne dépassant pas 300mm)						
4	Non recommandé						

1.3 Les enrobés recyclés

1.3.1 Introduction

Constituant une alternative plus économique aux techniques traditionnelles d'enrobés à chaud, les enrobés recyclés sont constitués de matériaux recyclés et peuvent être produits à chaud, à une température proche de 160°C-180°C, ou à température ambiante. Dans ce dernier cas, on parle alors d'enrobé recyclé à froid (Navaro, 2011).

Les enrobés recyclés peuvent être réalisés en place, par décohesionnement de la chaussée existante, ou en centrale. Les performances recherchées, la nature des matériaux utilisés, le matériel à disposition et bien sûr les contraintes financières, sont alors autant de facteurs qui seront pris en compte dans le choix de l'une ou l'autre des techniques.

1.3.2 Composition et nomenclature des enrobés recyclés

Le squelette granulaire d'un enrobé recyclé est composé de différentes proportions et de différentes sources de granulats. En effet, on peut choisir d'y incorporer de l'agrégat d'enrobé (AE) issu du décohesionnement d'une chaussée, des granulats d'agrégat de béton de ciment (GAB) ou des granulats nobles aussi appelés granulats d'apport (GA). La présence d'un agrégat d'enrobé implique également la prise en compte du liant hydrocarboné comme faisant partie intégrante des agrégats lors de la formulation du mélange. On parle alors du liant d'agrégat d'enrobé (LAE) auquel il faudra ajouter un liant d'apport (LA) pour obtenir la teneur en liant d'enrobé recyclé (LER) visée. Les caractéristiques du liant d'apport devront par ailleurs être ajustées afin de réduire la rigidité du liant d'agrégat d'enrobé et ainsi, aider à l'obtention d'un enrobé recyclé dont les propriétés seraient semblables à celles d'un enrobé neuf. Par ailleurs, la détermination du pourcentage de bitume encore présent dans l'agrégat d'enrobé est possible par extraction du liant à l'aide d'un solvant : le trichloréthylène (LC26-100). Le liant contenu dans l'agrégat est dissout par le solvant et il est alors possible de séparer les granulats d'agrégat d'enrobé (GAE) de la phase contenant le solvant et les résidus de bitume. L'évaporation du solvant permet finalement de récupérer le liant hydrocarboné

(LAE) pour en déterminer ses propriétés rhéologiques (Navaro, 2011). Enfin, le liant d'apport (LA) peut être de plusieurs natures. Outre la température de malaxage, c'est donc ce facteur qui constitue la principale différence entre les différentes techniques de recyclage. Ainsi, pour les enrobés recyclés à froid, le liant d'apport sera sous la forme d'une émulsion ou d'une mousse bitumineuse. En particulier, dans cette étude, nous traiterons d'un enrobé recyclé de type MR5 et traité à froid à l'aide d'une émulsion de bitume (TFE).

Les Figures 1.5 et 1.6 représentent la composition schématique, en volumes absolus, d'un enrobé recyclé de type MR5, respectivement, à sa mise en place et après mûrissement. La notion de volume absolu implique que le seul volume de matière est pris en compte, les pores à l'intérieur des grains étant exclus. Le volume de vide n'est donc pas représenté ici. Précisons également que les proportions présentées sur les Figures 1.5 et 1.6 ne sont en aucun cas représentatives du matériau étudié dans ce mémoire.

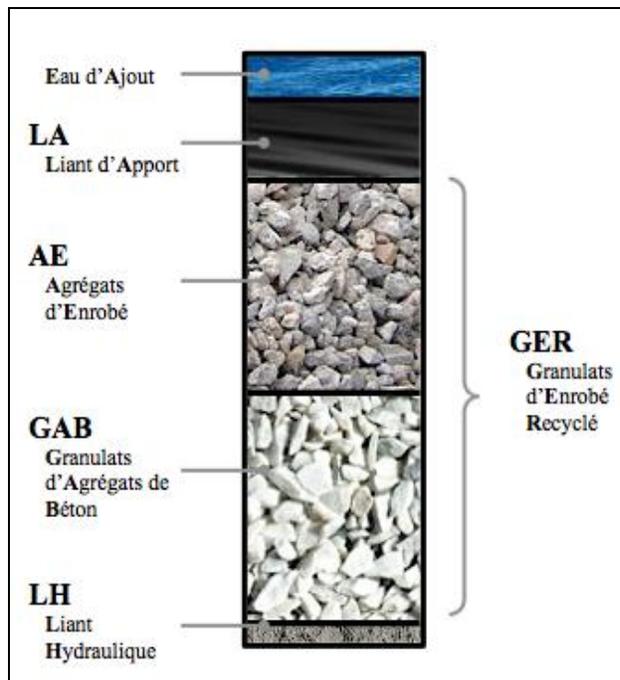


Figure 1.5 Composition d'enrobé recyclé de type MR5 traité à l'aide d'une émulsion de bitume à sa mise en place (sans vide)

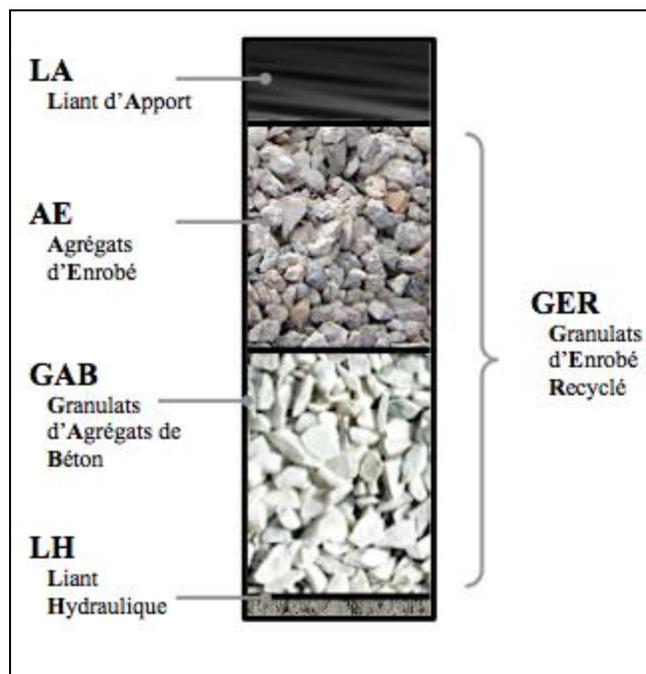


Figure 1.6 Composition d'enrobé recyclé de type MR5 traité à l'aide d'une émulsion de bitume après mûrissement (sans vide)

1.4 Les enrobés recyclés à froid

1.4.1 Introduction

Les enrobés recyclés à froid, ou ERF, sont de plus en plus développés au Québec comme en France. Présentés comme une solution plus durable par l'industrie routière, les ERF permettent, entre autres, le recyclage de matériaux bitumineux par la réutilisation d'agrégats d'enrobé issus du décohésionnement d'une chaussée usée, le fraisât. Par ailleurs, la production des ERF étant réalisée à température ambiante, ils constituent ainsi une alternative moins énergivore et plus écologique grâce à une réduction de 10% des émissions de gaz à effet de serre lors de leur fabrication (Navaro, 2011). Principalement utilisés lors de la construction ou de la réhabilitation de bases pour chaussées souples à faible trafic, les enrobés à froid traités être réalisés in-situ, souvent désigné en place, ou en centrale.

1.4.2 Recyclage en place à froid

1.4.2.1 Introduction

Les enrobés recyclés en place à froid sont principalement utilisés comme technique de réhabilitation – ou de retraitement - des chaussées. Ce procédé consiste à réutiliser des matériaux d'une chaussée usée, dégradée, en les traitant en place à froid avec une émulsion ou une mousse de bitume. Une couche de roulement adaptée au trafic est ensuite appliquée (Brosseaud, 2007). Outre la réutilisation de matériaux, cette technique possède un atout économique majeur puisqu'une seule machine permet de réaliser le décohéssionnement de la chaussée, l'ajout de liants, le malaxage et la mise en place du nouvel enrobé : un train de recyclage. Selon l'épaisseur retraitée, cette technique peut permettre un renforcement structurel, cela devient alors très utile si l'ancienne chaussée n'était pas adaptée à l'évolution du trafic, tout en améliorant les caractéristiques de surface, en contrant la remontée de fissures.

1.4.2.2 Classification des techniques

Afin de clarifier les appellations françaises et québécoises, cette sous-section propose un rapide rappel des différentes notations relatives aux différentes techniques de recyclage en place à froid. Ainsi, le Tableau 1.3 regroupe les classes de retraitement en place à froid réalisées en France et les Tableaux 1.4 et 1.5 représentent quant à eux, les trois types de retraitement en place à froid utilisés au Québec.

Tableau 1.3 Classification française des retraitements à froid
Reproduit et adapté de Brosseaud (Retraitement en place des chaussées, 2007)

Classe de retraitement	Liant	Objectifs	Matériau à retraiter	Épaisseur retraitement	Dosage du liant
Liant bitumineux					
I	ÉMULSION DE BITUME	Renforcement structurel	Ancienne assise + enduits	10 à 15cm	3 à 5% (bitume résiduel)
II		Réhabilitation des couches de surface	$\geq \frac{3}{4}$ noir	5 à 12 cm	1 à 3% (bitume résiduel)
III			100% noir	5 à 12cm	Jusqu'à 2% (bitume résiduel)
Liant hydraulique					
IV	CIMENT	Renforcement structurel	Tout ou partie ancienne de la chaussée	20 à 30cm	3 à 6%
Liant composé					
V	MIXTE	Renforcement structurel ou réhabilitation des couches de surface	Ancienne assise ou couches de surface	10 à 30cm	3 à 7% (bitume et ciment)

Tableau 1.4 Classification des options de retraitement en place à froid au Québec
Tiré de Perraton (Cours Science et technologie des matériaux, ETS, 2011)

TYPE DE RETRAITEMENT	OPÉRATIONS
<p>I</p>	<p>INTERVENTION UNIQUE</p> <p>Opération qui consiste à rétablir les profils de surface et à fragmenter en une seule opération l'enrobé bitumineux en place auquel on introduit un liant hydrocarboné ou un liant composé qui gagne en cohésion après curage. Le matériau retraits est épanché mécaniquement au moyen d'un finisseur intégré selon l'alignement et la pente spécifiés et la compacité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Fraisage/Reprofilage, 2- Malaxage/Injection, 3- Répandage/Mise en forme et 4- Compactage
<p>II</p>	<p>INTERVENTION DOUBLE</p> <p>Opération qui consiste à fragmenter l'enrobé bitumineux en place et de malaxer simultanément une partie de la fondation granulaire sous jacente. Le matériau obtenu est mis en forme et compacté. Lorsque requis l'ajout de granulats de correction est prévu à cette étape.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Décohesionnement, 2- Déblai en urbain, 3- Mise en forme et 4- Compactage <p>Opération qui permet d'introduire un liant hydrocarboné ou composé au matériau fragmenté qui gagne en cohésion après curage. Le matériau retraits est nivelé mécaniquement au moyen d'une niveleuse selon l'alignement, la pente et le bombement spécifiés. La compacité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Malaxage/Injection, 2- Mise en forme et 3- Compactage
<p>III</p>	<p>INTERVENTION TRIPLE</p> <p>Opération qui consiste à rétablir les profils de surface, à fragmenter et d'enlever en tout ou en partie la couche d'enrobé bitumineux existante.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Fraisage/Reprofilage <p>Opération qui consiste à fragmenter l'enrobé bitumineux en place et de malaxer simultanément une partie de la fondation granulaire sous jacente. Le matériau obtenu est nivelé et compacté.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Décohesionnement, 2- Déblai en urbain, 3- Mise en forme et 4- Compactage <p>Opération qui permet d'introduire un liant hydrocarboné ou composé au matériau fragmenté qui gagne en cohésion après curage. Le matériau retraits est nivelé mécaniquement au moyen d'une niveleuse selon l'alignement, la pente et le bombement spécifiés. La compacité est obtenue par des rouleaux compacteurs.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Séquence : 1- Malaxage/Injection, 2- Mise en forme et 3- Compactage

Tableau 1.5 Caractéristiques des trois types de retraitement
en place à froid au Québec
Reproduit et adapté de Blais (Intervention
de retraitement en place à froid, 2007)

TYPE	Épaisseur	Dosage du liant hydrocarbonné ou mixte (ciment et bitume)
I	5 à 15cm	0,8% à 1,4% (bitume résiduel ajouté) <i>Le dosage dépend de la teneur en LAE</i> 0% à 0,5% (ciment)
II	5 à 20cm	1,8% à 3,5% (bitume résiduel ajouté) <i>Le dosage dépend de la teneur en LAE</i> 0,8% à 1,5% (ciment)
III	5 à 30cm	1,4% à 2,2% (bitume résiduel ajouté) <i>Le dosage dépend de la teneur en LAE</i> 0,8% à 1,5% (ciment)

1.4.3 En centrale

Les enrobés retraités à froid peuvent être également produits en centrale. C'est le cas des matériaux étudiés dans ce projet de recherche. Ce procédé permet, entre autres, un meilleur contrôle de la granularité et des proportions d'agrégats qui peuvent être de natures variées. En effet, le squelette granulaire peut être composé jusqu'à 100% de matériaux recyclés issus du décohesionnement d'une chaussée ou du concassage de béton de ciment mais une correction de la granulométrie est également possible par l'ajout d'un granulat vierge.

Le mélange en centrale se fait à froid par ajout d'une émulsion de bitume et il est courant d'introduire également une faible quantité de liant hydraulique afin de réduire le temps de

cure et pour augmenter la résistance mécanique de l'enrobé recyclé à court terme. Une partie de l'eau sert alors au processus d'hydratation du liant hydraulique.

Un des avantages de la formulation en centrale est de pouvoir utiliser les enrobés à froid pour de la réhabilitation comme pour de la construction neuve de chaussées bitumineuses. Principalement utilisés pour les couches de base ou de fondation supérieure dans le corps de chaussée, ce type de matériaux nécessite généralement la pose d'une ou plusieurs couches d'enrobé à chaud en guise de revêtement.

À l'instar des matériaux recyclés en place à froid en place, ceux fabriqués en centrale peuvent être utilisés comme technique de réhabilitation de chaussée pour apporter un renfort structurel et limiter la remontée des fissures.

1.4.4 Les liants hydrocarbonés

1.4.4.1 Introduction

Le type de liant hydrocarboné utilisé dans la fabrication d'un enrobé recyclé à froid va définir les méthodes de production et de mise en place du matériau retraité. On distingue deux types de liant hydrocarboné: la mousse de bitume et l'émulsion de bitume. Dotés de caractéristiques physicochimiques différentes, ces deux liants jouent un rôle premier dans la performance du matériau. En outre soulignons que, dans le cadre de ce projet, le matériau recyclé étudié est traité à l'aide d'une émulsion de bitume.

1.4.4.2 La mousse de bitume

La mousse de bitume est réalisée dans une chambre d'expansion où un jet de bitume très chaud (170°C-180°C) entre en contact avec un jet d'eau froide (Lacombe, 2008). Présente en faible quantité (1% à 2%), l'eau s'évapore instantanément au contact du bitume et la mousse se forme. La qualité de la mousse de bitume est avant tout déterminée par le taux d'expansion de la mousse (jusqu'à 20 fois le volume initial) et sa demi-vie qui représente le

temps nécessaire pour que le volume du bitume moussé diminue de moitié (entre 30 et 60 secondes) (Gauvain, 2006). Plus l'expansion et la demi-vie sont élevées, meilleure est la mousse de bitume (Wirtgen, 2009). Pour optimiser la qualité de la mousse, des additifs peuvent être utilisés en guise d'agents moussants ou stabilisants. Par ailleurs, afin d'assurer un bon enrobage des granulats lors de la fabrication d'un ERF à l'aide d'un bitume moussé, ces derniers sont souvent mélangés, au préalable, à de la chaux hydratée afin d'augmenter leur insensibilité à l'eau. Enfin, c'est la faible viscosité du bitume mis sous forme de mousse qui facilite l'enrobage des granulats sans que ceux-ci n'aient été chauffés au préalable (Gauvain, 2009). L'enrobé est donc produit à « froid ».

Contrairement aux matériaux recyclés traités à l'émulsion de bitume, les ERF utilisant du bitume moussé en guise de liant contiennent peu d'eau à leur mise en place et le temps nécessaire à la cure du matériau en est donc considérablement réduit (moins de trois jours). Un avantage non négligeable lorsque la chaussée doit être rapidement rouverte au trafic (Heiztman, 2001). En outre, leur faible teneur en eau rend ces matériaux moins sensibles aux conditions climatiques lors de la mise en place du matériau et rallonge, par conséquent, la saison des chantiers routiers dans les régions au climat difficile (Heiztman, 2001).

Enfin, bien qu'ils soient le plus souvent utilisés pour la réparation de chaussées, les enrobés recyclés à froid et traités avec de la mousse de bitume ont également fait leur preuve en guise de couche de fondation traitée (Exemple : la « grave mousse » chez Eurovia) dans la construction de chaussées neuves (Gauvain, 2009).

1.4.4.3 L'émulsion de bitume

Composition

Une émulsion de bitume est constituée de fines gouttelettes de bitume dispersées dans une phase aqueuse. Puisque le bitume et l'eau sont deux fluides non-miscibles, un agent émulsifiant, appelé tensioactif, est utilisé afin de stabiliser le mélange en jouant le rôle de liant entre l'eau et les gouttelettes de bitume, tout comme la lécithine contenue dans le jaune

d'œuf permet à la mayonnaise de former un mélange homogène. Constituant 55% à 70% du mélange, les gouttelettes de bitume mesurent conventionnellement 0,1 μ m de diamètre, en dessous, on parle de microémulsion (Le Bec, 2005). La teneur en bitume de l'émulsion est, par ailleurs, directement liée à l'utilisation visée comme le récapitule le Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Teneur en bitume de l'émulsion et utilisation
Tiré de ISTED (1989)

Teneur en bitume de l'émulsion	Utilisation
55%	Réparations, imprégnations, couches d'accrochage.
60%	Réparations, imprégnations, fabrication d'enrobés ou de grave-émulsion, enrobés coulés à froid et coulis bitumineux, répandages pour enduits superficiels.
65%	Réparations, fabrication d'enrobés ou de grave-émulsion, répandages pour enduits superficiels.
69% et plus	Répandages pour enduits superficiels.

Le rôle du tensioactif

Par définition, une émulsion est constituée de deux phases non miscibles qui entraînent, dans le cas présent, la création d'une interface entre l'eau et le bitume ; c'est là qu'intervient le tensioactif. Molécule aux propriétés amphiphiles, un tensioactif comprend deux parties distinctes : une tête polaire ionisable est dite hydrophile (miscible dans l'eau) et une queue apolaire (moment dipolaire nul) qui est dite hydrophobe ou lipophile (non miscible dans l'eau). Plus précisément, la tête hydrophile est constituée d'hétéroatomes (atomes différents du carbone ou de l'hydrogène et non métalliques) et la queue hydrophobe est formée d'une longue chaîne hydrocarbonée (Le Bec, 2005) comme le représente la Figure 1.7.

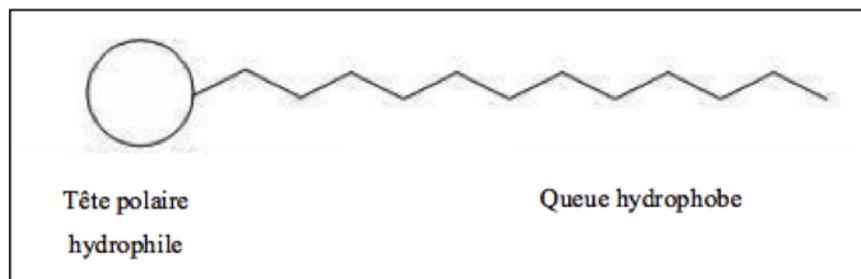


Figure 1.7 Schématisation d'un tensioactif
Reproduit et adapté de Young *et al.* (1998, p. 72)

La queue hydrophobe du tensioactif présente « une grande affinité pour le bitume » ce qui permet au tensioactif de « se piquer dans les globules de bitume » (Voir Figure 1.8). La partie polaire va quant à elle « émerger dans l'eau et créer en s'ionisant des charges électriques à la surface des particules de bitume. » Les charges électriques ancrées aux gouttelettes de bitume étant de même signe, des forces de répulsion électrostatique sont créées et vont empêcher l'agglomération des particules de bitumes après avoir été scindées par malaxage. Il y a réduction des tensions de surfaces à l'interface bitume/eau (ISTED, 1989). Pour déterminer l'état d'équilibre entre la partie hydrophile et lipophile (hydrophobe), Griffin a mis au point en 1949 une échelle notée *balance hydrophile/lipophile* (HLB) liée à la solubilité du tensioactif dans l'eau. Cette échelle qui varie de 0 à 40 nous informe sur le sens de l'émulsion. Pour une valeur HLB comprise entre 1 et 6, on considère que le tensioactif est plutôt hydrophobe, on parle alors d'émulsion inverse (eau dans l'huile). Au dessus de 10, le tensioactif est clairement hydrophile et donne des émulsions directes (huile dans l'eau).

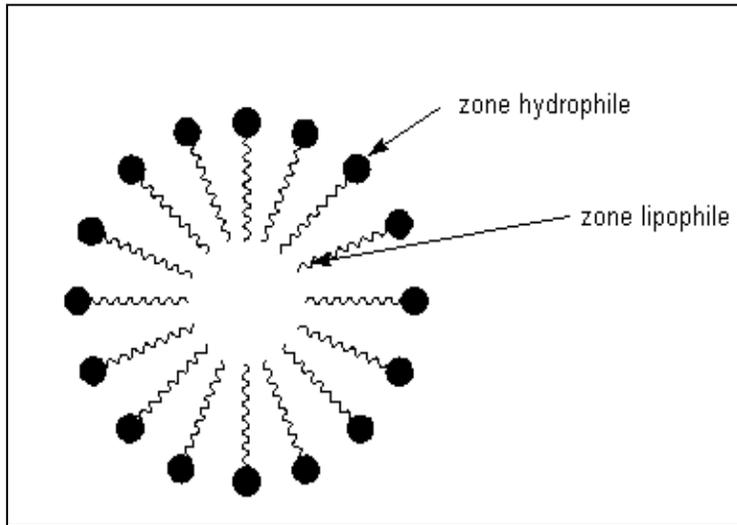


Figure 1.8 Orientation des tensioactifs dans le cas d'une émulsion huile dans l'eau
Reproduit et adapté de Young *et al.* (1998, p. 72)

Les différents tensioactifs

Dans un tensioactif, la tête de la molécule est ionisable et devient fortement polaire au contact de l'eau. On distingue alors 4 familles de tensioactifs (*Voir* Figure 1.9) :

- les tensioactifs anioniques qui libèrent une charge négative (anion) en solution aqueuse. Ils sont connus pour avoir une balance hydrophile/lipophile élevée car leur tendance hydrophile est plus marquée (Graciaa *et al.*, 1982). Ainsi, ils orientent l'émulsion dans le sens huile dans l'eau. C'est le cas des savons par exemple, mais aussi de toutes les molécules qui en cas d'ionisation au contact de l'eau forment des acides gras ($R-COOH$) ou des sulfonâtes ($H_2SO_4^-$) obtenus à partir de molécules de soufre oxydées (SO_3);
- les tensioactifs cationiques libèrent une charge positive (cation) en solution aqueuse. Ce sont les plus utilisés. Ils forment des amines gras ($N(CH_3)_3$) et de l'acide chlorhydrique (HCl) en présence d'eau;
- les tensioactifs non-ioniques qui possèdent une partie hydrophile non ionisable dans l'eau. La solubilisation de ces tensioactifs est due à la formation de liaisons hydrogènes

- entre les molécules d'eau et certaines fonctions de la partie hydrophile. Ils sont généralement compatibles avec les autres tensioactifs;
- les tensioactifs amphotères qui contiennent des charges positives et négatives centrales et équilibrées, et peuvent par conséquent se comporter comme des tensioactifs anioniques ou cationiques. Ils s'adaptent au milieu dans lequel ils se trouvent en fonction du pH. Ils deviennent donc anioniques en milieux basique, cationiques en milieux acides et sont équivalents à des tensioactifs non ioniques à pH neutre.

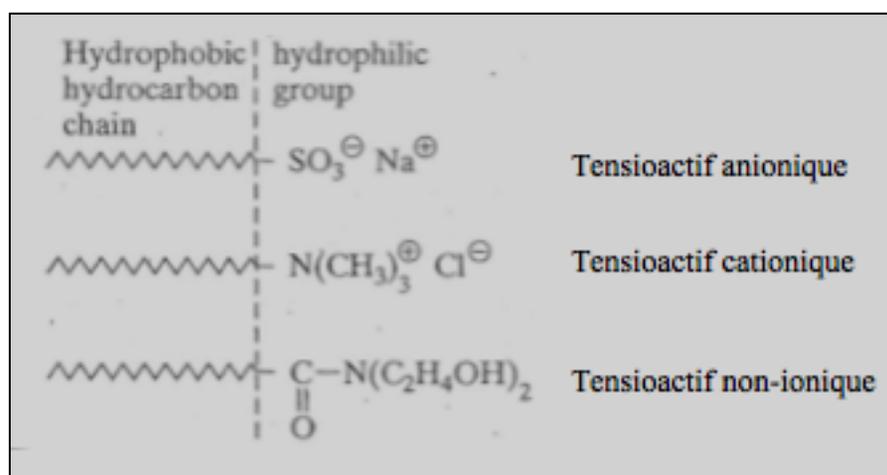


Figure 1.9 Les différentes familles de tensioactifs
Tiré de Young *et al.* (1998, p. 72)

Le tensioactif permet donc de minimiser les tensions à l'interface bitume/eau en jouant le rôle d'agent émulsifiant entre les deux phases. En outre, c'est le pH de l'eau qui nous informe sur le taux d'ionisation. De ce fait, la mesure d'un pH acide sera liée à une émulsion cationique tandis qu'un pH basique caractérisera une émulsion anionique (Le Bec, 2005). Les émulsions cationiques modifiées aux polymères du type CSS-IP représentent la grande majorité des émulsions de bitume utilisées en France et au Québec dans la construction routière. Ce type d'émulsion facilite notamment l'enrobage des granulats et n'est pas affectée par la présence de particules fines dans le mélange.

La rupture de l'émulsion

Une émulsion de bitume est un matériau évolutif qui va tendre à se déstabiliser lors de son stockage ou après avoir été mélangée aux granulats. Ainsi, il est possible de décrire l'évolution d'une émulsion selon plusieurs étapes (Le Bec, 2005) :

- la sédimentation qui apparaît lors du stockage. En premier lieu, l'effet de pesanteur va provoquer la sédimentation plus ou moins rapide des gouttelettes de bitume en les entraînant par ordre décroissant de taille dans le fond de l'émulsion. Ainsi, plus la gouttelette de bitume est grosse, plus sa vitesse de sédimentation est élevée. De même, plus la différence de densité entre la phase dispersée (bitume) et la phase continue (eau) est grande, plus le phénomène de sédimentation est spontané. Il reste toutefois important de préciser que la phase de sédimentation est réversible puisque l'homogénéité de l'émulsion peut être rétablie par simple agitation;
- la floculation qui traduit l'agglomération de gouttelettes de bitume indépendamment de l'effet de la pesanteur. Les gouttelettes de bitume ont tendance à s'agréger lorsque les forces d'attraction (forces de Van der Waals) qui existent entre deux molécules sont plus fortes que les forces de répulsion. Ce phénomène se produit lorsque le film de tensioactifs à l'interface entre deux gouttelettes se rompt les laissant alors fusionner ensemble. Bien que théoriquement la floculation reste une réaction réversible par agitation, elle constitue généralement l'amorce de la rupture de l'émulsion;
- la coalescence, qui apparaît lors de la phase d'enrobage et de mise en œuvre de l'enrobé, est traduite par la formation d'un film continu de bitume. Cette dernière phase, qui amorce la rupture de l'émulsion, va influencer la montée en cohésion du matériau bitumineux (avec le départ de l'eau).

En outre, la nature des granulats (siliceux, calcaire...) et plus précisément leurs caractéristiques physico-chimiques (changement du pH ou échanges d'ions possible au contact de l'émulsion) sont des facteurs prépondérants vis-à-vis du mécanisme de rupture puisqu'ils peuvent influencer la vitesse de rupture de l'émulsion. Il est donc important de contrôler la cinétique des différentes étapes du processus ; enrobage, répandage, compactage et maturation pour optimiser les performances de l'enrobé à froid (Le Bec, 2005).

1.4.5 La cure

Une caractéristique importante des enrobés recyclés et traités à froid à l'aide d'une émulsion est le temps nécessaire pour que le matériau atteigne des propriétés mécaniques minimales (rhéologie, résistance et durabilité) avant la mise en place d'un revêtement. Ainsi, contrairement aux enrobés traditionnels à chaud, qui gagnent en résistance dès leur mise en place par l'effet conjugué du compactage et du refroidissement, les ERF traité à l'émulsion de bitume nécessitent une cure plus longue. En effet, l'eau dans la structure du matériau empêche en quelques sortes la coalescence du bitume à l'origine de la montée en cohésion du matériau. Comme nous le verrons plus en détail à la section 1.4.8, le mouvement de l'eau dans l'enrobé recyclé traité à froid à l'aide d'une émulsion joue un rôle de premier plan dans l'atteinte des performances recherchées. Or, une mise en place prématurée du revêtement bitumineux risque de nuire à la performance de la structure de la chaussée en compromettant la cure du matériau recyclé. En effet, l'enrobé à chaud utilisé comme revêtement est pratiquement imperméable et vient littéralement piéger l'eau dans l'enrobé recyclé.

Si la pose d'un revêtement pendant le temps de cure est donc fortement déconseillé, il est néanmoins possible d'ouvrir la chaussée au trafic pendant cette période. En effet, l'action du trafic force l'évacuation de l'eau et favorise ainsi la montée en cohésion du matériau. En fonction de la formulation de la l'enrobé recyclé et des conditions climatiques, la cure peut durer de quelques heures à plusieurs jours. À cet égard, il est conventionnel de recourir à l'ajout de ciment Portland dans la formulation d'un ERF : l'hydratation du ciment fixe l'eau libre et permet une forme d'auto-dessiccation du matériau traité favorisant la rupture de l'émulsion et la cure des ERF.

1.4.6 Les applications

Le retraitement à froid peut être envisagé pour différents types de chaussées : pistes d'aéroport, routes municipales, autoroutes... (Blais, 2007). Cependant le choix de la méthode de réhabilitation à appliquer se fait systématiquement selon plusieurs critères tels que le seuil de dégradation limite de la chaussée à retraiter (défaillance structural majeure, présence de

matériaux gélifs en fondation, défauts de drainage, matériaux inadaptés au retraitement), une étude préliminaire est donc indispensable. La technique est applicable pour des épaisseurs d'enrobés en place variant de 50mm à 300mm, ce choix dépendant de la classe de retraitement visée (*Voir Tableaux 1.3 et 1.4*).

Bien que les ERF puissent être envisagés dans les nouvelles constructions comme fondation d'une chaussée bitumineuse, ils sont le plus souvent utilisés en réhabilitation pour lutter contre la remontée de fissures (Lacombe, 2008). Très utile également pour la correction de profil et le renforcement structurel, cette technique ne peut cependant, en aucun cas, corriger un problème de fondation (*Voir Figure 1.1*).

De plus, même si de nombreuses incertitudes demeurent au sujet du comportement mécanique à long terme de ces matériaux, l'expérience a prouvé que les ERF possèdent un très bon comportement sous trafic (Lacombe, 2008).

1.4.7 Limites d'application

La mise en place des enrobés recyclés et traités à froid est contrainte par les conditions climatiques. Ainsi, il est fortement déconseillé de poser un ERF par temps froid (température ambiante inférieure à 5°C) ou pluvieux. En outre, la température ne doit pas descendre en dessous du point de congélation dans les 24h qui suivent la pose, sous peine de compromettre la cure du matériau (Lacombe, 2008).

Croteau et Lee (1997) précisent également que l'application d'enrobés retraités à froid doit se limiter aux routes à faibles trafics. Le débit journalier moyen annuel (DJMA) ne devant pas dépasser les 5000 véhicules pour un trafic poids lourds inférieur à 10% (Croteau et Lee, 1997). À titre indicatif, soulignons que l'autoroute 20, axe majeur du réseau routier québécois, possède un DJMA de 8412 véhicules avec 20% de poids lourds (MTQ, 2001). Certains tronçons de cette autoroute, situés à proximité de la région de Québec, ont été réhabilités à partir d'enrobés recyclés et traités à froid à l'aide d'une émulsion en centrale.

Enfin, pour ces matériaux retraités, la pose d'un revêtement en enrobés bitumineux à chaud après la cure est fortement conseillée pour limiter les risques liés à l'infiltration d'eau et à une usure prématurée du matériau recyclé retraité.

1.4.8 L'eau : un facteur déterminant

1.4.8.1 Le rôle de l'eau dans la formulation de l'enrobé recyclé

La présence d'eau dans les matériaux recyclés traités à froid s'explique essentiellement par son rôle d'enrobage. Bien que généralement les matériaux recyclés soient utilisés humides dans la confection d'ERF, on a très souvent recouru à une eau d'ajout qui est incorporée au mélange granulaire avant l'ajout de l'émulsion afin de faciliter l'enrobage des granulats. Le but étant que la répartition de l'émulsion au sein du squelette granulaire ne nécessite pas une trop grande énergie lors du malaxage et surtout, conduise à un mélange homogène ; c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de ségrégation de l'émulsion sur une fraction granulaire spécifique aux dépens d'une autre (Deneuvilliers et Poirier, 2002).

L'eau dans le mélange va également augmenter la maniabilité de l'enrobé pour une mise en place plus facile. Par ailleurs, le projet OPTTEL, mené par le groupe COLAS entre 2002 et 2004, a mis en évidence qu'une augmentation de la teneur en eau initiale n'influe pas sur la compactabilité de l'enrobé mais implique simplement qu'une plus grande quantité d'eau est évacuée lors du compactage (Eckmann et *al.*, 2002). L'excès d'eau permet néanmoins d'assurer une répartition homogène de l'émulsion à travers le squelette granulaire au malaxage.

1.4.8.2 Le processus d'évacuation de l'eau

Si l'ajout d'eau au mélange s'avère indispensable à la réalisation d'ERF traités à l'émulsion de bitume, le départ de cette eau après la mise en place du matériau est tout aussi important. Comme nous l'avons souligné précédemment, le compactage conduit à un effet d'essorage du matériau à la mise en place. Ainsi, après compactage, l'évacuation de l'eau par

évaporation va être un critère essentiel à l'obtention d'une montée en cohésion optimale et rapide du matériau traité. Les études menées sur le sujet, notamment dans le cadre du projet OPTTEL, s'accordent pour dire que le départ d'une grande partie de l'eau se fait généralement rapidement et que la teneur en eau résiduelle semble se stabiliser autour de 1% après quelques jours (Serfass, 2002). Il apparaît également que, quelques soient l'hygrométrie et la température du milieu ambiant, il est très difficile d'éliminer totalement l'eau du matériau.

1.5 La mesure in-situ de la teneur en eau dans un sol

1.5.1 Introduction

Connaître avec précision, la valeur et l'évolution de la teneur en eau dans les matériaux, est essentiel dans de nombreux domaines tels que la géotechnique, l'hydrologie ou encore l'agriculture. Longtemps cependant, la mesure de cette teneur en eau s'est limitée à des prélèvements d'échantillons pour une analyse gravimétrique du matériau. Ainsi, il faut attendre les années 50 pour voir apparaître des sondes à neutrons et avec elles, la première méthode de mesure de la teneur en eau non-destructrice (Gardner *et al.*, 1998). Cette technique se base sur les propriétés que possède un flux de neutrons à se réfléchir sur les molécules d'eau, en particulier sur les atomes d'hydrogènes qui les composent. Ce procédé, bien que rapide reste cependant coûteux et comprend une certaine dangerosité d'utilisation du fait de l'émission de radiations nucléaires.

Pour répondre aux besoins du secteur agricole et à la curiosité scientifique, le développement de nouvelles technologies a alors été encouragé. C'est ainsi que la réflectométrie temporelle, ou *Time Domain Reflectometry* (TDR) en anglais, a été développée en 1980 par Topp et ses collaborateurs (Topp *et al.*, 1980). La technologie TDR, qui s'appuie sur le comportement diélectrique du matériau, consiste à mesurer le temps mis par une onde électromagnétique pour se propager le long des tiges métalliques d'une sonde enfouie dans le matériau. La permittivité diélectrique d'un matériau (ϵ) traduit la capacité du matériau à absorber de l'énergie d'une onde électromagnétique qui le traverse, à se polariser et de stocker de l'énergie (Ekblad et Isacsson, 2000 ; Evans *et al.*, 2007 ; Diefenderfer *et al.*, 2007).

La permittivité diélectrique d'un matériau, est le paramètre physique le plus sensible à la présence d'eau, puisque la permittivité diélectrique de l'eau liquide est très élevée ($\epsilon \approx 80$) comparativement à la plupart des matériaux de chaussée ($\epsilon \approx 3$ à 12). Cette grande nuance entre la permittivité élevée de l'eau par rapport à celle des autres composants du sol, a rendu la détermination de la permittivité très attrayante pour mesurer la teneur en eau. En outre, la littérature révèle que la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique tend à diminuer dans les matériaux ayant des permittivités diélectriques plus élevées, comme dans un sol humide. À travers ses travaux, Topp (Topp *et al.*, 1980) a donc cherché à lier la vitesse de transmission de l'onde à la permittivité puis à la teneur en eau du milieu. De ses recherches et de la concurrence industrielle, sont nées les méthodes dites de *Water Content Reflectometry* (WCR). S'inspirant largement de la technologie TDR, les sondes d'humidité WCR sont devenues très populaires car elles présentent, notamment, l'avantage d'être complètement automatisées à l'aide d'un système d'acquisition de données. Un suivi en continue de la teneur en eau volumique de la chaussée est donc désormais possible. C'est également cette technologie qui a été retenue dans le cadre de ce projet.

1.5.2 Notions relatives à l'utilisation des sondes WCR

1.5.2.1 Introduction

Avant de s'intéresser à l'utilisation de la technologie TDR dans la mesure de la teneur en eau d'un sol, il est indispensable de revenir sur les notions de champ électromagnétique, d'onde et de permittivité.

1.5.2.2 Champ électromagnétique

Lorsque des particules fixes chargées électriquement sont en interaction avec une autre particule fixe de l'espace, il y a création de forces électrostatiques qui forment un champ électrostatique. Lorsque ces particules sont en mouvement, l'interaction entre les charges ne peut se réduire à une force électrostatique. On sépare alors la force s'exerçant sur une charge en mouvement en deux parties. L'une, indépendante de la vitesse, que l'on appelle force

électrique. Et la seconde qui lui est orthogonale dans l'espace et dépendante de la vitesse : la force magnétique. On parle alors de forces électromagnétiques qui créent un champ du même nom (Pérez *et al.*, 2001).

1.5.2.3 Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est une perturbation du champ électromagnétique. Elle est caractérisée par une longueur d'onde et une fréquence (Pérez *et al.*, 2001).

1.5.2.4 Permittivité

La permittivité diélectrique d'un matériau (ϵ) traduit la capacité du matériau à absorber de l'énergie d'une onde électromagnétique qui le traverse, à se polariser et de stocker de l'énergie (Ekblad et Isacson, 2000 ; Evans *et al.*, 2007 ; Diefenderfer *et al.*, 2007).

Plusieurs types de polarisation peuvent se produire lorsque les matériaux sont exposés à un champ électromagnétique, y compris la polarisation d'orientation qui se produit dans les substances composées de molécules polaires telles que l'eau (Diefenderfer *et al.*, 2007) (Figure 1.10). En l'absence de champ électrique extérieur, les dipôles de l'eau sont orientés au hasard dans toutes les directions à cause de l'agitation thermique de ces molécules (Figure 1.10 a)). Cependant, quand on applique un champ électromagnétique extérieur, les dipôles subissent un moment de force qui a tendance à les aligner dans la même direction que celle du champ appliqué (Figure 1.10 b)), ce qui est connue par la polarisation d'orientation. (Boridy, 1990). Il faut noter que cet alignement n'est pas parfait car il est continuellement perturbé par l'agitation thermique des molécules. Toutefois la diminution de la température ainsi que l'augmentation du champ extérieur augmente l'alignement des dipôles.

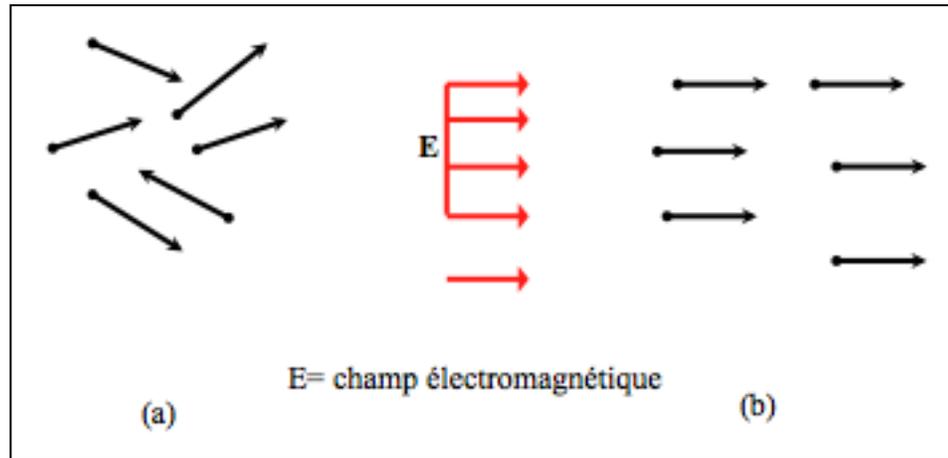


Figure 1.10 Schématisation de la polarisation d'orientation des dipôles

Lorsque l'eau se transforme en glace à basse température, les molécules d'eau se lient entre elles par des liaisons d'hydrogènes. Ces liaisons empêchent la rotation des molécules d'eau ce qui affecte grandement leurs polarisation.

L'unité de la permittivité est le Farad/mètre, ($F = \text{Kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$) et sa valeur mesurée est très faible. Dans un souci de praticité, la permittivité (ϵ) a été reliée à la permittivité du vide (ϵ_0) [$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$], ce qui a donné naissance à la permittivité relative (ϵ_r), appelée également constante diélectrique et souvent notée K (Boridy, 1990). La permittivité relative (ϵ_r) dépend fortement de la fréquence d'onde électromagnétique, et elle peut être exprimée sous forme d'un nombre complexe (Topp *et al.*, 1980).

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i \left(\epsilon_r'' + \frac{\sigma_0}{\epsilon_0 f} \right) \quad (1.1)$$

Avec :

ϵ_r^* : permittivité relative complexe,

ϵ_r' : partie réelle de la permittivité relative,

i : nombre complexe imaginaire ($J^2 = -1$),

ϵ_r'' : permittivité relative de la partie imaginaire,

σ_0 : conductivité à fréquence zéro,

f : fréquence de l'onde électromagnétique,

ϵ_0 : permittivité du vide ($\epsilon_0=8.8542 \times 10^{-12}$ F/m).

La plus importante variable qui affecte la permittivité d'un sol est la fréquence d'excitation f (Topp *et al.*, 1980 ; Cerepi *et al.*, 1998), pour des valeurs de fréquences situées entre 1 MHz et 1 GHz, la partie réelle est considérée largement supérieure à la partie imaginaire laquelle peut alors être négligeable (Topp *et al.*, 1980 ; Ekblad et Isacsson, 2000). En considérant cette hypothèse l'équation (1.1) se simplifie en :

$$\epsilon_r^* \approx \epsilon_r' \approx \epsilon_a \quad (1.2)$$

Couramment, la partie réelle de la permittivité relative (ϵ_r') est appelée permittivité apparente, ϵ_a .

1.5.3 Les débuts de la technologie TDR

1.5.3.1 Introduction

Inspirée du radar, la technologie TDR fut utilisée en premier lieu pour tester la qualité des câbles de transmissions. Dans le cas d'un câble totalement fonctionnel, l'impulsion émise est entièrement transmise à l'extrémité du câble. En revanche, dans le cas d'une discontinuité d'impédance due à un défaut du câble, une partie du signal émis sera réfléchi puis renvoyé vers la source (Jones *et al.*, 2002). En fonction du temps mis par le signal pour se réfléchir et par l'analyse des variations dans l'impédance mesurée, cette technologie permet donc de localiser et d'identifier un défaut dans un câble. La technologie TDR a d'abord été introduite par Fellner-Feldegg en 1969 pour la mesure des propriétés électriques d'un matériau avant d'être considérée pour la mesure de la teneur en eau volumique d'un matériau dans le milieu des années 70 avec les travaux de Topp, Davis et Annan. Prenant en compte les différentes caractéristiques du sol étudié telles que la densité du matériau, sa texture, sa teneur en sel ou encore sa température, le trio s'intéresse alors aux recherches menées par Davis et Chudobiak

(1975) qui décrivent la méthode TDR comme un excellent moyen de mesurer la vitesse de propagation d'un signal-radio dans un sol humide ou sec.

1.5.3.2 Développement des sondes à tiges métalliques

Bien que la technologie TDR prévoyait initialement d'utiliser un cylindre coaxial long de 1m pour transmettre l'onde au milieu, ce procédé s'avéra inadapté à la mesure in-situ. Se basant sur les travaux de Davis et Chudobiak (1975), Topp *et al.* (1980) optèrent alors pour des sondes équipées d'une paire de tiges métalliques parallèles. En outre, ils établirent qu'un espacement de 50mm entre les tiges était adapté et que la zone de mesure était équivalente à un cylindre dont l'axe serait positionné entre les deux tiges et dont le diamètre D vaudrait 1,4 fois l'espacement s entre ces tiges. La Figure 1.12 illustre le circuit d'une sonde de type TDR.

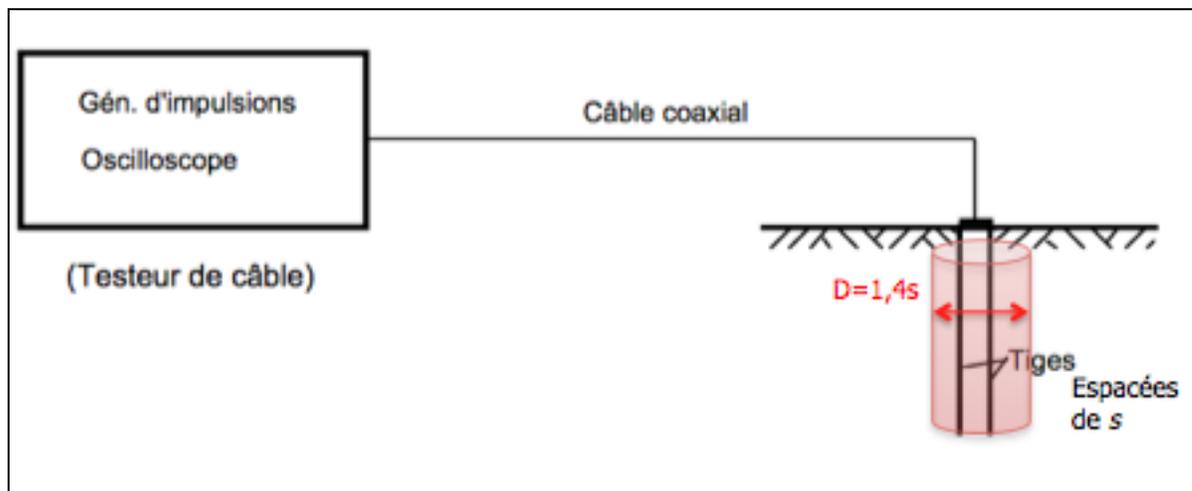


Figure 1.11 Système de mesure de la constante diélectrique d'un matériau entre deux tiges métalliques parallèles
Reproduit et adapté de Herkelrath *et al.* (1991)

1.5.3.3 Le principe TDR

Le fonctionnement d'une sonde TDR est proche de celui d'un radar. Une impulsion électrique est appliquée sous la forme d'un échelon de tension rapide qui se propage le long d'un câble coaxial de résistance environ 50Ω et déclenche ainsi une prise de mesure. À l'extrémité du câble, l'onde électrique traverse un transformateur d'impédance puis un double conducteur avant d'atteindre les électrodes placées dans le sol. L'impédance étant différente à la surface du sol, une partie du signal est réfléchi directement jusqu'à la source alors qu'une autre partie se propage le long des tiges parallèles dans le sol. La partie du signal transmis qui atteint l'extrémité des sondes est également réfléchi jusqu'à la source. Ce processus étant répété plusieurs fois, il est alors possible d'obtenir une onde de retour stable. L'analyse de cette courbe permet ensuite de déterminer le temps séparant la première réflexion à la surface et celle à l'extrémité des tiges ainsi que l'intensité de ces réflexions.

1.5.3.4 Relation entre la teneur en eau volumique et la permittivité relative apparente

En 1975, Davis et Chudobiak sont les premiers à montrer de l'intérêt à la technologie TDR pour une application aux sols. La vitesse de propagation v d'une onde le long d'une tige de longueur L est alors définie comme :

$$v = \frac{2L}{t} \quad (1.3)$$

Où t est le temps mis par l'onde pour se propager puis se réfléchir le long de la tige. Le coefficient 2 traduit le fait que le signal réalise un aller-retour le long des tiges de la sonde.

Cherchant à montrer la dépendance de la permittivité diélectrique d'un matériau avec sa teneur en eau volumique, Topp *et al.* (1980) développent alors une relation entre la vitesse de propagation de l'onde v et la permittivité relative apparente ε' du matériau :

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (1.4)$$

Où c_0 représente la vitesse de la lumière dans le vide ($c_0=3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Par ailleurs, les sondes TDR ne donnant qu'une mesure du temps mis par l'onde pour se propager le long de la tige métallique, et non la vitesse v de transmission du signal, il était donc nécessaire de déterminer la longueur L de la tige métallique composant la sonde TDR et dans laquelle se propage le signal. En notant t le temps pris par l'onde pour réaliser un aller-retour, la relation suivante pouvait être établie (Von Hippel, 1954; Topp *et al.*, 1980) :

$$t = \frac{2L\sqrt{\varepsilon'}}{c_0} \quad (1.5)$$

Par étalonnage de la sonde TDR dans l'air, où la permittivité relative apparente ε' est égale à 1, il est alors possible de calculer la longueur théorique réelle L de la tige parcourue par l'onde.

Quelque soit le sol étudié, la mesure du temps t de propagation et l'application de l'Équation (1.5) permettent alors d'obtenir la permittivité relative apparente du matériau ε' du matériau.

Une application du principe de *Time Domain Reflectometry* à la mesure de la teneur en eau volumique θ d'un sol nécessitait également la mise en relation de cette variable avec la permittivité relative apparente ε' du matériau. Les travaux de Topp *et al.* (1980) sur différents sols d'origine minérale ont ainsi mis en évidence qu'il était possible d'établir une unique équation polynomiale indépendante de la densité, de la température ou de la teneur en sel du matériau (O'Connor et Dowding, 1999). Cette équation est couramment utilisée pour l'étalonnage des sondes TDR et est connue sous le nom d'équation de Topp :

$$\theta = -0,53 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon' - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon'^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon'^3 \quad (1.6)$$

1.5.3.5 Les évolutions

Les résultats présentés par Topp et ses collaborateurs en 1980 concernant l'utilisation de la TDR pour la mesure de la teneur en eau volumique dans un sol ont contribué à la promotion et au développement de cette technologie. L'émergence de l'informatique encouragea alors de nouvelles études sur l'acquisition automatisée des mesures et le développement de logiciels pour le traitement du signal en temps réel (Baker et Allmaras, 1990; Heimovaara et Bouten, 1990; Herkelrath *et al.*, 1991; Evett, 1993 et 1994).

La commercialisation des sondes de type TDR par différentes compagnies s'est également accompagnée d'une multiplication des types de sondes. Le design des sondes a évolué et plusieurs facteurs ont été considérés dans leur conception, tels que la longueur des tiges, leur diamètre, leur espacement, le volume mesuré ou encore de la résistance de la sonde. En effet, la zone de mesure de la sonde est assimilée à un cylindre de rayon R , dont le centre se situe entre les tiges, et de longueur L , correspondant à la longueur des tiges. La littérature place d'ailleurs ces deux caractéristiques comme deux critères prépondérants dans le choix d'une sonde TDR. Ainsi, O'Connor et Dowding (1999) concluent que les études menées sur le sujet ont révélée que l'emploi de tiges trop courtes (longueur inférieure à 100mm) diminue la précision de la mesure alors que des sondes trop longues (longueur supérieure à 600mm) atténuent la réflexion du signal. Concernant le diamètre des tiges, Petersen (1995) explique que plus celui-ci est faible, meilleure sera la résolution et la fiabilité des résultats lors de mesures proches de la surface. De ce fait, un ratio de 0,2 correspondant au diamètre des tiges d sur l'espacement s entre les tiges, est considéré comme optimal pour une détermination précise de la teneur en eau volumique. En outre, le choix d'une sonde à deux ou trois tiges va également influencer sur le volume de la zone de rayonnement du signal. Un bilan des différentes configurations et du volume réel mesuré par la sonde en fonction de l'espacement entre les tiges est dressé dans le Tableau 1.7. Le Tableau 1.8 propose quant à lui une revue des sondes TDR commercialisées en fonction de la longueur et du diamètre des tiges ainsi que de leur espacement.

Tableau 1.7 Volume effectif de mesure des sondes TDR
Tiré de O'Connor et Dowding (1999)

Espacement entre les tiges s (mm)	Installation verticale – Rayon effectif de mesure (mm)	Installation horizontale – Distance minimale de la surface du sol (mm)	Références
Système à 2 tiges			
10		1,00s	Peterson (1995)
20		0,75s	Peterson (1995)
25	1,00s		DeClercq (1985)
50	0,60s	0,40s	Baker et Lascano (1989)
50	0,70s		Topp et Davis (1985)
50		0,40s	Peterson (1995)
	0,5(s+d) d = diamètre des tiges	0,5(s+d) d = diamètre des tiges	Knight <i>et al.</i> (1994)
Système à 3 tiges			
	0,70s	0,70s	Knight <i>et al.</i> (1994)

Tableau 1.8 Caractéristiques des différentes sondes TDR utilisées dans la mesure de la teneur en eau
Tiré de O'connor et Dowding (1999)

Diamètre des tiges d (mm)	Espacement entre les tiges s (mm)	Ratio diamètre/es-pacement d/s	Longueur des tiges L (mm)	Références
Système à 2 tiges				
9,5	50,8	0,19	200/300/ 400/600	Soilmoisture Equipment Co. (1995)
6,0	40,0	0,15	160	IMKO GmbH (1995)
4,0	25,0	0,16	117	Hook <i>et al.</i> (1992)
3,5	20,0	0,18	110	IMKO GmbH (1995)
3,2	30,0	0,11	300	Campbell Scientific Inc. (1992) *
2	16,0	0,13	100	Easy Test (1994)
Système à 3 tiges				
10,0	65	0,15	500	Van Schelt <i>et coll.</i> (1994)
9,5	38,1	0,25	203	Rada <i>et al.</i> (1994)
8,0	35,0	0,23	160	IMKO GmbH (1995)
6,0	50,0	0,12	200/500	CSIRO type; Baran (1994); Look <i>et al.</i> (1994)
6,0	50,0	0,12	300/500	QT type; Baran (1994); Look <i>et al.</i> (1994)
4,8	44,7	0,11	300	Campbell Scientific Inc. (1992)
4,8	25,0	0,19	100/150	Knowlton <i>et al.</i> (1994)
3,7	30,0	0,16	150	Zegelin <i>et al.</i> (1989)
3,2	30,0	0,11	200	Vadose Zone (1994)
3,2	25,0	0,13	203	Kotdawala <i>et al.</i> (1994)
3,0	25,0	0,12	200	Soilmoisture Equipment Co. (1995)

* Caractéristiques de la sonde TDR de type CS616 utilisée pour ce projet

On remarque que la zone couverte par le signal est plus importante avec des sondes équipées de deux tiges. Zegelin *et coll.* (1989) rapportent cependant que le choix d'une sonde à trois tiges améliore la qualité de la mesure lorsque l'utilisation de tiges courtes est requise.

Topp fut le premier à développer une corrélation empirique (Équation (1.6)) permettant l'étalonnage des sondes TDR pour la mesure de la teneur en eau volumique d'un sol à partir du temps de propagation de l'onde émise. Son équation fut d'ailleurs validée par différentes études à de nombreux sols même ceux composés majoritairement de graves (Dalton, 1992 ; Dalton *et al.*, 1984 ; Topp et Davis, 1985 ; Whalley, 1993 ; Zegelin *et al.*, 1989). Zegelin *et al.* (1992) rapportent cependant que la précision visée et la nature de certains sols nécessitent parfois un étalonnage spécifique au milieu étudié. La littérature décrit ainsi plusieurs protocoles qui ont été établis afin de mettre au point différentes relations basées sur le modèle de Topp et mettant en corrélation la teneur en eau volumique avec la vitesse de propagation du signal et la densité du matériau (Logsdon, 1994 ; Ledieu *et al.*, 1986 ; Herkelrath *et al.*, 1992 et Whalley 1993).

Autre facteur important à prendre en compte avec les sondes TDR : l'influence de la température sur la mesure. Alvenas et Stenberg (1995) ont été les premiers à quantifier l'impact de la température sur la mesure de la teneur en eau volumique dans un sol. Ainsi, ils mirent en évidence que les mesures de θ réalisées sur une seule journée peuvent varier de $0,05\text{m}^3/\text{m}^3$. De plus, la permittivité apparente ε' trop faible (~ 3) de l'eau à l'approche du point de congélation rend impossible la prise de mesures. Une correction de température est donc indispensable lors d'une instrumentation in-situ.

1.5.4 La technologie WCR (Water Content Reflectometry)

1.5.4.1 Introduction

Bien que largement utilisée aujourd'hui, la technologie TDR peut s'avérer dispendieuse, encombrante et restrictive dans son utilisation du fait de la résistance limitée des sondes ou des interfaces nécessaires à leur emploi. En effet, les systèmes TDR fonctionnent à l'aide

d'un générateur d'onde capable de travailler à de hautes fréquences (0,02GHz à 3 GHz), un dispositif qui s'est révélé à la fois onéreux et mal adapté à la réalisation de mesures in-situ (Kim et Benson, 2002). C'est pourquoi, la plupart des sondes TDR développés récemment, comme les systèmes WCR (*Water Content Reflectometry*), incorporent l'intégralité des composants électroniques dans la tête de la sonde. L'utilisation d'une interface spécifique n'est alors plus nécessaire. Cependant la plage de fréquence nécessaire au fonctionnement de ce type de sonde est nettement plus faible (de l'ordre de 30-60MHz), ce qui a pour conséquence d'augmenter la sensibilité du dispositif de mesure à la nature du milieu (Kim et Benson, 2002). La réalisation d'un étalonnage rigoureux de la sonde WCR est donc indispensable.

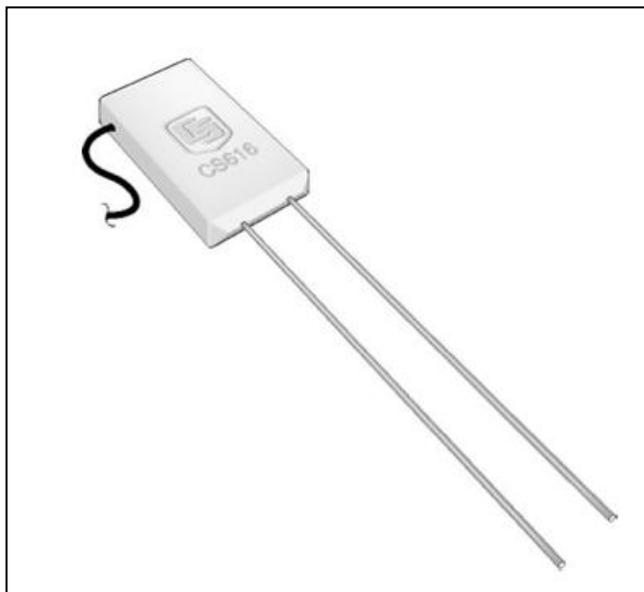


Figure 1.12 Sonde WCR de type CS616 développée par Campbell Scientific, Inc. Tiré de Campbell Scientific, Inc. (2006)

Dans le cadre de notre étude qui porte sur la mesure de la teneur en eau dans un matériau recyclé retraité à froid à l'aide d'une émulsion de bitume, notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une sonde CS616 de type WCR fabriquée par Campbell Scientific (Figure1.12). Cette sonde WCR est munie de deux tiges métalliques parallèles longues de

300mm et directement connectées au circuit imprimé situé dans la tête de la sonde. Le fonctionnement de la sonde est très proche de celui d'une sonde TDR classique. Benson et Wang (2006) expliquent le fonctionnement du système de la manière suivante : un amplificateur de signal règle la sortie sur l'un des états qui contrôlent le circuit électronique. Lorsque le circuit change d'état, une onde électromagnétique est émise et se propage le long des tiges de la sonde. Le signal est réfléchi à l'extrémité des tiges et revient vers l'amplificateur de signal. Une section du circuit électronique détecte alors le signal de retour et change l'état de la sortie de l'amplificateur provoquant la transmission d'une nouvelle onde le long des tiges. Après que deux ondes successives aient réalisé un aller-retour, le cycle de mesure est alors complet. Enfin, précisons que le signal de sortie récupéré par le circuit électronique est sous la forme d'une onde électromagnétique carrée représentant le temps de parcours du signal, appelé période et notée P . L'équation définissant la période mesurée par une sonde de type WCR est :

$$P = 2S_f \left(\frac{2L\sqrt{\epsilon^T}}{c_0} + t_d \right) \quad (1.7)$$

Très semblable à l'Équation (1.5) établie par Topp *et al.* (1980), l'Équation (1.7) diffère principalement par la présence d'un facteur t_d , appelé temps de délais, et permettant de comptabiliser le temps perdu lors des changements d'états du circuit en cours de mesure. Par ailleurs, le coefficient 2 traduit les deux trajets aller-retour nécessaires à la réalisation d'un cycle complet et le facteur d'échelle S_f est une donnée fournie par le constructeur qui est propre à chaque sonde WCR et qui permet de diviser le nombre de réflexions.

À titre informatif, la période mesurée par une sonde WCR CS616 (dispositif utilisé dans ce projet) peut varier entre $14\mu\text{s}$ lorsque les tiges de la sonde sont au contact de l'air et $43\mu\text{s}$ lorsqu'elles sont immergées dans l'eau (résultats présentés à la section 4.1). Une équation d'étalonnage est donc indispensable pour traduire ces mesures en teneurs en eau volumiques.

1.5.4.2 Étalonnage

Kelleners *et al.* (2005) mettent en avant l'importance de connaître avec précision la longueur réelle des tiges de la sonde WCR pour une mesure du temps de propagation de l'onde précise à partir de l'Équation (1.7).

Dans un milieu tel que l'air, où la permittivité apparent ε'_{air} est connue et égale à 1, il est possible d'enregistrer la période P_{air} mesurée par la sonde dans l'air. Les seules inconnues restantes dans l'Équation (1.7) sont alors t_d , le temps de délais du circuit, et L , la longueur des tiges métalliques équipant la sonde.

Afin d'éliminer l'inconnue t_d , Kelleners *et al.* (2005) proposent d'écrire l'égalité suivante :

$$\boxed{\frac{P_{eau\ distillée}}{S_f} - \frac{P_{air}}{S_f} = \frac{4L\sqrt{\varepsilon'_{eau\ distillée}}}{c_0} - \frac{4L\sqrt{\varepsilon'_{air}}}{c_0}} \quad (1.8)$$

Où $P_{eau\ distillée}$ est la période enregistrée par la sonde WCR dans l'eau distillée et $\varepsilon'_{eau\ distillée}$ est la permittivité apparente correspondante. La permittivité étant directement influencée par la température de l'eau, Kelleners *et al.* (2005) s'appuient sur une relation empirique entre la constante diélectrique apparente $\varepsilon'_{eau\ distillée}$ et la température de mesure élaborée par Hasted (1973), soit :

$$\boxed{\varepsilon'_{eau\ distillé} = 87,74 - 4,0008 \times 10^{-1}T + 3,398 \times 10^{-4}T^2 - 1,4 \times 10^{-6}T^3} \quad (1.9)$$

Toutes les variables autres que la longueur effective L_{ef} étant connues, on peut déterminer la longueur effective des tiges de la sonde à partir de l'Équation (1.8) :

$$L_{ef} = \frac{c_0(P_{eau\ distillée} - P_{air})}{4S_f(\sqrt{\varepsilon'_{eau\ distillée}} - \sqrt{\varepsilon'_{air}})} \quad (1.10)$$

L_{ef} étant alors connue, il est possible de déterminer le temps de délais t_d de la sonde, soit :

$$t_d = \frac{P}{2S_f} = \frac{2L_{ef}\sqrt{\varepsilon'}}{c_0} \quad (1.11)$$

Appliquée dans le cas de l'air ou de l'eau distillée à 20°C où les permittivités apparentes sont connues, l'Équation (1.11) permet donc d'identifier le temps de délais du circuit t_d .

L'étalonnage à l'eau distillée et à l'air de la sonde WCR achevé, l'Équation (1.12) peut désormais être utilisée pour calculer la permittivité apparente ε' de tous les milieux dont la période P est mesurée par la sonde :

$$\varepsilon' = \left[\frac{c_0}{2L_{ef}} \left(\frac{P}{2S_f} - t_d \right) \right]^2 \quad (1.12)$$

Comme avec une sonde TDR classique, il est possible d'établir un lien entre la période P mesurée par un système WCR et la permittivité apparente ε' du matériau. Pour arriver à la teneur en eau volumique du sol considéré à partir de la période enregistrée, Campbell Scientific, le constructeur de la sonde CS616, propose également une équation quadratique :

$$\theta = -0,0663 - 0,0063 \times P + 0,0007 \times P^2 \quad (1.13)$$

La nature du sol ayant une très grande influence sur les mesures de la période, un étalonnage spécifique au milieu étudié est cependant conseillé de même que l'établissement d'une équation de correction de température (Benson et Wang, 2006).

CHAPITRE 2

APPROCHE GLOBALE DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

L'objectif principal de notre programme expérimental est de mesurer in-situ, en continu, l'évolution de la teneur en eau dans un matériau recyclé traité avec une émulsion de bitume à l'aide de sondes d'humidité de type WCR. La réponse des sondes d'humidité WCR est fortement tributaire des caractéristiques du milieu environnant. Entre autres, trois facteurs prédominants vont influencer sur les mesures de la sonde WCR : 1) la teneur en eau, 2) la température et, 3) la compacité du matériau entourant les tiges de la sonde. Ainsi, dans la perspective d'exploiter avec rigueur les mesures in-situ de sondes WCR, un programme d'essai en laboratoire a été orchestré afin de cerner les effets induits par ces trois facteurs sur la mesure et, au besoin, de développer un modèle d'étalonnage.

Les principales étapes de la stratégie expérimentale développée pour ce projet sont illustrées au Tableau 2.1. Ces étapes ont été élaborées dans la perspective de mettre en relief une méthodologie pour la mesure in-situ de la teneur en eau dans un matériau recyclé MR5-TFE (Traité à Froid avec une Émulsion de bitume). Le programme expérimental se présente en trois phases : I) la réalisation d'une planche d'essai, II) le développement d'un programme d'essais en laboratoire et III) l'exploitation des mesures in-situ à l'aide d'un modèle d'étalonnage élaboré en laboratoire.

Tableau 2.1 Détails des différentes phases composant le programme expérimental de ce projet de recherche

Phase I : Réalisation d'une planche d'essai

1. Instrumentation d'une chaussée bitumineuse avec des sondes d'humidité et des thermocouples :
 - a. Choix de l'emplacement des instruments,
 - b. Définition des zones de confinement pour le positionnement des sondes,
 - c. Échantillonnage de l'enrobé de confinement,
 - d. Mise en place des sondes et des thermocouples,
 - e. Prise de mesure à partir d'un système d'acquisition de données.

Phase II : Programme d'essai en laboratoire

1. Reconstitution de l'enrobé de confinement en laboratoire pour étalonnage des sondes :
 - a. Caractériser le matériau mis en place in-situ ;
 - b. Caractériser l'agrégat composant le matériau de confinement ;
 - c. Élaborer une formulation des matériaux en laboratoire.
2. Évaluation de la sensibilité des sondes à l'eau et à l'air.
3. Réalisation d'éprouvettes instrumentées pour évaluer l'influence de la température et de la porosité :
 - a. Mesurer l'effet de la température sur la réponse des sondes ;
 - b. Mesurer l'effet de la porosité sur la réponse des sondes.

Phase III : Exploitation des mesures in-situ

1. Traitement des mesures de la teneur en eau in-situ :
 - a. Analyser l'évolution de la teneur en eau à partir des recommandations du fabricant des sondes d'humidité ;
 - b. Analyser l'évolution de la teneur en eau à partir des résultats de notre programme d'essais en laboratoire ;
 - c. Valider les résultats par échantillonnage du matériau in-situ pour une mesure gravimétrique de la teneur en eau en laboratoire.

2.1 Phase I : Réalisation d'une planche d'essai

Dans le cadre de ce projet, la planche d'essai a été mise en œuvre en milieu urbain à la ville de Montréal sur l'avenue des Érables. Le détail relatif à la planche d'essai est traité au Chapitre 3.

La phase I de notre programme expérimental est définie suivant 5 étapes identifiées : a,b,c,d et e, qui précisent la stratégie d'instrumentation de la planche d'essai réalisée. En particulier, l'étape b met en évidence la notion de zone de confinement, laquelle vise à créer un volume spécifique au sein du matériau à instrumenter pour y positionner une jauge. La mise en place d'une zone de confinement est une solution qui s'avère intéressante pour contrôler le milieu environnant de chaque sonde et ainsi optimiser la qualité des prises de mesures lors de l'étape e. Ainsi, dans le cadre de ce projet, trois zones de confinement ont été établies à des niveaux différents de la chaussée. Le but étant d'instrumenter les deux couches de matériaux recyclés (MR5) traités à froid avec une émulsion (TFE) et identifiés dans ce mémoire sous les noms de MR5-TFE-A (24 cm) et MR5-TFE-B (20 cm). Les détails propres à la phase d'instrumentation seront présentés à la section 3.1. La Figure 2.2 donne un aperçu des différentes couches de la structure de la chaussée instrumentée dans le cadre de ce projet de recherche.

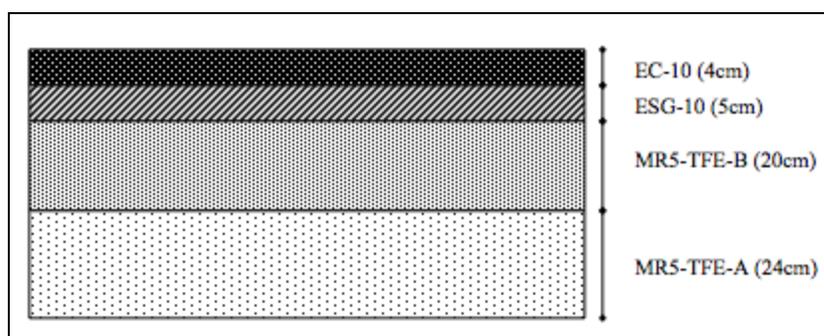


Figure 2.1 Schéma des différentes couches de la structure de la chaussée instrumentée (coupe transversale)

Par ailleurs, il est évident que le succès d'une mesure en continu de l'évolution de la teneur en eau dans les matériaux recyclés présents dans la chaussée repose principalement sur la minutie et la rigueur employées dans la réalisation de la planche d'essai.

2.2 Phase II : Programme d'essais en laboratoire

2.2.1 Introduction

La phase II de notre stratégie expérimentale vise à la réalisation d'un programme d'essais en laboratoire afin de reproduire le matériau de confinement mis en place in-situ autour des sondes. Pour ce faire, les matériaux mis en place dans la planche d'essai ont été échantillonnés puis caractérisés en laboratoire tout comme le MR5 utilisé pour leur confection. Les principales caractéristiques étudiées en vue de reconstituer en laboratoire des matériaux mis en œuvre sont :

- la teneur en eau,
- la teneur en bitume,
- l'absorption,
- la granularité.

En vue de mieux connaître le fonctionnement des sondes WCR, nous avons par la suite souhaité évaluer leur sensibilité dans des milieux contrôlés aux taux d'humidité très distincts, soit : dans l'eau et dans l'air ambiant (à humidité relative non contrôlée). De cette manière, nous sommes en mesure d'évaluer l'étendue de la plage de mesure des sondes.

Enfin, le programme expérimental en laboratoire vise à étudier l'effet de la température et de la porosité sur la réponse des sondes WCR. Pour ce faire, des éprouvettes instrumentées sont confectionnées à partir du matériau de confinement reconstitué en laboratoire. Des éprouvettes de différents teneurs en eau et porosités ont été utilisées pour mesurer l'influence de ces facteurs sur la réponse d'une sonde d'humidité. Afin de faciliter la présentation des résultats dans ce mémoire, nous avons identifié chaque essai réalisé en laboratoire de la manière suivante :

MR5 – TFE – X– n– w – T

Avec,

MR5 : matériau recyclé de classe 5 (*Voir* Tableaux 1.1 et 1.2).

TFE : traité à froid avec une émulsion de bitume.

X: matériau considéré : A ou B dans ce projet (*Voir* Figure 2.1).

n : porosité du matériau MR5-TFE de l'éprouvette, exprimée en %.

w : teneur en eau massique du matériau MR5-TFE de l'éprouvette, exprimée en %.

T : température d'essai, exprimée en °C.

À titre d'exemple, un essai identifié MR5-TFE-B-33,9-14,3-25 se rapporte à un essai réalisé en laboratoire sur le matériau MR5-TFE-B (*Voir* Figure 2.1) de porosité et de teneur en eau massique constantes, respectivement égales à 33,9% et 14,3%. La température de l'essai est alors fixée à 25°C.

2.2.1.1 Étude des facteurs influençant la réponse des sondes à l'aide d'éprouvettes instrumentées

Dans la perspective d'étudier les facteurs environnant susceptibles d'influencer la réponse des sondes WCR in-situ, il est nécessaire de reproduire physiquement en laboratoire la zone de confinement. Pour ce faire, des éprouvettes instrumentées sont réalisées en laboratoire dans des moules en PVC dont le volume est de 450x150x110mm³. En outre, afin de respecter les critères de confinement établis lors de la phase d'instrumentation sur l'avenue des Érables, les moules sont remplis en trois couches d'égale épaisseur à l'aide du matériau de confinement formulé en laboratoire. Chaque couche est compactée à la main ou mécaniquement, suivant le degré de compacité visé. Enfin, l'instrumentation de chaque éprouvette est faite à l'aide d'une sonde WCR et de trois thermocouples, lesquels sont positionnés sur le haut d'une première couche de matériaux compactée de 50 mm (*Voir* Figure 2.2). La procédure détaillée d'instrumentation utilisée pour la confection de chaque éprouvette est donnée en Annexe I.

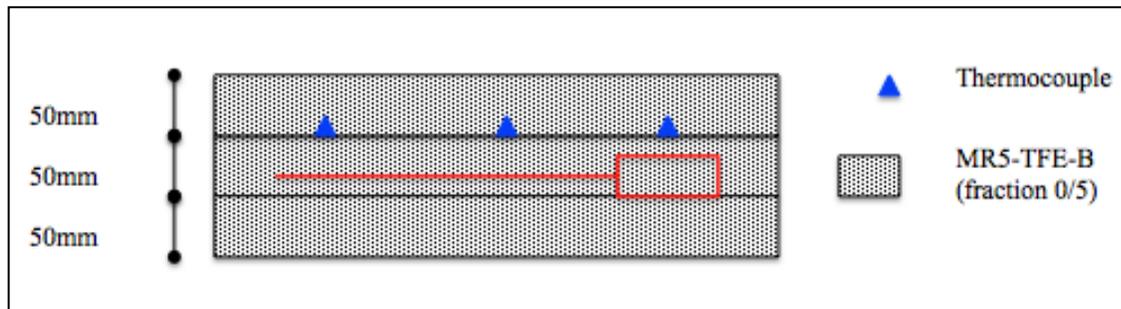


Figure 2.2 Schématisation du positionnement des sondes dans une éprouvette instrumentée (coupe transversale)

En fonction des besoins propres à chaque essai réalisé dans le cadre de notre programme expérimental, des éprouvettes sont créées ou modifiées. Le but étant de faire varier certaines caractéristiques physiques propres au matériau de confinement d'une éprouvette à l'autre, telle que sa teneur en eau ou encore sa porosité.

2.2.2 Étude de l'effet de la température et la porosité sur la réponse des sondes WCR

2.2.2.1 Effet de la température

Le fait que la température puisse influencer sur la période enregistrée par les sondes WCR de type CS616 a clairement été souligné dans la littérature. Ainsi, le fabricant lui-même propose une équation de correction permettant de prendre en compte l'effet de la température. Cependant, il met en garde, cette équation de correction est propre au milieu étudié lors de son établissement. Elle n'est donc en rien adaptée à l'étude des matériaux recyclés traités à l'aide d'une émulsion de bitume. Dans le cadre de ce projet, une exploitation rigoureuse des données enregistrées in-situ dans le matériau MR5-TFE-B par deux sondes WCR, nécessite donc que l'effet de la température sur la mesure des sondes dans le matériau de confinement soit étudié au préalable en laboratoire. Une manière efficace d'étudier ce

phénomène consiste à faire varier la température au sein d'une éprouvette instrumentée tout en fixant la teneur en eau et la porosité.

Dans cette optique, nous avons choisi de comparer la période enregistrée en fonction de la température, par une même sonde WCR, suivant cinq conditions de teneurs en eau distinctes. Pour chacune de ces conditions, un cycle de variation de la température est réalisé. Chaque cycle se décompose en trois à cinq paliers de température qui sont successivement visés et stabilisés dans une étuve à température contrôlée, où sont placées les éprouvettes parfaitement scellées. Lorsque les trois thermocouples installés dans le matériau de confinement nous confirment que la température d'un palier est atteinte dans l'éprouvette, la période mesurée par la sonde WCR installée dans ce même matériau de confinement est enregistrée. Il est ensuite possible de passer au palier de température suivant. Pour chaque cycle, nous sommes alors en mesure de tracer l'évolution de la période enregistrée aux différents paliers en fonction de la température.

En vue d'étudier l'effet de la température pour différentes teneurs en eau, une solution intéressante consiste à fabriquer un corps d'épreuve suivant une porosité donnée en partant de la teneur en eau la plus élevée soit, celle mesurable à la compaction de l'éprouvette. Dans un premier temps, une seule éprouvette de teneur en eau et de porosité connue est donc confectionnée. Une fois son cycle de variation de la température réalisé, cette éprouvette peut être modifiée par abaissement de sa teneur en eau tout en conservant sa porosité. Afin d'obtenir cinq conditions de teneur en eau distinctes, ce processus est répété à quatre reprises.

Ainsi, une première éprouvette instrumentée est fabriquée. La teneur en eau massique du matériau de confinement est fixée lors de la formulation en laboratoire puis est validée par une application de la méthode LC26-250 (Détermination de la teneur en eau) à partir d'un échantillon du matériau qui est prélevé après malaxage. Par ailleurs, dans la perspective d'étudier exclusivement l'influence de la teneur en eau sur la lecture des sondes, la porosité de l'éprouvette est fixée par le compactage et est mesurée ultérieurement, lors de la destruction de celle-ci, par pesée hydrostatique.

Finalement, après une pesée de l'éprouvette instrumentée fraîchement confectionnée, cette dernière est parfaitement scellée à l'aide d'une pellicule de plastique et de cire de paraffine. Le but étant de garantir que la teneur en eau reste constante au sein de la zone de confinement au cours du cycle de variation de la température (*Voir Annexe II*). Un délai de 72 heures est par la suite systématiquement respecté pour permettre une stabilisation de la teneur en eau au sein du corps d'épreuve avant la réalisation d'un cycle de variation de température. Ce délai a été jugé suffisant par la lecture des mesures stabilisées de la sonde et des thermocouples.

Le cycle de variation de température terminé, il s'agit de modifier l'éprouvette instrumentée en abaissant sa teneur en eau. À cet égard, l'éprouvette est dé-scellée. Placée sur la tranche, son fond amovible est retiré pour permettre un séchage du matériau de confinement plus homogène. Afin de quantifier la perte en eau du matériau de confinement lors de cette étape de séchage, l'éprouvette est pesée. Après une perte de masse significative (2% à 3% d'eau), le corps d'épreuve est à nouveau scellé en vue de réaliser un nouveau cycle de variation de la température.

2.2.2.2 Effet de la porosité

Deuxième facteur d'influence analysé dans ce projet, la porosité constitue la donnée la plus complexe à étudier. En effet, contrairement à la température dans la planche d'essai qui est enregistrée à toutes les heures et, à la teneur en eau initiale du matériau de confinement qui a été mesurée en laboratoire après échantillonnage in-situ, les taux de compaction des deux zones de confinement créée dans la couche de MR5-TFE-B de la chaussée demeurent inconnus. Un critère qu'il est pourtant possible d'évaluer en notant la masse précise de matériau utilisée pour remplir le volume de confinement puis, en déterminant, en laboratoire, la densité maximale du matériau de confinement échantillonné in-situ.

Bien qu'une reproduction exacte en laboratoire de la porosité du matériau utilisé in-situ pour former la zone de confinement ne soit donc pas possible, une étude de l'effet de la porosité

sur la réponse des sondes est, quant à elle, tout à fait réalisable. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser trois essais basés sur l'utilisation d'éprouvettes instrumentées de porosité distincte mais de teneur en eau relativement identique. Les essais développés dans le cadre de notre programme expérimental, consistent à réaliser, comme dans l'étude précédente, des cycles de variation de la température. De cette manière, nous sommes en mesure de comparer, pour différents paliers de température visés et atteints, la période mesurée dans les trois corps d'épreuve de porosités différentes.

La stratégie mise au point pour étudier l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR prévoit la réalisation de trois éprouvettes instrumentées dont seule la porosité varierait. Ainsi, la méthode utilisée pour confectionner les trois corps d'épreuve nécessaire à la réalisation des essais ne varie que sur le choix du mode de compactage puisque la sonde, les thermocouples et la formulation du matériau de confinement utilisés, restent les mêmes d'une éprouvette à l'autre. À cette fin, deux éprouvettes ont été compactées manuellement pour parvenir à des taux de compaction dits faible et intermédiaire puis, la troisième éprouvette a été réalisée à l'aide d'un compacteur de plaque MLPC afin d'atteindre un taux de compaction plus élevé. Les protocoles de compactage mis en œuvre pour la confection des corps d'épreuve sont présentés en Annexe I.

À l'instar de l'étude précédente, la méthodologie retenue pour évaluer l'effet de la porosité sur la mesure des sondes consiste à fixer les autres facteurs susceptibles d'influer sur cette mesure, à savoir ; la teneur en eau et la température du matériau de confinement. Dans cette optique, une même teneur en eau est visée dès la formulation du matériau de confinement destiné à former les trois corps d'épreuves. Puis, chaque éprouvette est scellée après compactage et une mesure de la teneur en eau par échantillonnage du matériau de confinement est réalisée. Enfin, le contrôle du facteur température se fera, quant à lui, en cours d'essai grâce à la consigne de l'enceinte à température contrôlée et aux réponses des trois thermocouples placés dans le matériau de confinement.

2.3 Phase III : Exploitation des mesures in-situ

2.3.1 Introduction

La phase III de ce projet de recherche vise à traduire les mesures des sondes d'humidité mises en place dans la planche d'essai en vue de connaître l'évolution de la teneur en eau au sein de la couche de matériau étudié. Pour ce faire, nous avons choisi d'exploiter les mesures réalisées à l'aide d'un modèle d'étalonnage issu de nos essais menés en laboratoire puis de valider ces résultats par des prélèvements de matériau in-situ.

2.3.2 Analyse de l'évolution de la teneur en eau

L'exploitation des mesures réalisées in-situ est rendue possible dans la phase III à partir des résultats issus de la phase II. En effet, si le constructeur des sondes d'humidité propose un modèle pour traiter les données collectées dans la planche d'essai, une analyse rigoureuse de ces mesures nécessite l'emploi d'un modèle adapté au matériau étudié. Les connaissances acquises, via le programme d'essai en laboratoire, sur le fonctionnement des sondes et les caractéristiques du matériau de confinement doivent donc être exploiter afin de traiter au mieux les mesures in-situ. Pour ce faire, un modèle d'étalonnage prenant en compte l'effet de la température sur la réponse des sondes a été développé.

2.3.3 Validation des résultats

La conclusion de notre projet de recherche consiste à s'assurer de la cohérence de la teneur en eau mesurée à l'aide des sondes d'humidité. Pour ce faire, des échantillons du matériau étudié sont prélevés in-situ pour une mesure de leur teneur en eau en laboratoire. De cette manière, nous sommes en mesure de valider la stratégie expérimentale développée à travers ce projet et de proposer d'éventuels ajustements.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Réalisation d'une planche d'essai

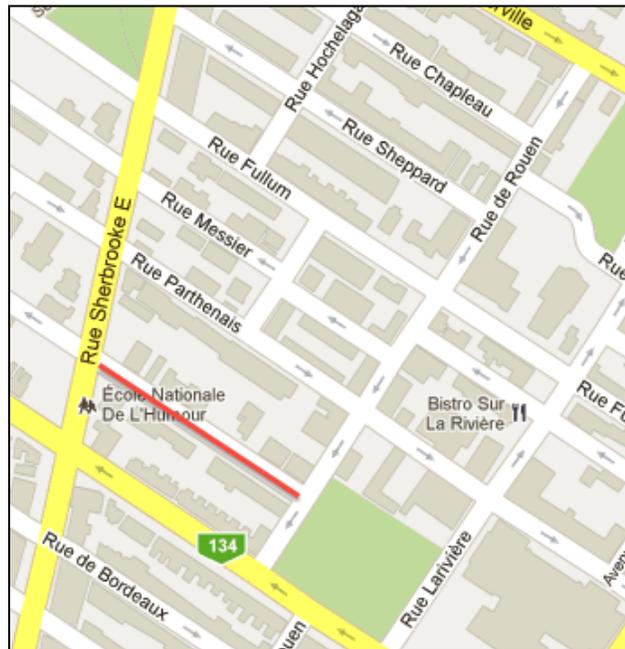


Figure 3.1 Localisation de la planche d'essai
avenue des Érables à Montréal (QC)
Tiré de GoogleMap

Dans le cadre de ce projet de recherche, une planche d'essai permettant l'instrumentation de deux couches de matériaux TFE de type MR5 confectionnés en centrale, dans une chaussée bitumineuse a été réalisée à l'automne 2010. Située sur l'avenue des Érables à Montréal (QC) entre les rues Sherbrooke et de Rouen (Voir Figure 3.1), la section de chaussée instrumentée pour cette planche d'essai a la structure suivante :

- une sous-fondation en matériau recyclé traité à froid à l'aide d'une émulsion de bitume (MR5-TFE-A) de 24 cm d'épaisseur,

- une fondation en matériaux recyclés traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume (MR5-TFE-B) de 20 cm d'épaisseur,
- une couche de liaison d'enrobé semi-grenu ESG-10 de 5 cm d'épaisseur,
- une couche de roulement d'enrobé de correction EC-10 de 4 cm d'épaisseur.

L'instrumentation de cette chaussée à l'aide de trois sondes WCR de type CS616 ainsi que de trois thermocouples a été réalisées sur plusieurs niveaux. Une première sonde a ainsi été mise en place dans le bas de la couche de MR5-TFE-A puis les deux autres sondes ont été installées dans le bas et dans le haut de la couche de MR5-TFE-B. En outre, nous avons cherché à positionner l'axe des tiges de chaque sonde à environ 6 cm de l'interface adjacente (Voir Figure 3.2), une distance jugée suffisante pour éviter toute interférence dans les mesures.

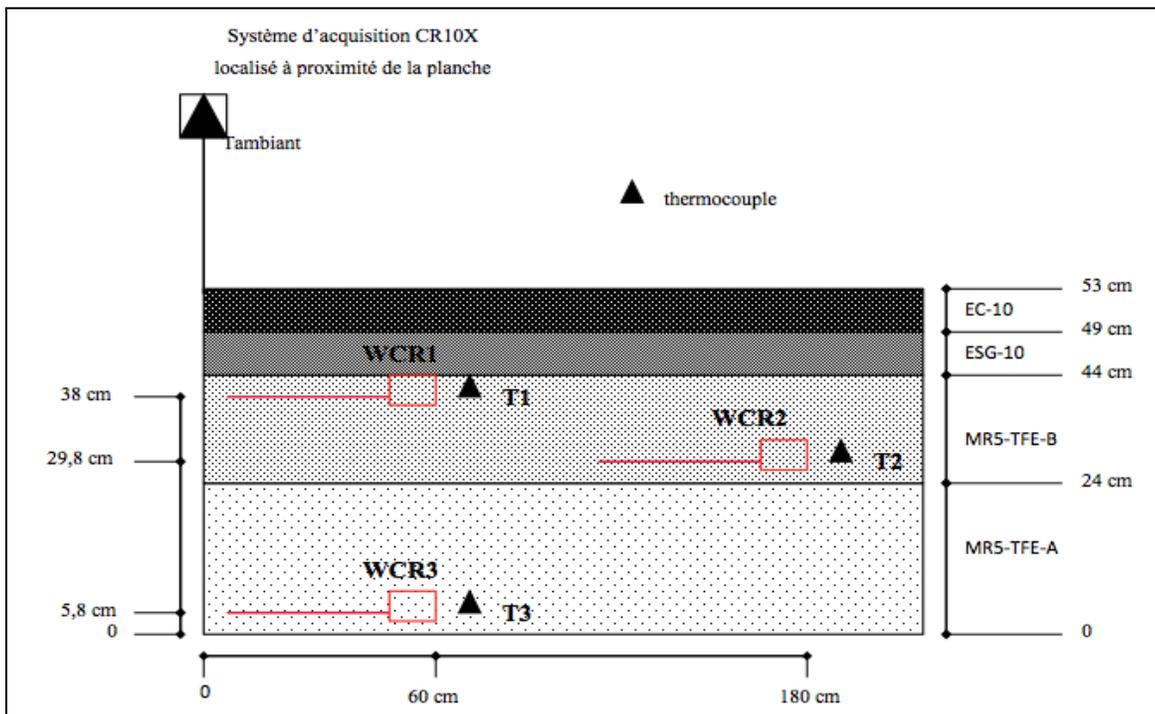


Figure 3.2 Schéma du positionnement des sondes WCR et des thermocouples dans la chaussée bitumineuse instrumentée dans le cadre de la planche d'essai avenue des Érables (coupe transversale)

3.1.1 Notion de zone de confinement

La mise en place d'une sonde d'humidité (WCR de type CS616) dans une couche de MR5-TFE, comme cela a été le cas dans ce projet, soulève plusieurs problématiques. En effet, les matériaux recyclés (MR) sont principalement constitués de particules grossières (GNM >14mm). Or, la taille des particules représente un obstacle majeur lors de la mise en place d'une sonde ; l'espacement entre les tiges de la sonde étant de 32mm et ces dernières doivent être maintenues parallèles sous peine de fausser la mesure. Sans précaution préalable, l'instrumentation de ce type de matériau à l'aide d'une sonde d'humidité de type WCR est donc ponctuée d'incertitudes. Une solution intéressante consiste à placer la sonde dans un volume spécifique, une zone de confinement, constitué du matériau MR5-TFE mais tamisé (fraction 0/5).

Ce volume a été cerné en égard aux conclusions de Blonquist *et al.* (2005) qui ont cherché à déterminer le volume de la zone d'influence autour des tiges de la sonde. Ce volume est défini à l'aide d'un modèle informatique développé par Jones *et al.* (2002) en fonction de la densité de l'onde électromagnétique émise. Dans le cas d'une sonde WCR de type CS616, comme celles utilisées dans ce projet, la zone d'influence est évaluée à 40cm³ autour de la sonde. Cette zone étant très restreinte, nous n'avons eu aucune difficulté à établir un volume de confinement approprié au sein des couches de la structure de la chaussée instrumentée. En effet, avec un volume défini de 40x7x4cm³, la zone de confinement qui accueille chaque sonde respecte largement les conditions de non-interférence.

Enfin, comme expliqué plus haut, le matériau utilisé pour recouvrir la sonde dans son volume de confinement est constitué d'une fraction 0/5, lequel est obtenu par tamisage in-situ du MR5-TFE au moment de la mise en place des sondes. Il est clair cependant, que cette façon de faire va interférer sur les mesures de teneurs en eau. En effet, la teneur en eau de la fraction fine de MR5-TFE est inévitablement plus élevée que celle de la fraction globale, une affirmation qui a par ailleurs été vérifiée par la mesure de la teneur en eau sur des échantillons de MR5-TFE prélevés in-situ (avant et après tamisage) lors de l'instrumentation

(Voir Tableau 3.6). Ce facteur devra donc être pris en compte lors de la phase d'essai en laboratoire puis dans l'exploitation des données de la planche d'essai.

3.1.2 Mesure de la température à proximité des sondes

La littérature met également en évidence l'influence de la température sur les mesures d'humidité des sondes WCR de type CS616. Ainsi, Benson et Wang (2006) ont mis en évidence qu'une correction de la période enregistrée par la sonde en fonction de la température au sein du matériau est nécessaire à l'obtention d'une mesure juste de la teneur en eau. Il est donc indispensable de mesurer la température à proximité de la sonde lors d'une instrumentation in-situ. Dans cette optique, un thermocouple a été placé à proximité de chaque sonde afin de permettre une mesure en continue de l'évolution de la température dans de la structure de la chaussée. Un thermocouple positionné à l'air libre nous renseigne également sur la température ambiante au chantier.

3.1.3 Étapes de mise en place des sondes

Compte tenu de la rigueur nécessaire à la mise en place des sondes afin d'assurer la qualité et la fiabilité des mesures, la phase d'instrumentation a été divisée en 5 étapes, soit : 1) tamisage, 2) réalisation, 3) préparation de la zone de confinement, 4) positionnement et, 5) remblaiement de la tranchée. Compte tenu de l'importance de ces différentes phases, nous présentons ci-après les grandes lignes qui nous ont conduit à l'implantation des sondes dans la structure de la chaussée instrumentée.

Tamisage - Le tamisage vise à séparer les particules fines (passant 5mm) du matériau MR5-TFE afin d'obtenir le matériau de confinement pour le remblaiement de la sonde. Le matériau MR5-TFE est échantillonné à partir des camions de livraison avant d'être tamisé. Afin d'éviter toute perte d'eau du matériau entre la phase de tamisage et sa mise en place dans la zone de confinement, chaque échantillon tamisé est placé dans un sac plastique fermé hermétiquement le temps de collecter le volume de matériau nécessaire au remplissage de la zone de confinement (Voir Figure 3.3).



Figure 3.3 a) Tamisage du matériau MR5-TFE en chantier;
b) Fraction 0/5 du matériau MR5-TFE tamisé

Réalisation d'une tranchée par excavation - Le protocole défini pour la mise en place des sondes prévoit ensuite d'excaver une zone d'environ 1m^2 dans la couche de MR5-TFE fraîchement posé et compacté lors des opérations de pavage. Une cavité est donc réalisée dans la couche mise en œuvre jusqu'à la profondeur préalablement choisie pour le placement de la sonde WCR et du thermocouple. La Figure 3.4 montre le traçage en surface de la couche fraîchement compactée de la zone à excaver. La Figure 3.5 présente quant à elle l'opération d'excavation qui précède la mise en place de la sonde dans le bas de la couche de MR5-TFE. Le matériau MR5-TFE excavé, foisonné, est placé à proximité de la tranchée et recouvert d'un polythène (*Voir* Figure 3.6).



Figure 3.5 Excavation d'une surface d'environ 1m² jusqu'à la profondeur prédéfinie pour le positionnement de la sonde d'humidité



Figure 3.4 Délimitation de la zone d'instrumentation dans la couche fraîchement compactée



Figure 3.6 Protection du matériau excavé à l'aide d'un polythène

Préparation de la zone de confinement - La création de la zone de confinement où est positionner la sonde est la phase critique du processus de mise en place. De manière à s'assurer de bien circonscrire cette zone, un gabarit de bois (40x7x4cm³) est positionné dans la cavité à l'emplacement prévu pour la sonde (Voir Figure 3.7 a)) . Le remblaiement de la zone excavée sur une épaisseur de 4 cm avec le matériau MR5-TFE est alors réalisée en positionnant le gabarit avant de compacter la couche à l'aide d'une plaque vibrante (Voir Figure 3.7. b)). Après compactage, le gabarit peut être minutieusement retiré, laissant alors

apparaître l’empreinte de la zone de confinement qui permettra le positionnement de la sonde (Voir Figure 3.7 c) et d)).



Figure 3.7 Réalisation de la zone de confinement dans la couche fraîchement mise en place

Positionnement de la sonde - Avant de positionner la sonde, il s’agit dans un premier temps de vérifier la conformité des dimensions de la zone de confinement (Voir Figure 3.8). La sonde doit être mise en place avec précaution pour éviter de l’endommager (Voir Figure 3.9). Il faut s’assurer d’avoir un contact optimal entre le MR5-TFE de confinement (fraction 0/5)

et les tiges de la sonde. Avant de positionner la sonde, une première couche de MR5-TFE tamisé (fraction 0/5 du mélange) est alors placée au fond de l’empreinte sur une épaisseur de 10 mm et compactée à l’aide d’un dameur manuel. La sonde est ensuite déposée sur cette couche puis recouverte progressivement du même matériau (MR5-TFE tamisé) (Voir Figure 3.10). Un bourroir est aussi utilisé pour consolider le matériau au pourtour des tiges de manière à éviter la formation de vides. Finalement, la zone de confinement est compactée manuellement avec précaution à l’aide d’un dameur à main (Voir Figure 3.11).



Figure 3.8 Vérification de la profondeur de la zone de confinement



Figure 3.9 Mise en place de la sonde



Figure 3.8 Recouvrement de la sonde avec le matériau de confinement (fraction 0/5 de MR5-TFE)

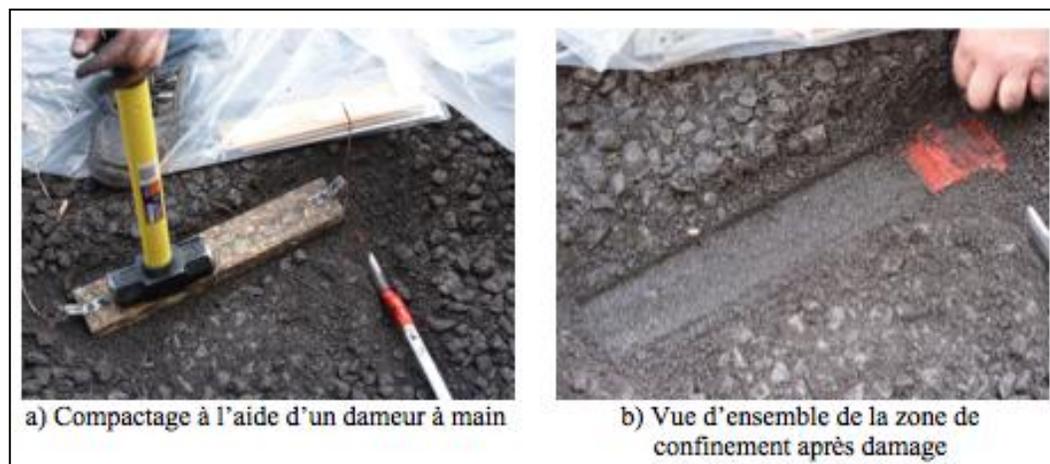


Figure 3.9 Compactage de la zone de confinement après mise en place de la sonde d'humidité

Remblaiement de la tranchée - Avant de procéder au remblai de la zone confinée avec le MR5-TFE préalablement excavé et conservé sous plastique, un thermocouple

est installé à proximité de la sonde (Voir Figure 3.12). Le remblaiement de la tranchée se fait suivant trois couches d'égale épaisseur. À chacune des couches, le MR5-TFE est remis en place et soigneusement compacté à l'aide d'une plaque vibrante. Après la mise en place et le compactage à la plaque de la dernière couche de remblai de la tranchée, plusieurs passes du rouleau compacteur permettent d'assurer une compaction finale de finition sur pleine épaisseur de la couche de la zone excavée.

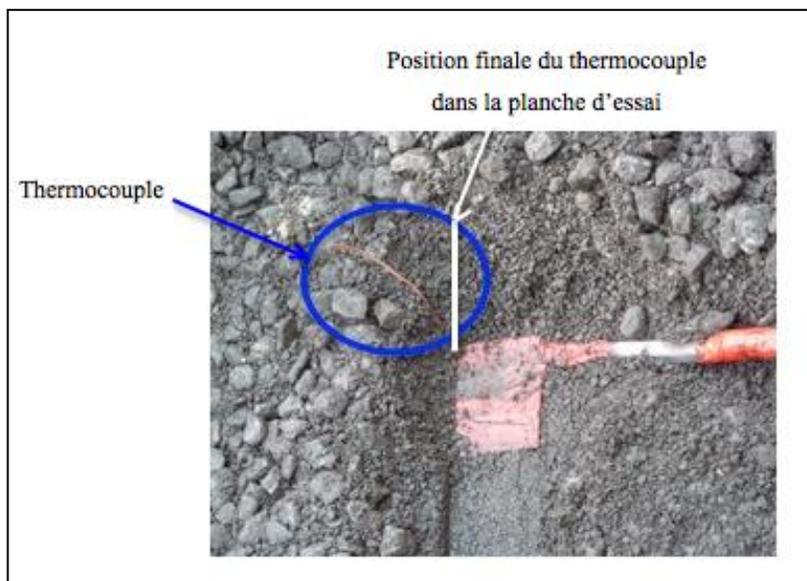


Figure 3.10 Positionnement du thermocouple à proximité de la tête de la sonde

Dans le cadre de l'instrumentation de l'avenue des Érables, deux couches de la structure de la chaussée ont ainsi été instrumentées à l'aide de 3 sondes d'humidité WCR et de 3 thermocouples. Les sondes, placées à trois différents niveaux de la structure de la chaussée (Voir Figure 3.2) ont été orientées dans le sens de la circulation à 3,50m du trottoir. Le câblage des sondes est protégé par des gaines en PVC rigides enfouies dans le MR5-TFE et reliés à un système d'acquisition CR10X placé à proximité du site, permettant un enregistrement en continu.

3.2 Reconstitution du matériau de confinement en laboratoire

Dans la perspective de développer un protocole rigoureux de laboratoire en vue d'étalonner les différentes sondes d'humidités, nous avons choisi, dans le cadre de ce mémoire, de centrer nos travaux au cas du matériau MR5-TFE-B pour lequel deux sondes ont été placées dans la structure de la chaussée de l'avenue de Érables (*Voir* Figure 3.2).

Un des aspects critique de l'étalonnage des sondes demeure la reconstitution du MR5-TFE de confinement en laboratoire. En effet, les matériaux traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume ont des propriétés évolutives fortement tributaires des conditions ambiantes. On ne peut pas, comme c'est le cas pour les enrobés à chaud, prélever des échantillons lors de la mise en œuvre en chantier d'une couche de la chaussée pour en étudier à postériori les caractéristiques en laboratoire. À la mise en place d'un tel matériau, on ne dispose en tout et pour tout que de 3 heures pour la confection d'un corps d'épreuve (données du constructeur). Au delà de cette période la rupture de l'émulsion est plus que probable et la réalisation d'éprouvettes après coup n'est pas représentative du matériau mis en place en chantier.

Par ailleurs, le fait de travailler à partir de matériaux recyclés issus du décohesionnement de la structure d'une chaussée complexifiée également la reconstitution du matériau traité en laboratoire. Ainsi, une caractérisation stricte de l'agrégat recyclé composant le matériau MR5-TFE est indispensable pour s'assurer d'une reproduction fidèle du matériau de confinement. Pour cela, en parallèle de la réalisation de la planche d'essai, un échantillonnage de masse de l'agrégat recyclé a été effectué sur le site de production en centrale du MR5-TFE de l'entrepreneur responsable de la mise en œuvre du matériau sur l'avenue des Érables.

Avant de traiter en détail de la formulation du MR5-TFE-B, nous présenterons sommairement les étapes liées à l'échantillonnage des matériaux (agrégats : MR) au site de production et les méthodes retenues pour l'entreposage et la préparation des échantillons utilisés pour la confection des gâchées de laboratoire.

3.2.1 Caractérisation du MR5 utilisé pour la confection du MR5-TFE-B

3.2.1.1 Échantillonnage et préparation du MR5

Le MR5 utilisé pour la confection du MR5-TFE-B est constitué au tiers d'agrégats d'enrobé et aux deux tiers d'agrégats de béton (*Voir* Tableau 1.1 pour la classification des MR). La nature peut conventionnelle de ce MR est l'une des problématique liée à la reconstitution du MR5-TFE-B en laboratoire. Afin d'en étudier les propriétés et de permettre la reconstitution du MR5-TFE-B en laboratoire, des échantillons de MR5 ont été donc prélevés en centrale.

Huit barils de 200L chacun, ont été remplis d'agrégats recyclés (MR) à l'aide d'une pelle mécanique à partir des piles d'entreposage à la fabrication du mélange mis en œuvre sur l'avenue des Érables. Le MR5, collecté humide, a dans un premier temps été séché à 50°C pendant 48 heures. Pour faciliter la reconstitution des matériaux en laboratoire et de manière à limiter la variabilité des mélanges, nous avons convenu de séparer et d'entreposer le MR5 échantillonnés suivant quatre fractions distinctes, soit : 0/2,5 ; 2,5/5 ; 5/10 et 10/14 (*Voir* Figure 3.13).



Figure 3.11 Séparation du MR5 en quatre classes granulométriques en vue d'une reconstitution

Suite à la séparation du MR, nous avons déterminé la granularité des différentes fractions suivant la norme LC21-040 (Analyse granulométrique), telle que présentée au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Distribution des différentes classes granulométriques du MR5 utilisé pour la confection du matériau MR5-TFE-B mis en œuvre avenue des Érables

		Pourcentage passant (%)			
		(0/2,5)	(2,5/5)	(5/10)	(10/14)
Tamis (mm)	28	100	100	100	100
	20	100	100	100	100
	14	100	100	100	44,9
	10	100	100	100	1,3
	5,0	100	100	2,8	0,8
	2,5	99	6,9	0,4	0,7
	1,25	72	3,0	0,4	0,7
	0,630	52	3,0	0,4	0,7
	0,315	33	2,7	0,4	0,7
	0,160	17	2,1	0,4	0,7
	0,080	9,0	1,5	0,4	0,6
	Plat	0	0	0,2	0,5

Cette séparation du MR5 en différentes fractions granulaires sera, entre autres, très utile pour la reconstitution granulométrique, en laboratoire, du MR5-TFE-B mis en place avenue des Érables.

Par ailleurs, dans l'optique d'une caractérisation globale du MR5 en vue d'une reconstitution en laboratoire du MR5-TFE-B, des mesures de la densité, de l'absorption et de la teneur en bitume du MR5 ont également été réalisées en laboratoire. En outre, afin de s'assurer de l'homogénéité des résultats de ces mesures, il est préférable de travailler sur un échantillon global de l'agrégat (fraction 0/14) et non sur les classes granulaires précédemment définies. Pour ce faire, le contenu de l'un des huit barils échantillonnés sur le site de production a été choisi arbitrairement comme étant représentatif de l'agrégat recyclé échantillonné. Enfin, dans la perspective d'obtenir des échantillons homogènes pour la réalisation des essais,

l'intégralité du contenu du baril a été réduit par quartage puis à l'aide d'un séparateur mécanique selon la norme LC21-015 (Réduction des échantillons pour essais en laboratoire).

3.2.1.2 Caractérisation du MR5

Une fois l'étape d'échantillonnage terminée, la caractérisation en laboratoire du MR5 recyclé peut être réalisée. Les données résultant des essais effectués sur le MR5, et présentées ci-dessous (*Voir* Tableau 3.2 et Tableau 3.3), constituent un point essentiel du protocole de reproduction en laboratoire du matériau MR5-TFE-B. Ces résultats seront analysés plus loin dans ce mémoire, lors de la phase de formulation en laboratoire du matériau mis en œuvre in-situ.

Mesure de la densité et de l'absorption

En conformité avec les normes LC21-066 (Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin de classe d/D) et LC21-067 (Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat), la densité et l'absorption du MR5 ont été mesurées en laboratoire. Le Tableau 3.2 récapitule les résultats obtenus.

Tableau 3.2 Résultats des mesures de densité d'absorption sur le MR5

	F.G retenu 5mm	F.F passant 5mm	Total
Fraction (%)	48%	52%	100%
Densité brute sèche (d_b ou d_{gb})	2,395	2,266	2,327
Densité apparente (d_{app}) (g/cm^3)	2,594	2,630	2,613
Densité saturée superficiellement	2,471	2,404	2,437
Absorption (%)	3,2	6,1	4,7

Mesure de la teneur en bitume

La mesure de la teneur en bitume du MR5, qui rappelons-le contient 30% d'agrégat d'enrobé, a été réalisée par extraction selon le respect de la norme LC26-100 (Détermination de la teneur en bitume). Le Tableau 3.3 présente les résultats issus des essais d'extraction.

Tableau 3.3 Résultats des essais d'extraction de bitume sur le MR5

	Fraction	Teneur en bitume
MR5 : global (0/14)	100%	1,44%
MR5 : fraction grossière (5/14)	37%	1,30%
MR5 : fraction fine (0/5)*	63%	1,60%

*matériau de confinement recouvrant la sonde in-situ

3.2.2 Étude du matériau MR5-TFE-B

3.2.2.1 Échantillonnage in-situ

Comme souligné précédemment, les propriétés évolutives des matériaux traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume posent des restrictions à l'étude du matériau en laboratoire. Afin d'étudier les propriétés du matériau MR5-TFE-B, un échantillonnage à partir des camions de livraison a été réalisé lors de l'instrumentation de l'avenue des Érables. Trois portions égales et représentatives du matériau ont donc été prélevées avant sa mise en œuvre puis placées dans des sacs fermés hermétiquement pour éviter toute perte d'eau. Une fois au laboratoire, les échantillons sont réduits selon la norme LC21-015 (Réduction des échantillons pour essais en laboratoire) avant d'être utilisés pour différents essais.

3.2.2.2 Mesure de la teneur en bitume et granularité du MR5-TFE-B (avant et après extraction)

Bien que la rupture de l'émulsion ait eu lieu entre le moment de l'échantillonnage en chantier et l'étape de réduction des échantillons en laboratoire, la teneur en bitume du matériau ainsi que sa granularité sont toujours représentatives du mélange de MR5-TFE-B mis en place en

chantier. Ces essais peuvent donc être menés selon le respect de normes LC26-100 (Détermination de la teneur en bitume) et LC21-040 (Analyse granulométrique). La synthèse des résultats est donnée aux Tableaux 3.4 et 3.5. Ces caractéristiques seront utiles à la reconstitution en laboratoire du MR5-TFE-B mis en place en chantier.

Tableau 3.4 Résultats des essais d'extraction de bitume sur le mélange MR5-TFE-B échantillonné in-situ

	Fraction	Teneur en bitume
MR5-TFE-B : global (0/14)	100%	2,50%
MR5-TFE-B : fraction grossière (5/14)	41%	1,10%
MR5-TFE-B : fraction fine (0/5)*	59%	3,45%

*matériau de confinement recouvrant la sonde in-situ

Tableau 3.5 Résultats des analyses granulométriques, réalisées avant et après extraction du bitume, sur le matériau MR5-TFE-B échantillonné in-situ

		Distribution granulométrique du MR5-TFE-B avant extraction du bitume			Distribution granulométrique du MR5-TFE-B après extraction du bitume		
		(F.G ≥5mm)	(F.F <5mm)	(0/14)	(F.G ≥5mm)	(F.F <5mm)	(0/14)
		% Passant cumul.	% Passant cumul.	% Passant cumul.	% Passant cumul.	% Passant cumul.	% Passant cumul.
Tamis (mm)	40,0	100		100	100		100
	28,0	100		100	100		100
	20,0	100		100	100		100
	14,0	93		97	95		98
	10,0	61		83	68		85
	5,0	0	100	56	10,5	100	59
	2,5		65	38		75	44
	1,250		38	24		54	33
	0,630		21	15		39	25
	0,315		10	7		24,5	16
	0,160		5	3		15	10
	0,080		2,2	1,6		8,6	5,0
	Plat		0	0		0	0
Proportions (%)		44%	56%	100%	41%	59%	100%
GNM		14mm	5mm	14mm	14mm	5mm	14mm

Mesure de la teneur en eau initiale à la mise en œuvre du matériau MR5-TFE-B

La connaissance de la teneur en eau du matériau MR5-TFE-B au moment de sa mise en place in-situ est une donnée essentielle à la bonne réalisation de ce projet. En effet, dans la perspective d'exploiter les mesures des sondes d'humidité placées dans la planche d'essai, il est indispensable de connaître la teneur en eau initiale du matériau. Les mesures de teneurs eau réalisées en laboratoire selon la norme LC26-250 (Détermination de la teneur en eau) permettent ainsi de définir la teneur en eau massique de la fraction globale (0/14) du matériau MR5-TFE-B à sa mise en œuvre, mais également celle de la fraction fine (passant 5mm) qui constitue le matériau de confinement de la sonde. La période initiale mesurée en chantier par

chaque sonde après leur mise en place peut donc être associée à la teneur en eau réelle, mesurée par essai en laboratoire, du matériau de confinement correspondant. Les résultats des ces mesures sont présentées dans le Tableau 3.6 :

Tableau 3.6 Résultats des mesures de teneurs en eau réalisées sur les matériaux MR5-TFE-B échantillonné in-situ

	Matériau de confinement : MR5-TFE-B fraction fine (0/5)	MR5-TFE-B fraction grossière (5/14)	MR5-TFE-B fraction globale (0/14)
Fraction	42%	58%	100%
ρ_s (g/cm³)	1,625	Non mesuré	Non mesuré
Teneur en eau massique : w(%)	14,0%	8,2%	10,2%
Teneur en eau volumique : θ(%)*	22,8%	—	—

* $\theta(\%) = d_s \times w(\%)$

3.2.3 Formulation du matériau de confinement en laboratoire

3.2.3.1 Introduction

Dans la perspective de reconstituer en laboratoire les propriétés environnantes de chaque sonde pour une exploitation à posteriori des données enregistrées in-situ, une reproduction fidèle de la zone de confinement est indispensable. Cela implique tout d'abord de formuler en laboratoire un matériau de confinement similaire à celui utilisé en chantier pour recouvrir les sondes puis, de recréer physiquement la zone de confinement instrumentée.

Afin de reconstituer fidèlement le matériau de confinement en laboratoire, une confrontation des propriétés de l'agrégat et du matériau de confinement est alors nécessaire.

Teneur en bitume

Les résultats des essais d'extraction de bitume réalisés en laboratoire sur le MR5 et sur le matériau MR5-TFE-B ont été présentés dans les Tableaux 3.3 et 3.4. Ils mettent en évidence que la teneur en bitume de la fraction fine (passant 5mm) du matériau de confinement est de 3,45% (*Voir* Tableau 3.4) alors que cette même fraction pour le MR5 contient seulement 1,60% de bitume (*Voir* Tableau 3.3). Dans l'optique de reproduire le matériau de confinement en laboratoire, le pourcentage de bitume résiduel d'ajout est donc de 1,85%. Sachant que la fraction de bitume résiduel dans l'émulsion (type CSS1-P) utilisée pour formuler le MR5-TFE-B est de 60% ($F_{BR-E}=60\%$), le pourcentage d'émulsion d'ajout nécessaire à la confection du matériau de confinement reconstitué est donc de 3,08% ($\%E=3,08\%$).

À titre informatif, la formulation utilisée par l'entrepreneur en charge de la production du matériau MR5-TFE-B suggère un pourcentage en bitume optimum de 3,05% pour la fraction globale (0/14) du matériau en considérant une teneur en bitume dans le MR5 de 1,25%. Cela correspond à un pourcentage d'émulsion d'ajout de 3,00%.

Teneur en eau

L'analyse en laboratoire des échantillons de MR5-TFE-B prélevés in-situ lors de la phase d'instrumentation ont également révélé une teneur en eau massique de 14,0% pour le matériau de confinement (MR5-TFE-B : fraction 0/5). L'objectif de ce projet étant d'exploiter les résultats des essais en laboratoire pour établir une corrélation entre la période des sondes installées dans la chaussée et la teneur en eau réelle du matériau, la teneur en eau du matériau de confinement mesurée à la mise en place des sonde (14,0%) constitue une donnée de référence qu'il faut chercher à reproduire en laboratoire.

Par ailleurs, la formulation en laboratoire d'un matériau recyclé traité à l'émulsion diffère d'une production en centrale par le fait que le MR doit être séché avant de procéder au mélange en laboratoire. En outre, afin d'éviter toute détérioration du bitume encore présent sur l'agrégat d'enrobé, la norme LC26-002 (Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion) préconise de sécher le MR5 à 50°C ou moins. Dans le cadre

de ce projet, le MR5 est donc toujours séché à l'étuve à 50°C pendant 48 heures avant d'être utilisé dans la formulation du matériau recyclé en laboratoire. De plus, un échantillonnage systématique de le MR5 séché à 50°C est réalisé afin de mesurer sa teneur en eau résiduelle, c'est-à-dire après séchage à 100°C. En effet, la vapeur d'eau se formant à 100°C, un séchage à 50°C implique qu'une partie de l'eau reste piégée dans le MR5 (environ 1%), plus particulièrement dans les pores de l'agrégat de béton. Ainsi, les mesures réalisées permettent d'ajuster la formulation en laboratoire pour atteindre la teneur en eau visée de 14,0%.

Granulométrie

Un dernier critère nécessaire à une reconstitution fidèle du matériau de confinement en laboratoire demeure la granularité de ce dernier. Le fait de tamiser le MR5-TFE en chantier pour utiliser la fraction fine (0/5) peut donner lieu à une modification significative des propriétés des constituants. En effet, bien que nous ayons pris soin de bien tamiser le MR5-TFE, il est possible que des particules fines ou des amas d'agrégat restent accolées aux grosses, modifiant ainsi la fraction minérale dans le MR5-TFE tamisé. Pour s'assurer d'obtenir en laboratoire une distribution granulométrique similaire à celle du matériau de confinement échantillonné au moment de la mise en place des sondes, une comparaison des granularités de la phase minérale après extraction de bitume, du MR5 et du matériau MR5-TFR-B tamisé (fraction 0/5) a été réalisée (*Voir* Tableau 3.7). Les résultats du Tableau 3.7 montrent un écart de granularité de la phase minérale entre les fractions 0/5 du MR5 et du matériau de confinement après extraction de bitume. Il semble que les écarts soient essentiellement liés à la fraction grossière des matériaux tamisés. En conséquent, la granulométrie de la phase minérale du MR5 (fraction 0/5) sera ajustée en laboratoire pour la reconstitution du matériau de confinement en laboratoire.

Tableau 3.7 Résultats des analyses granulométriques de la phase minérale réalisées sur le MR5 et le MR5-TFE-B tamisé après extraction du bitume

		Fraction fine (0/5)		
		% Passant après extraction		
		MR5 tamisé	MR5-TFE-B tamisé	Écart
Tamis (mm)	5	100	100	0
	2,5	28	25	3
	1,25	20	21	1
	0,63	15	15	0
	0,315	14	14	0
	0,16	10	10	0
	0,08	5,6	6,0	0,4
	Plat	0	0	0

Le calcul des proportions des composants nécessaires à la formulation en laboratoire du matériau de confinement est disponible en Annexe III.

3.3 Réalisation d'éprouvettes instrumentées pour évaluer l'influence de la température et de la porosité

Dans le cadre de ce projet, qui vise à mesurer la teneur en eau in-situ à l'aide de sonde d'humidité de type WCR, un programme d'essais en laboratoire a été développé. L'un des volets de ce programme est d'étudier l'effet de la température et de la porosité sur la réponse des sondes d'humidité. Pour cela, nous avons cherché à observer l'effet singulier de chaque facteur sur la mesure des sondes. Le détail des essais est présenté à la section 2.2. Le Tableau 3.8 regroupe l'ensemble des essais réalisés.

Tableau 3.8 Liste des essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche en fonction du paramètre étudié

MRS-TFE-B	Porosité (%)	Teneur en eau massique(%)	Température (°C)
	33,9%	14,3%	8 – 15 – 30 – 35 – 46
		11,8%	9,5 – 14 – 20 – 36 – 42
		9,5%	7,5 – 21 – 41,5
		6,0%	9 – 30 – 45
		2,3%	3,5 – 27 – 42,5
	31,0%	14,6%	8 – 15 – 25 – 33 – 43
		10,7%	4,5 – 35 – 44
		7,1%	4 – 35 – 45
		4,9%	3,5 – 36 – 46
2,7%		4,5 – 35 – 45	
26,4%	13,9%	10 – 23 – 34 – 43	

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

La stratégie développée via notre programme expérimental repose sur l'étude des facteurs susceptibles d'influencer la mesure des sondes WCR et de développer un modèle de correction. Dans cette optique, nous avons dans un premier temps cherché à évaluer la réponse des sondes à la présence d'eau. Les résultats de ces essais qui sont présentés par la suite ont pour objectif de nous aider à mieux appréhender le fonctionnement des sondes et également de nous fournir une première base d'information en vue de développer le modèle d'étalonnage des sondes WCR.

Par la suite, nous avons choisi de centrer nos travaux sur l'étude de deux facteurs environnant susceptibles d'influencer la réponse des sondes d'humidité WCR lorsqu'elles sont mises en place dans un matériau recyclé traité avec une émulsion de bitume, à savoir : 1) la température et, 2) la porosité du matériau. Dans la perspective de pouvoir, à termes, corriger les effets de ces facteurs sur la mesure de la période, nous avons développé deux séries d'essais en laboratoire dont les résultats sont présentés par la suite.

4.1 Résultats sur l'étude de la sensibilité des sondes à la présence d'eau

4.1.1 Longueurs effectives (L_{ef}) et temps de délais (t_d) des sondes WCR

Avant de nous intéresser à la sensibilité des sondes à la présence d'eau, rappelons que chaque sonde possède des caractéristiques qui lui sont propres : la longueur effective L_{ef} de ses tiges et le temps de délais t_d associé au temps perdu lors des changements d'états du circuit en cours de mesure. Comme expliqué dans la section 1.5.4, ces deux facteurs doivent être calculés en laboratoire (Éq (1.7)) afin de permettre une correction de la période mesurée par chaque sonde. De cette manière, un modèle d'étalonnage établi à partir d'une seule et même sonde peut être généralisé à d'autres sondes du même type.

Dans le cadre de ce projet, le programme expérimental en laboratoire a été mené à l'aide d'une seule sonde WCR de type CS616. La connaissance des caractéristiques L_{ef} et t_d propres aux sondes mises en place in-situ (Voir Annexe IV) nous a donc permis, par la suite, de corriger les périodes mesurées dans la planche d'essai avant de leur appliquer le modèle d'étalonnage développé en laboratoire et décrit dans le Chapitre 5.

4.1.2 Mesure de la période dans l'air et dans l'eau

Les sondes d'humidité WCR sont utilisées comme outil de mesure en continue de la teneur en eau d'un milieu. Cette technique non-destructrice repose sur le principe que la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu est influencée par la présence d'eau. En vue de développer en laboratoire un modèle d'étalonnage des sondes WCR propre au matériau recyclé traité, nous avons dans un premier temps procédé à l'étalonnage des sondes à température ambiante, dans deux milieux tests, à savoir, l'eau distillée et l'air. Le but étant de comparer la période mesurée dans chaque milieu par sept sondes WCR de type CS616 (dont trois ont été installées dans la planche d'essai à posteriori). Pour ce faire, les sondes sont successivement placées dans le milieu test à distance de tout élément pouvant influencer la propagation du signal et, fausser la mesure. Une attention particulière a été portée sur la neutralité électromagnétique du milieu dans lequel ont été réalisées les mesures, ainsi aucun élément métallique n'a été placé à proximité des sondes en cours d'essais. Après un délai de 5 minutes, défini arbitrairement pour permettre à la réponse de la sonde de se stabiliser, trois mesures successives de la période sont enregistrées à une minute d'intervalle. Évaluer la sensibilité des sondes WCR à la présence d'eau implique également de se questionner sur la capacité de sondes à détecter l'eau absorbée, c'est-à-dire l'eau piégée dans les pores des agrégats poreux. En effet, un granulat d'agrégats recyclés, un MR, comporte essentiellement deux grandes familles de pores : 1) la porosité du granulat (pores intergranulaires) : espaces vides remplis d'eau entre les particules et, 2) la porosité des particules du MR. Cette dernière est constituée des pores ouverts et fermés. La mesure de la teneur en eau donne en quelque sorte une mesure globale de l'eau d'un granulat, prenant en

compte indistinctement l'eau intergranulaire et l'eau absorbée. Par ailleurs, soulignons que dépendamment de la finesse des pores, une partie de l'eau absorbée peut nécessiter un temps de séchage plus significatif pour permettre son évaporation. En définitive, suivant un séchage de 48 heures à 50°C, il subsiste au sein du granulat une certaine quantité d'eau qui peut éventuellement être descellée par la sonde d'humidité.

En vue d'exploiter les résultats des essais en laboratoire pour mesurer la teneur en eau des MR5-TFE dans la chaussée de l'avenue des Érables, il est donc nécessaire de valider la fraction d'eau (libre et/ou absorbée) que la sonde peut détecter. Pour cela, deux échantillons de MR5 tamisés (fraction 0/5) ont été choisis comme matériaux témoins. L'utilisation de la fraction fine du MR5 permet de limiter la formation de vides autour des tiges de la sonde et s'avère plus représentative du matériau de confinement traité mis en œuvre in-situ. L'un des deux échantillons a été séché à 100°C pendant 24 heures, l'autre à 50°C pendant 48 heures. Soulignons qu'après un séchage de 24 heures à 100°C, nous assumerons à priori, que toute l'eau absorbée dans la porosité du MR, incluant l'eau plus ou moins absorbée à la paroi des pores, est évaporée. Les périodes enregistrées, à température ambiante, par les sept sondes WCR dans les deux échantillons ont ainsi été comparées. Les Tableaux 4.1 et 4.2 regroupent les résultats des essais dans l'air et dans l'eau :

Tableau 4.1 Périodes mesurées dans l'air à 23,0°C

	Mesures de période (µs)			Moyenne	Écart type	Étendue (µs)	Erreur relative*
Sonde 1	14,88	14,88	14,88	14,88		0,00	0,3%
Sonde 2	15,06	15,06	15,05	15,06		0,01	0,9%
Sonde 3	14,93	14,92	14,92	14,92		0,01	0,0%
Sonde 4	14,90	14,90	14,90	14,90		0,00	0,1%
Sonde 5	14,90	14,90	14,90	14,90		0,00	0,1%
Sonde 6	14,88	14,88	14,88	14,88		0,00	0,3%
Sonde 7	14,88	14,88	14,88	14,88		0,00	0,3%
Moyenne				14,92	0,065	0,18	

$$*Erreur\ relative = \left| \frac{valeur\ réelle - valeur\ approchée}{valeur\ réelle} \right|$$

Tableau 4.2 Périodes mesurées dans l'eau distillée à 22,8°C

	Mesures de période (μs)			Moyenne	Écart type	Étendue (μs)	Erreur relative*
Sonde 1	42,86	42,88	42,86	42,86		0,02	0,0%
Sonde 2	43,02	43,03	43,02	43,02		0,01	0,4%
Sonde 3	43,00	42,99	42,99	42,99		0,01	0,3%
Sonde 4	42,87	42,90	42,88	42,88		0,03	0,1%
Sonde 5	42,67	42,70	42,70	42,69		0,03	0,4%
Sonde 6	42,75	42,73	42,72	42,73		0,03	0,3%
Sonde 7	42,78	42,78	42,81	42,80		0,03	0,1%
Moyenne				42,85	0,124	0,33	

$$*Erreur\ relative = \left| \frac{valeur\ réelle - valeur\ approchée}{valeur\ réelle} \right|$$

À la lecture des résultats présentés dans les tableaux ci-dessus, nous constatons tout d'abord une excellente reproductibilité des mesures de chaque sonde. En effet l'étendue des mesures de chaque sonde ne dépasse pas 0,01 μs dans l'air (Voir Tableau 4.1) et 0,03 μs dans l'eau (Voir Tableau 4.2). Néanmoins la comparaison des mesures moyennes réalisées par les sept sondes met en évidence des écarts plus significatifs d'une sonde à l'autre. En particulier, il semble que ces différences de réponses s'accroissent lors de mesures de la période dans l'eau distillée, où des écarts de quelques dixièmes de microsecondes sont visibles. Ces résultats montrent : 1) la nécessité d'étalonner une sonde et, 2) que l'étalonnage d'une sonde ne peut être généralisé à l'ensemble des sondes de même type, du moins, sans être conscient du risque d'erreur engendré. C'est pourquoi nous soulignons à la section 4.1.1 la nécessité de connaître les propriétés physiques de chaque sonde.

Enfin, une remarque importante qui peut être faite à partir de ces données concerne la plage de réponse des sondes. En effet, le temps moyen mis par l'onde électromagnétique émise par une sonde WCR, pour se propager dans le milieu puis se réfléchir et revenir à la source, avoisine les 14,9 μs à 23,0°C dans l'air et les 42,9 μs à 22,8°C dans l'eau distillée. Une constatation qui traduit également le fait qu'une onde se propage plus rapidement dans l'air que dans l'eau.

4.1.3 Détection de l'eau liée

Dans la perspective d'exploiter avec rigueur les mesures réalisées in-situ, une étape importante de notre programme expérimental consiste à déterminer la fraction d'eau intergranulaire (eau libre et/ou absorbée), que détectent les sondes WCR lors d'une mesure. En effet, dans le cadre de notre projet, où l'objectif principal est la mesure de la teneur en eau dans un matériau recyclé traité, il est important de savoir si l'eau absorbée est également prise en compte dans la réponse de la sonde WCR.

Pour cela, nous avons comparé la période mesurée, à température ambiante, par quatre sondes WCR dans deux échantillons tamisés (fraction 0/5) de l'agrégat recyclé utilisé pour la confection du matériau MR5-TFE-B. L'un séché à 100°C pendant 24 heures est considéré à priori totalement sec, l'autre séché à 50°C pendant 48 heures contient une fraction indéterminée d'eau absorbée, c'est-à-dire piégée dans les pores de ses grains. Le Tableau 4.3 récapitule les mesures réalisées.

Tableau 4.3 Périodes mesurées à température ambiante dans la fraction 0/5 du MR5 séché à 50°C et à 100°C

	Période mesurée dans l'agrégat recyclé tamisé (0/5) et séché à 50°C (w=1,0%)								
	Mesures de période (µs)					Moyenne	Écart type	Étendue (µs)	Erreur relative
Sonde 1	17,18	17,20	17,18	17,21	17,17	17,19		0,04	0,3%
Sonde 2	17,27	17,25	17,27	17,25	17,25	17,26		0,02	0,7%
Sonde 3	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01	17,01		0,00	0,8%
Sonde 4	Sondes utilisées pour l'instrumentation de la chaussée et non disponible lors de l'étalonnage								
Sonde 5									
Sonde 6									
Sonde 7	17,09	17,09	17,08	17,09	17,09	17,09		0,01	0,4%
Moyenne						17,14	0,101	0,26	
	Période mesurée dans l'agrégat recyclé tamisé (0/5) et séché à 100°C (w=0%)								
	Mesures de période (en µs)					Moyenne	Écart type	Étendue (µs)	Erreur relative
Sonde 1	16,86	16,85	16,86	16,85	16,85	16,85		0,01	0,6%
Sonde 2	16,83	16,81	16,82	16,83	16,83	16,82		0,02	0,4%
Sonde 3	16,63	16,63	16,64	16,63	16,63	16,63		0,01	0,7%
Sonde 4	Sondes utilisées pour l'instrumentation de la chaussée et non disponible lors de l'étalonnage								
Sonde 5									
Sonde 6									
Sonde 7	16,70	16,68	16,70	16,68	16,68	16,69		0,02	0,4%
Moyenne						16,75	0,105	0,22	

Le constat qui peut être dressé à partir de ces résultats est que les périodes mesurées par chaque sonde dans les deux milieux tests sont distinctes. Ainsi, il apparaît que les périodes mesurées dans le matériau séché à 50°C sont en moyenne supérieures de 0,39µs par rapport à celles obtenus dans le matériau relativement sec (séché à 100°C). En outre, les résultats présentés à la section précédente ont révélés que la présence d'eau ralentit la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique émise par la sonde WCR. Dans le cas présent, une période plus lente, en moyenne de 0,39µs, suggère donc qu'une fraction d'eau encore présente dans le matériau séché à 50°C perturbe la transmission de l'onde.

Enfin, bien que les résultats présentés ci-dessus ne nous permettent pas de quantifier l'eau encore présente dans l'échantillon séché à 50°C, nous sommes cependant en mesure d'affirmer que les sondes WCR permettent la détection d'au moins une partie de l'eau absorbée.

On peut néanmoins s'interroger sur le fait que la valeur de période mesurée sur le MR5-tamisé (0/5) et séché à 100°C pendant 48 heures ($P=16,75\mu\text{s}$) soit différente de celle mesurée dans l'air ($P_{\text{air}}=14,92\mu\text{s}$). Trois facteurs pourraient expliquer en partie cet écart : 1) la température de l'essai, 2) le degré réel de séchage à 100°C-48h et, 3) l'influence du milieu sur la réponse de la sonde.

Les mesures dans le MR5 tamisé (0/5) ayant été réalisées à $23\pm 0,5^\circ\text{C}$, température tout à fait comparable à celle retenue pour les mesures dans l'air ($23,0^\circ\text{C}$) et dans l'eau ($22,8^\circ\text{C}$), l'effet de la température est donc négligeable ici. En revanche, il reste envisageable que le matériau puisse encore contenir une certaine quantité d'eau absorbée après un séjour de 48 heures à 100°C. Notamment, à cause de la présence d'agrégat de béton, dont la finesse des pores exerce une rétention importante sur l'eau dans les particules. Finalement, la nature du milieu instrumenté doit également être considérée comme un facteur d'influence sur la réponse des sondes. En effet, comme le montre le Tableau 4.4, les périodes mesurées à $23,0^\circ\text{C}$ dans des échantillons de Ray-car⁽¹⁾ sec (fraction 2,5/5), de quartz sec (fraction 0,63/1,25) et de MR5 tamisé sec (fraction 0/5), pour des porosités semblables, diffèrent de plusieurs dixièmes de microsecondes. Ces résultats justifient la nécessité de procéder à un étalonnage des sondes WCR en laboratoire en vue d'exploiter rigoureusement les mesures réalisées in-situ.

⁽¹⁾ Le Ray-car est un granulats de roche magmatique

Tableau 4.4 Périodes mesurées dans le Ray-car sec (2,5/5), le quartz (0,63/1,25) sec et le MR5 sec (0/5) (T=23,0°C, porosités similaires)

	Raycar (2,5/5) séché à 100°C-48h	Quartz (0,63/1,25) séché à 100°C-48h		MR (0/5) séché à 100°C-48h
Période (µs)	16,46	15,85	15,92	16,75
Porosité : n(%)	51,6	47,8	34,6	37,7
ρ_s (g/cm³)	1,368	1,366	1,714	1,1412
d_{gb}	2,827	2,620		2,266

4.2 Présentation des résultats traitant de l'effet de la température et de la porosité sur la réponse d'une sonde WCR

4.2.1 Avant-propos

Avant d'en venir à la présentation proprement dite des résultats traitant des effets de la température et de la porosité sur la réponse des sondes WCR, nous souhaitons revenir brièvement sur le schéma d'instrumentation suivi pour chaque essai.

Tout d'abord, précisons que les mesures de période présentées ci-après ont été réalisées avec la même sonde WCR de type CS616 et ce, quelque soit l'éprouvette exploitée lors des essais. Les valeurs présentées en microsecondes sont les données brutes enregistrées à l'aide d'un boîtier d'acquisition de type CR1000, sans avoir fait l'objet d'une correction. La température au sein de l'éprouvette instrumentée est mesurée via trois thermocouples de type T (Cuivre/Constantan) qui sont positionnés comme indiqué à la Figure 4.1. Préalablement étalonné en laboratoire, chaque thermocouple est associé à une équation de correction (*Voir* Annexe V). Aussi, afin de simplifier la présentation des résultats, dans la suite du document, seules les températures des thermocouples corrigées sont publiées.

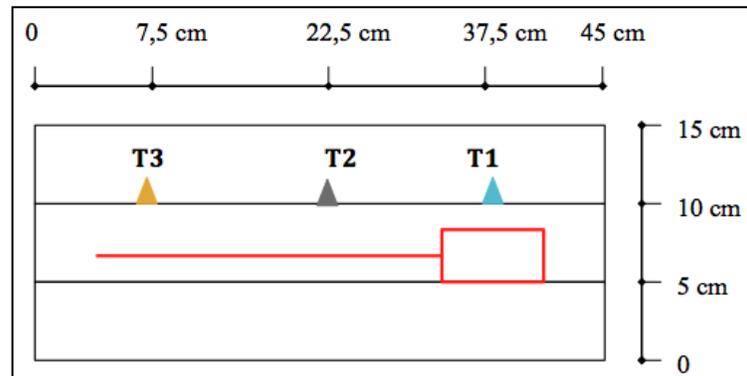


Figure 4.1 Schéma du positionnement des thermocouples dans l'éprouvette (coupe transversale)

Par ailleurs, des irrégularités inexplicables dans les mesures du thermocouple T1, nous ont conduits à exclure ses données dans la présentation puis l'analyse des résultats qui vont suivre. La Figure 4.2 montre ainsi l'évolution de la température mesurée par les trois thermocouples placés dans le matériau de confinement lors des 100 premières minutes d'instrumentation lors de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3. Il apparaît que le thermocouple T1 tend continuellement vers une température inférieure à celle mesurée par T2 et T3. En effet, à la 100^{ème} minute d'enregistrement, les températures mesurées sont respectivement T1=16,3°C, T2=17,8°C et T3=18,0°C. À l'inverse, la Figure 4.3 présente une température T1 qui demeure supérieure à T2 et T3 entre la 1500^{ème} et la 1600^{ème} minutes d'instrumentation lors de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3, avec des écarts supérieurs à 2°C. Cette inconstance dans les mesures du thermocouple T1 justifie, à notre avis, de ne pas les prendre en compte dans la suite de ce mémoire.

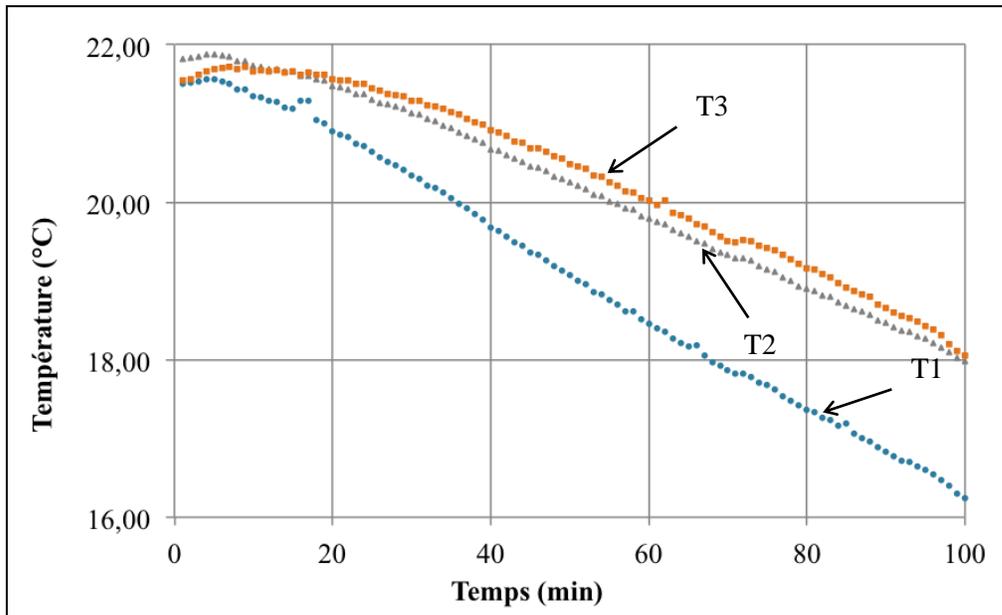


Figure 4.2 Évolution des températures T1, T2 et T3 lors des 100 premières minutes d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3

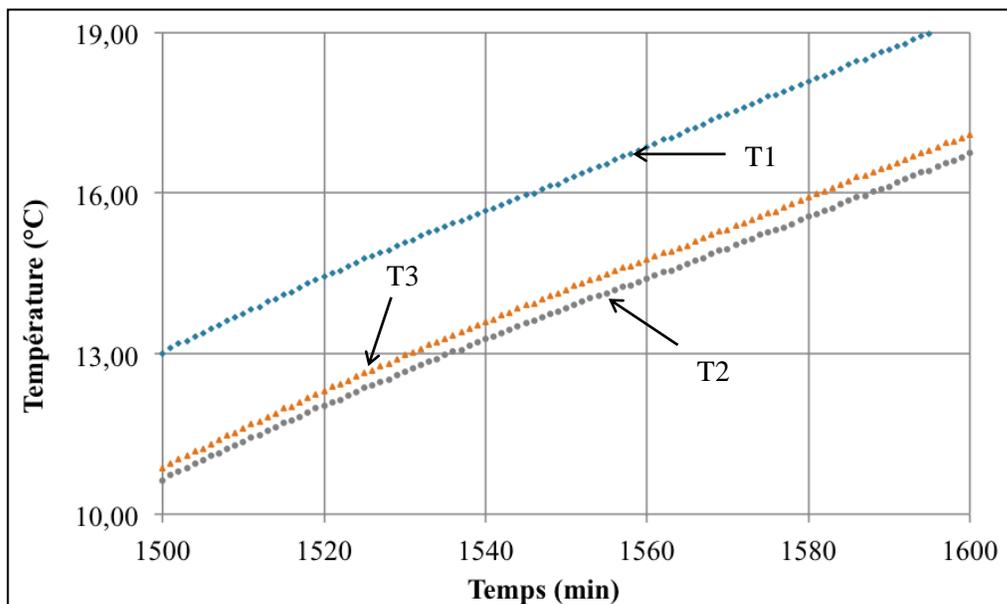


Figure 4.3 Évolution des températures T1, T2 et T3 entre la 1500^{ème} et la 1600^{ème} minutes d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-2,3

4.2.2 Résultats de l'étude sur l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR

Afin d'étudier l'effet de la température sur la mesure des sondes WCR, nous avons choisi de comparer la période enregistrée en fonction de la température, par une même sonde WCR, dans cinq corps d'épreuve de teneur en eau et de porosité connues et fixes. Les cinq essais ainsi réalisés sont identifiés de la manière suivante :

1. MR5-TFE-B-33,9-14,3
2. MR5-TFE-B-33,9-11,8
3. MR5-TFE-B-33,9-9,5
4. MR5-TFE-B-33,9-6,0
5. MR5-TFE-B-33,9-2,3

Dans le cadre de cette étude, chaque éprouvette est alors soumise à un cycle de variation de la température suivant plusieurs paliers prédéfinis. Pour ce faire, l'éprouvette est placée dans une enceinte thermo-régulée et conditionnée suivant divers paliers de température prédéfinis pour étudier son influence sur la réponse de la sonde d'humidité par l'entremise de la mesure de la période. La mesure de l'évolution de la période est réalisée en continue tout au long du processus. L'objectif étant de déterminer la période mesurée au moment où la température au sein de l'éprouvette est bien stabilisée suivant les paliers de températures choisis. La première étape d'exploitation des résultats issus de notre programme expérimental est donc de s'assurer de la stabilisation de la température dans l'éprouvette à chaque palier de mesure.

En outre, nous verrons au prochain chapitre qu'il est plus avantageux de travailler à partir d'une représentation volumique de la teneur en eau pour corriger les mesures brutes. Pour ce faire, la densité sèche du matériau de confinement constituant les corps d'épreuves utilisés lors des essais a été mesurée : $d_s=1,625$ (Voir Annexe VI). La teneur en eau volumique représente en définitive le volume d'eau contenu dans le volume effectif de mesure de mesure de la sonde. Dans l'eau, il est maximal et s'apparente à un milieu poreux de porosité unitaire ($V_v=V_T$). Au fur et à mesure où l'on introduit des solides dans ce volume de mesure, le volume d'eau descellé par la sonde en est diminué. Dans un milieu poreux saturé, le

volume d'eau contenu dans le volume effectif de mesure de la sonde correspond à la porosité du milieu, laquelle est ainsi la teneur en eau volumique. La corrélation entre les teneurs en eau massique et volumiques en cours d'essais sur l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 est présentée au Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Teneur en eau obtenue par mesure gravimétrique en cours d'essais au sein de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 ; $d_s=1,625$

Densité sèche du matériau de confinement $d_s=1,625$	Essais				
	1	2	3	4	5
Massique : w (%)	14,3%	11,8%	9,5%	6,0%	2,3%
Volumique : θ (%)	23,2%	19,2%	15,5%	9,8%	3,7%

Soulignons que la porosité de l'éprouvette étant de 33,9%, cela revient à dire que la teneur en eau volumique maximale, à l'état saturé serait de 33,9%.

4.2.2.1 Contrôle de la stabilité de la température mesurée à chaque palier

Les résultats présentés dans ce paragraphe sont issus du cycle de variation de la température réalisé lors de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3. Au cours de ce cycle, qui a visé cinq paliers de température : 8°C, 15,5°C, 30°C, 35°C et 46°C, la période mesurée par la sonde ainsi que les températures T2 et T3 ont été enregistrées en continue à chaque minute. À cet égard, nous avons tracé sur la Figure 4.4 la consigne de l'étuve qui met en évidence les cinq paliers visés, ainsi que l'évolution de la température mesurée par T2 et T3 au cœur du corps d'épreuve pendant le cycle.

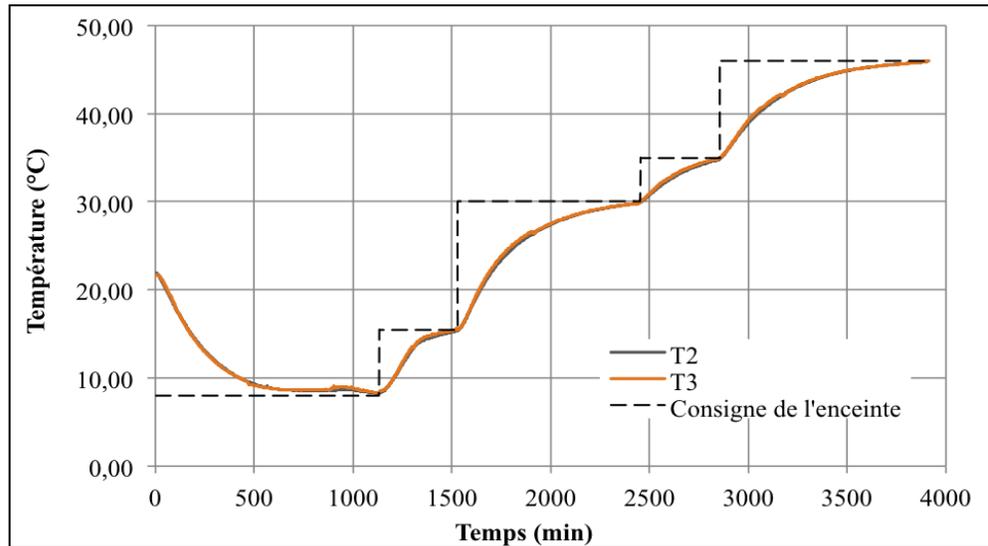


Figure 4.4 Évolution de la température de consigne de l'enceinte et de celle des thermocouples (T2 et T3), en cours d'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3

Couvrant près de 4000 minutes d'acquisition, la Figure 4.4 montre clairement l'évolution de la température dans le matériau de confinement entre les cinq paliers de température visés. Néanmoins, il est difficile d'observer la stabilisation de la température pour les paliers étudiés et ce, même après une période de stabilisation de plus de 12 heures. Pour étudier de plus près chaque palier, nous avons souhaité réaliser un zoom sur les dernières 250 minutes de chaque palier. La Figure 4.5 présente ainsi l'évolution de la température enregistrée par T2 et T3 aux cinq moments clés de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3.

Le constat que l'on peut dresser à partir des graphiques de la Figure 4.5 est que la température au cœur de l'éprouvette ne semble jamais avoir été stabilisée. Ainsi, il apparaît que le premier palier de température (Voir Figure 4.5 a)), fixé à 8°C, n'a même jamais été atteint dans le corps d'éprouve puisque les dernières mesures réalisées par T2 et T3 avant le changement de consigne dans l'enceinte révèlent des températures respectives à 8,3°C et 8,4°C. Nous constatons également, dans le cas du 2^{ème} et du 5^{ème} paliers (temps alloué inférieurs à 8 heures) un écart de quelques dixièmes de degrés entre les mesures de T2 et T3.

Ceci suggère donc, de nouveau, un manque de stabilité de la température au sein du matériau de confinement lors des prises de mesure.

Par ailleurs, les résultats des cycles de variation de la température réalisés sur les quatre autres éprouvettes sont disponibles en Annexe VII. Les délais établis entre deux paliers successifs lors de ces cycles étant similaires à ceux présentés ci-dessus, une absence flagrante de stabilité de la température au sein de l'éprouvette est également observable dans chaque cas.

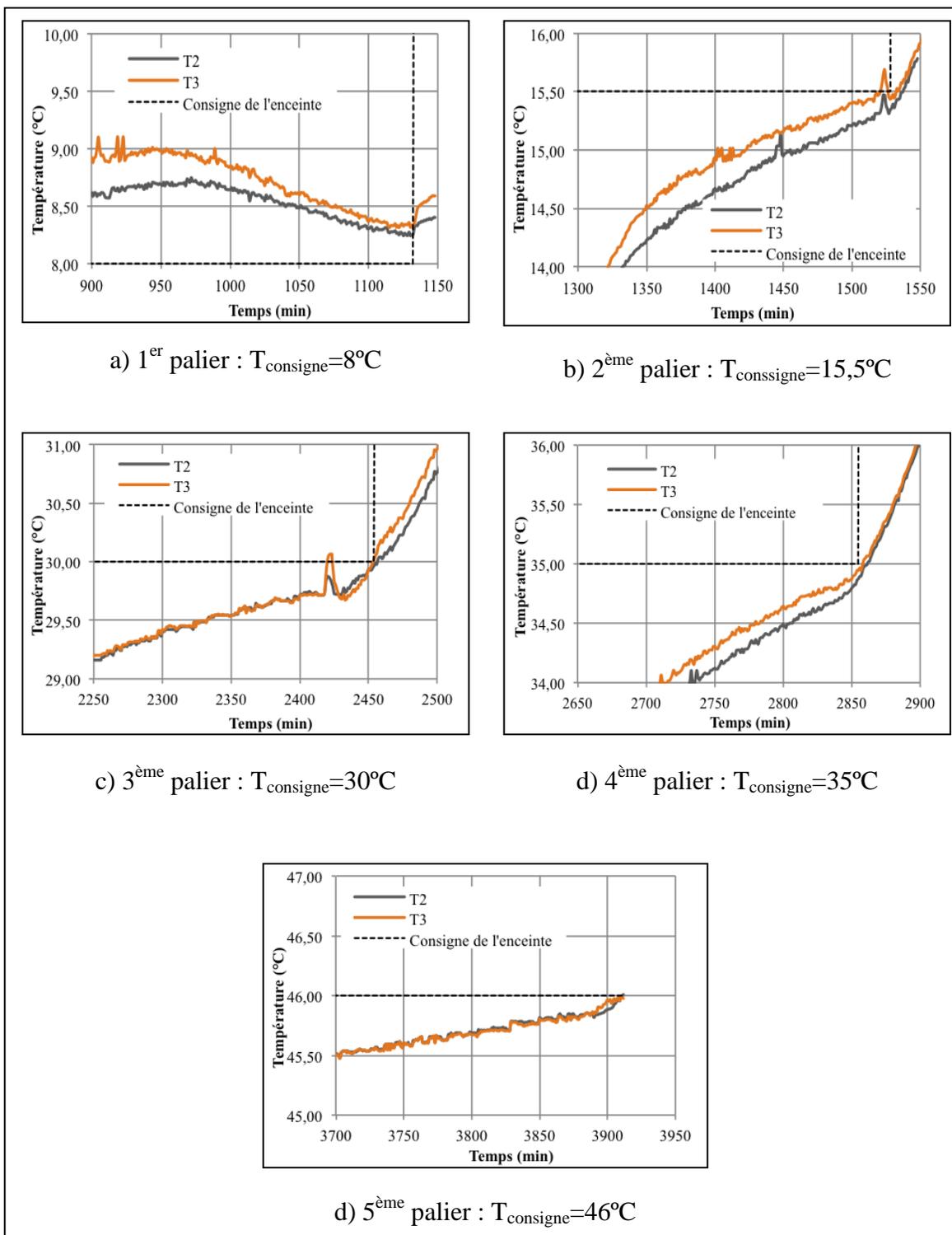


Figure 4.5 Zoom sur l'évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 en cours d'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3

La conclusion qui s'impose à la lueur de ces résultats est que le temps nécessaire à la stabilisation d'une température cible dans un corps d'épreuve est bien plus long que nous ne l'avions prévu. Dans le cadre de notre programme d'essais, certains cycles de températures ont été prolongés pour nous permettre d'estimer le temps nécessaire pour atteindre la stabilisation de la température au sein de l'éprouvette. La Figure 4.6 montre les résultats des essais réalisés sur l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-6,0. Ces résultats nous permettent d'estimer qu'une période minimum de 15 heures a été nécessaire pour que le palier de température visé (45°C) soit atteint et stabilisé au sein du corps d'épreuve. Par ailleurs, alors que les cinq éprouvettes testées possèdent des teneurs en eau distinctes, leur porosité reste identique. Et bien que ce ne soit pas l'objet de notre étude, nous pouvons conjecturer que cette porosité élevée de 33,9% est un facteur susceptible de ralentir l'obtention d'un équilibre thermique au sein du corps d'épreuve. De ce fait, dans l'optique de futurs projets s'inspirant de cette méthodologie d'étalonnage, nous préconisons de valider un temps de stabilisation de 24 heures entre deux paliers de température.

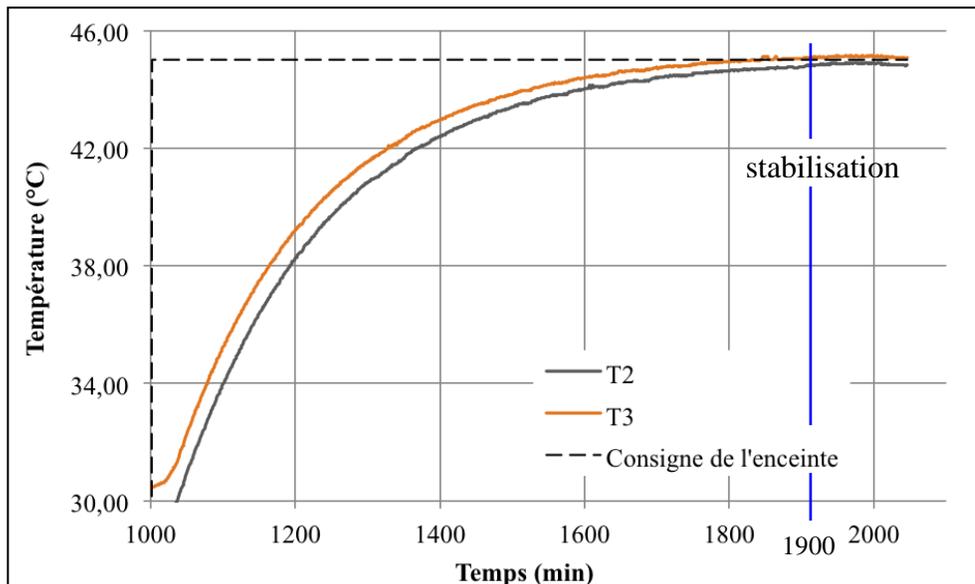


Figure 4.6 Zoom sur l'évolution des températures T2 et T3 au sein de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 pour $T_{\text{consigne}}=45^{\circ}\text{C}$

4.2.2.2 Temps de réponse de la sonde WCR à un changement de température

Le paragraphe précédent a mis en évidence la nécessité de laisser un temps de stabilisation minimale pour atteindre une température constante dans un corps d'éprouvette. Par ailleurs, en dépit du fait que la stabilisation de la température au sein de l'éprouvette n'ait pas été observée dans le cadre de nos essais, il n'en demeure pas moins que nos résultats d'essais montrent clairement l'influence de la température sur la réponse de la sonde dans la mesure de la période. Un questionnement légitime demeure, à savoir avec quelle sensibilité la sonde WCR répond à une variation de la température et donc, dans quel délai la période mesurée par la sonde se stabilise-elle ? Pour répondre à cette question, nous avons porté en graphique (Voir Figure 4.7) l'évolution de la période enregistrée par la sonde WCR et celles de la température des thermocouples (T2 et T3) au cours d'un cycle de variation de température pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3.

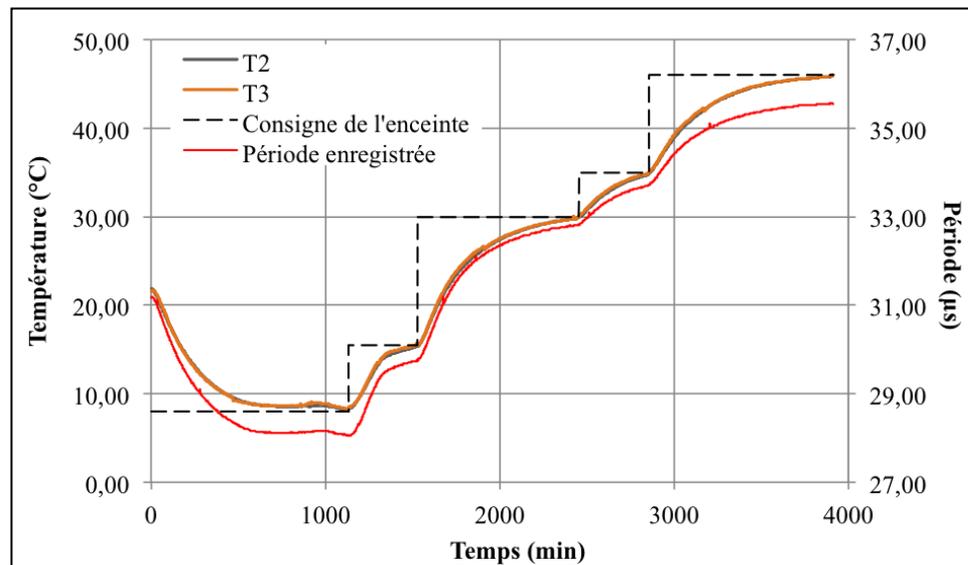


Figure 4.7 Évolution de la période mesurée par la sonde WCR et de la température des thermocouples T2 et T3 au cours d'un cycle de variation de la température de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3

Comme montré précédemment, les courbes de T2 et T3 révèlent une absence de stabilité de la température dans le matériau de confinement aux différents paliers visés. La courbe représentative de l'évolution de la période, suggère une vitesse de réponse très rapide de la sonde à un changement de température : son allure est très similaire à celle des courbes T2 et T3. Cependant, dans un souci de rigueur, nous avons souhaité étudier de plus près la réponse de la sonde à une variation de température dans le matériau de confinement. Ainsi, la Figure 4.8 représente un zoom sur les résultats des 200 minutes de mesure de la phase de transition entre le 1^{er} palier (8°C) atteint et l'augmentation de la température vers le 2nd palier (15°C).

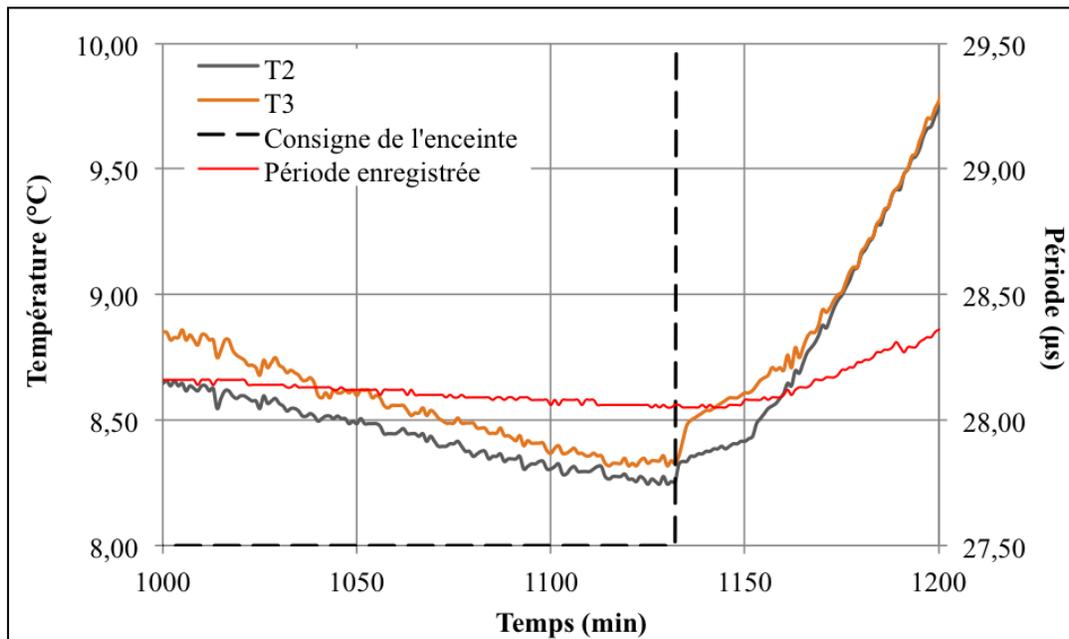


Figure 4.8 Zoom sur l'évolution de la période mesurée par la sonde WCR et les températures T2 et T3 entre la 1000^{ème} et la 1200^{ème} minute d'enregistrement de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3

Les résultats présentés à la Figure 4.8 permettent de conclure deux choses. Tout d'abord, il apparaît que tout comme la température, la période mesurée par la sonde au premier palier n'est pas stabilisée. Ainsi, durant la centaine de minutes représentées avant le changement de consigne de température dans l'étuve (1130^{ème} minute), la période enregistrée diminue

progressivement de 28,16 μ s à 28,05 μ s. Dans un deuxième temps, nous pouvons observer la vitesse de réponse de la sonde WCR à une variation de la température. En effet, suite au changement de consigne dans l'enceinte à la 1130^{ème} minute d'enregistrement, nous constatons que la température au sein du corps d'épreuve tend à augmenter dans les minutes suivantes. La sonde, quant à elle, n'enregistre sa période la plus basse (28,05 μ s) qu'à la 1145^{ème} minute d'instrumentation, suite à quoi la valeur de sa mesure commence à augmenter. La réponse de la sonde à une variation de la température est donc différée d'une quinzaine de minutes.

Comme nous l'avons conclu au paragraphe précédent, l'obtention de mesures fiables de la température et de la période nécessite la mise en place de délais d'attente plus significatifs entre le passage d'un palier à l'autre. En effet, bien que la revue de la littérature n'est révélée aucune étude menée sur le temps nécessaire à une mesure stable des sondes d'humidité WCR, il est clair que l'instabilité des signaux mesurés complique leur analyse et multiplie les risques d'erreur. Malgré cela, nous avons choisi, dans le cadre de notre programme expérimental, d'exploiter nos mesures en vues d'étudier l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR.

4.2.2.3 Influence de la température sur la période mesurée

La section précédente a permis de mettre en évidence que la réponse des sondes WCR est sensible à un changement de la température. Dans la perspective de mieux comprendre ce qui lie la période mesurée à la température évoluant dans le matériau de confinement, nous avons choisi de tracer la variation de la période en une fonction de la température. Pour ce faire, nous avons défini à chaque essai des « points paliers ». À chaque point palier est associé un couple de mesures période-température. Ce couple de mesures constitue les dernières valeurs de la période et de la température moyenne, établie à partir de T2 et T3, enregistrées dans le corps d'épreuve avant le changement de la température de consigne de l'étuve. Les résultats présentés par la suite sont issus du premier essai MR5-TFE-B-33,9-14,3. Le Tableau 4.6 liste

les points paliers établis pour cet essai et la Figure 4.9 trace la variation de la période en fonction de la température.

Tableau 4.6 Points paliers définis pour les essais de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 (w=14,3% ; $\theta=23,2\%$)

Points palier	Temps d'enregistrement (min)	Période (μs)	Tmoyen ($^{\circ}\text{C}$)
1	1130	28,05	8,3
2	1532	29,77	15,4
3	2451	32,82	29,9
4	2843	33,70	34,8
5	3912	35,55	45,9

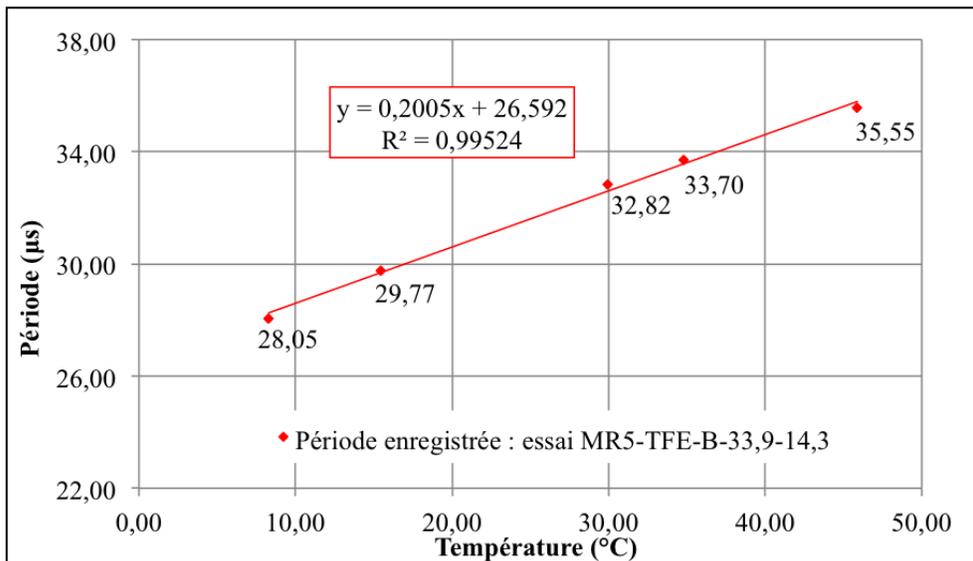


Figure 4.9 Variation de la période mesurée en fonction de la température moyenne au sein du corps d'éprouvette pour le cycle de température de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3

Les résultats présentés via la Figure 4.9 suggèrent qu'une relation linéaire peut être établie entre la période enregistrée par la sonde et l'évolution de la température au sein du matériau de confinement. En effet, la droite de tendance, reliant entre eux les différents points palier établis durant l'essai, est définie par un coefficient de détermination R^2 proche de 1. Par ailleurs, il apparaît que la période augmente avec la température suivant une pente de $0,2005\mu\text{s}/^\circ\text{C}$. En vue de valider nos premières conclusions, nous avons souhaité tracer sur un même graphique la variation de la période enregistrée pour les cinq éprouvettes testées. À cette fin, le Tableau 4.7 récapitule les points paliers propres à chaque cycle de variation de la température et la Figure 4.10 propose une superposition des périodes mesurées en cours d'essais.

Tableau 4.7 Points palier définis pour les cinq essais réalisés dans le cadre de l'étude sur l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR

Essai	Points paliers	Temps d'enregistrement (min)	Période (μs)	Tmoyenne ($^\circ\text{C}$)
MR5-TFE-B-33,9-14,3 ($\theta=23,2\%$)	1	1132	28,06	8,3
	2	1532	29,77	15,4
	3	2451	32,82	29,9
	4	2843	33,70	34,8
	5	3912	35,55	45,9
MR5-TFE-B-33,9-11,8 ($\theta=19,2\%$)	1	802	24,62	9,6
	2	1077	25,15	13,7
	3	1305	25,76	19,5
	4	2286	27,98	35,7
	5	2567	28,58	41,6
MR5-TFE-B-33,9-9,5 ($\theta=15,5\%$)	1	1011	23,00	7,4
	2	1328	24,10	20,7
	3	1823	25,81	41,5
MR5-TFE-B-33,9-6,0 ($\theta=9,8\%$)	1	708	21,68	9,2
	2	1003	22,95	29,8
	3	2046	23,57	45,0
MR5-TFE-B-33,9-2,3 ($\theta=3,7\%$)	1	1372	19,67	3,5
	2	2131	20,46	26,7
	3	3224	20,79	42,4

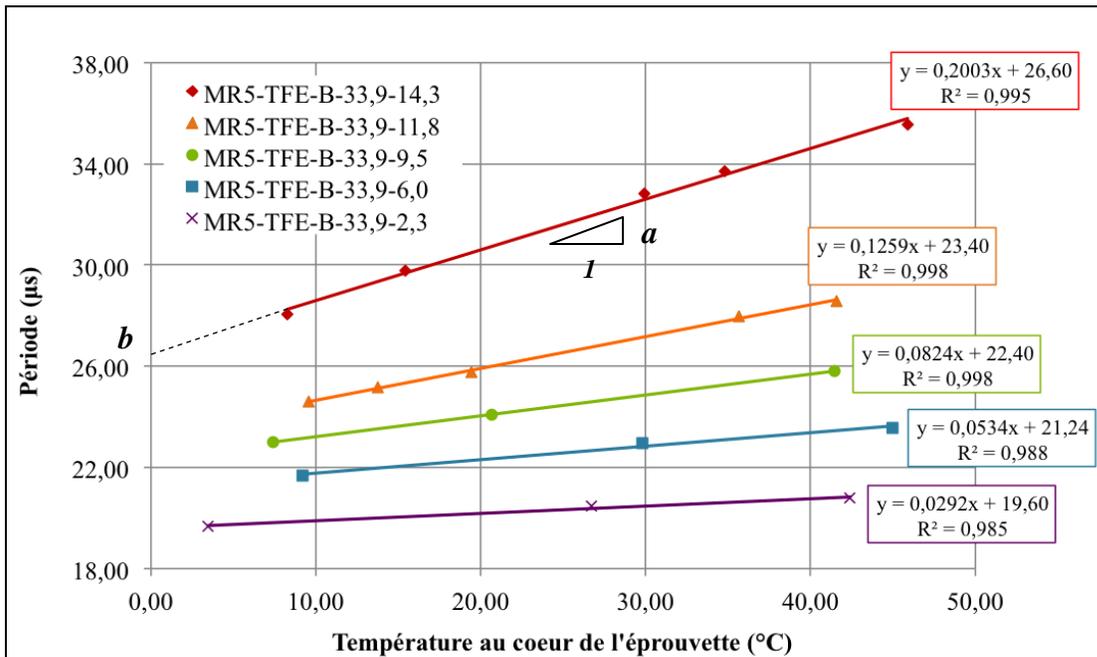


Figure 4.10 Variation des périodes mesurées en fonction de la température moyenne au cours des cinq cycles de température réalisés

Une première analyse des résultats de la Figure 4.10 permet de valider l'observation réalisée précédemment quant à l'existence d'une relation linéaire entre la période et la température. En effet, il est possible de tracer une droite de tendance propre à chaque essai et dont le coefficient de détermination R^2 demeure proche de 1. En outre, rappelons que les cinq éprouvettes présentés ici se dissocient par des variations de la teneur en eau du corps d'épreuve. Ceci implique donc, que pour une porosité donnée ($n=33,9\%$), quelque soit la teneur en eau du MR5-TFE, la période peut s'écrire comme une fonction linéaire de la température.

La seconde conclusion qu'il est possible de tirer à partir des résultats de la Figure 4.10 concerne l'influence conjuguée de la teneur en eau et de la température sur la réponse de la sonde WCR. En effet, nous sommes en mesure d'affirmer que pour la porosité étudiée de 33,9%, plus la teneur en eau dans le matériau de confinement est élevée, plus la réponse de la sonde est sensible à une variation de la température.

En outre, dans la perspective d'exploiter au mieux les données obtenues via notre protocole expérimental, les observations réalisées à partir de la Figure 4.10 seront analysées plus longuement au Chapitre 5.

4.2.3 Effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR

Nous l'avons vu dans la revue de la littérature, la présence de vides autour des tiges d'une sonde WCR suffit à perturber la transmission de l'onde électromagnétique émise par la sonde et donc, à modifier la mesure de la période. Bien qu'il nous soit impossible, dans le cas présent, de reproduire en laboratoire la porosité du matériau de confinement mis en place in-situ, nous avons cherché, via notre programme d'essais en laboratoire, à observer l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR. Conformément à la stratégie expérimentale développée dans le chapitre 2, nous avons choisi de mesurer la période au cœur de trois corps d'épreuve de porosités distinctes mais de teneur en eau relativement semblable, comprise entre 13,9% et 14,6%. Les essais réalisés dans le cadre de cette étude sont identifiés comme suit :

1. MR5-TFE-B-33,9-14,3
2. MR5-TFE-B-31,0-14,6
3. MR5-TFE-B-26,4-13,9

Le but de ces essais est de pouvoir comparer la variation de la période en fonction de la température pour trois porosités différentes comprises entre 26,4% et 33,9%. Pour ce faire, chaque essai consiste en un cycle de variation de la température pour lequel nous avons également défini des points paliers tel que précisé à la section 4.2.2.3. Ainsi, le Tableau 4.8 présente ces points paliers tandis que la Figure 4.11 propose une représentation de la variation de la période enregistrée en fonction de la température au cours des trois essais.

Tableau 4.8 Points palier définis pour les trois éprouvettes réalisées dans le cadre de l'étude sur l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR

Essai	Points paliers	Période (μs)	Tmoyen ($^{\circ}\text{C}$)
MR5-TFE-B-33,9-14,3 ($\theta=23,2\%$)	1	28,06	8,3
	2	29,77	15,4
	3	32,82	29,9
	4	33,70	34,8
	5	35,55	45,9
MR5-TFE-B-31,0-14,6 ($\theta=24,1\%$)	1	29,60	7,7
	2	31,28	15,0
	3	33,04	24,5
	4	34,73	33,3
	5	36,43	42,9
MR5-TFE-B-26,4-13,9 ($\theta=24,6\%$)	1	28,06	10,0
	2	29,77	23,0
	3	32,82	33,8
	4	33,70	43,0

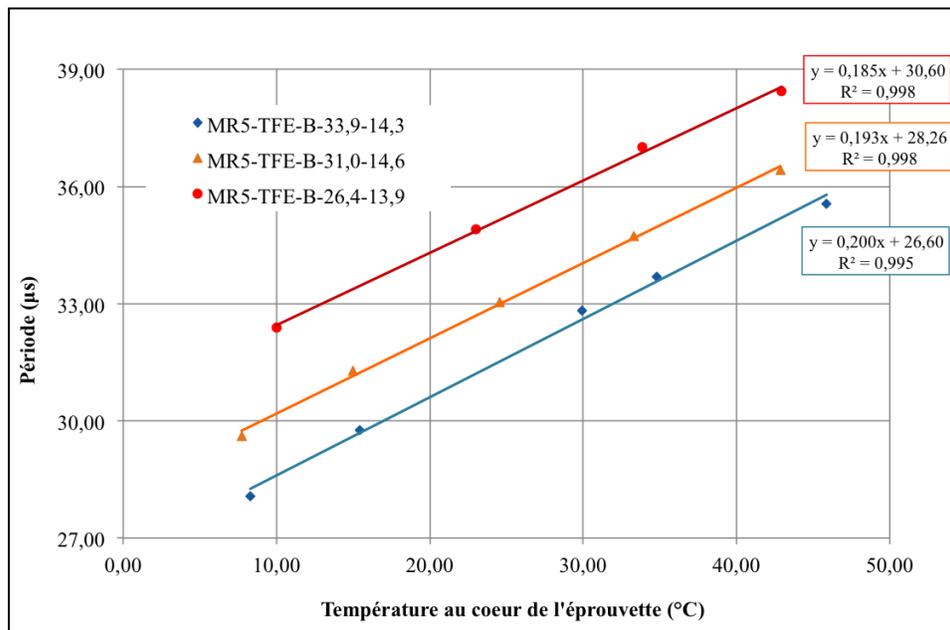


Figure 4.11 Variation des périodes mesurées en fonction de la température moyenne pour trois porosités distinctes

Les résultats présentés à la Figure 4.11 traduisent de nouveau la relation de linéarité entre périodes et températures. Ainsi, comme expliqué précédemment, il est possible de relier entre eux les points paliers propres à chaque essai et d'obtenir une tendance linéaire. Une première conclusion que nous pouvons dresser à partir de cette figure est que, dans le cadre de notre programme expérimental, pour une teneur en eau massique proche 14%, nous sommes en mesure d'affirmer que quelque soit la porosité, la période mesurée demeure une fonction linéaire de la température.

La seconde observation qu'il est possible de faire à partir des résultats présentés à la Figure 4.11 concerne directement l'influence de la porosité sur la période mesurée. En effet, il apparaît aux travers des trois essais réalisés que la période augmente lorsque la porosité diminue. Par ailleurs, nous constatons un certain parallélisme entre les trois courbes de tendance qui laisse suggérer que, dans le cadre de notre projet, un facteur de correction de la période pourrait être établi en fonction de la porosité du matériau de confinement. Cette hypothèse sera développée plus longuement dans le Chapitre 5 réservé à l'analyse des résultats.

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

Les essais menés en laboratoire dans le cadre de ce projet de recherche nous ont permis de mieux appréhender le fonctionnement des sondes d'humidité WCR de type CS616. En effet, de manière à exploiter les mesures réalisées in-situ par ces sondes, une étude rigoureuse des facteurs environnant pouvant influencer la lecture des sondes s'avérait indispensable. Ainsi, les résultats présentés dans le chapitre précédent mettent en évidence les effets que la teneur en eau, la température et la porosité du matériau de confinement peuvent avoir sur les mesures de la sonde.

En outre, le principal objectif de notre projet est de proposer un protocole d'étalonnage des sondes WCR qui en ferait un outil attractif pour la mesure in-situ de la teneur en eau dans des matériaux recyclés traités à froid à l'aide d'une émulsion. Pour ce faire, nous avons cherché à tirer au mieux parti de nos résultats d'essais en laboratoire afin de développer un modèle d'étalonnage. En particulier, ce modèle doit aider à la détermination de la teneur en eau du matériau de confinement à partir de la période et de la température mesurées, in-situ en continu, dans la zone de confinement.

À travers ce chapitre, nous reviendrons dans un premier temps sur l'effet conjugué de la teneur en eau et de la température sur la réponse des sondes WCR qui a été mis en évidence dans la section 4.2.2.3. Par la suite, nous verrons comment, à partir de notre programme d'essai en laboratoire, nous sommes en mesure d'établir un modèle d'étalonnage puis, nous analyserons l'application de ce modèle aux données collectées des mesures en laboratoire et dans la planche d'essai de l'avenue des Érables. Finalement, nous explorerons la possibilité d'affiner, dans le cadre d'un futur projet, le modèle d'étalonnage établi par la prise en compte du facteur porosité.

5.1 Influence conjuguée de la teneur en eau et de la température sur la réponse des sondes WCR

L'objectif de cette section est d'analyser les conclusions établies au chapitre précédent quant aux rôles conjugués de la température et de la teneur en eau sur la réponse des sondes. À cette fin, revenons sur la Figure 4.10 présentée à la section 4.2.2.3.

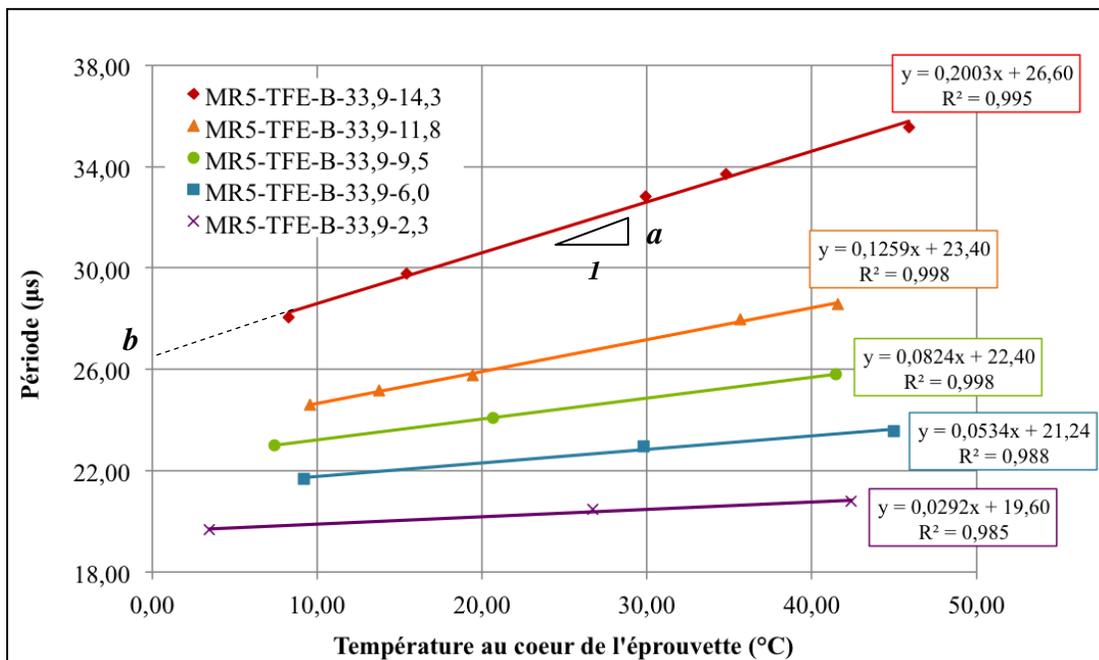


Figure 4.10 Variation des périodes mesurées en fonction de la température moyenne au cours des cinq cycles de température réalisés

Comme nous l'avons évoqué; la période peut être décrite comme une fonction linéaire de la température de la forme $P=aT+b$ où le coefficient a est associé à la pente de la droite et b représente son ordonnée à l'origine. Le Tableau 5.1 présente les coefficients associés à chaque équation de droite de tendance ainsi que leur coefficient de détermination.

Tableau 5.1 Équation des courbes de tendance établis à partir des essais sur l'étude de l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR (porosité de l'éprouvette $n=33,9\%$)

w(%)	θ (%)	Essai	a ($\mu\text{s}/^\circ\text{C}$)	b (μs)	Coefficient de détermination (R^2)
14,3	23,2	MR5-TFE-B-33,9-14,3 ⁽¹⁾	0,2003	26,60	0,995
11,8	19,2	MR5-TFE-B-33,9-11,8	0,1259	23,40	0,998
9,5	15,5	MR5-TFE-B-33,9-9,5	0,0824	22,39	0,998
6,0	9,8	MR5-TFE-B-33,9-6,0	0,0533	21,24	0,988
2,3	3,7	MR5-TFE-B-33,9-2,3	0,0291	19,60	0,985

⁽¹⁾ MR5-TFE-B fraction 0/5

Le second constat que nous avons dressé au chapitre précédent à partir de la Figure 4.10 est que, pour une porosité donnée ($n=33,9\%$), la teneur en eau semble accentuer l'influence de la température sur la réponse de la sonde. En effet, dans le cas de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3, il apparaît que la droite de tendance reliant entre eux les points paliers possède une pente plus élevée ($0,2003\mu\text{s}/^\circ\text{C}$). En comparaison, pour les résultats issus de l'essai MR5-TFE-B-33,9-2,3 où la teneur en eau est inférieure de 12%, la pente traduisant la variation de la période en fonction de la température est de $0,0291\mu\text{s}/^\circ\text{C}$, nettement plus faible.

Afin d'analyser plus en détail cette tendance, nous avons comparé, pour chaque essai, la variation de la période mesurée en fonction de la teneur en eau au sein du corps d'épreuve. Pour ce faire, nous avons exploité les équations des droites de tendance associées à la variation de la période en fonction de la température, et présentées au Tableau 5.1. Ainsi, chaque équation étant établie pour un essai donné, spécifique à une teneur en eau, nous avons déterminé les périodes calculées pour ces cinq essais et ce, pour quatre températures de référence : 15°C , 25°C , 35°C et 45°C (Voir Tableau 5.2). La Figure 5.1 montre les isothermes de la variation de la période calculée en fonction de la teneur en eau massique pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9.

Tableau 5.2 Périodes calculées à partir des droites de régression de la Figure 4.10 pour les cinq essais réalisés à partir de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9

Essai		MR5-TFE-B-33,9-14,3	MR5-TFE-B-33,9-11,8	MR5-TFE-B-33,9-9,5	MR5-TFE-B-33,9-6,0	MR5-TFE-B-33,9-2,3
		Période calculée (μs)				
Temperature (°C)	15°C	29,60	25,28	23,63	22,04	19,60
	25°C	31,61	26,54	24,45	22,58	20,33
	35°C	33,61	27,80	25,28	23,11	20,62
	45°C	35,61	29,06	26,10	23,64	20,92

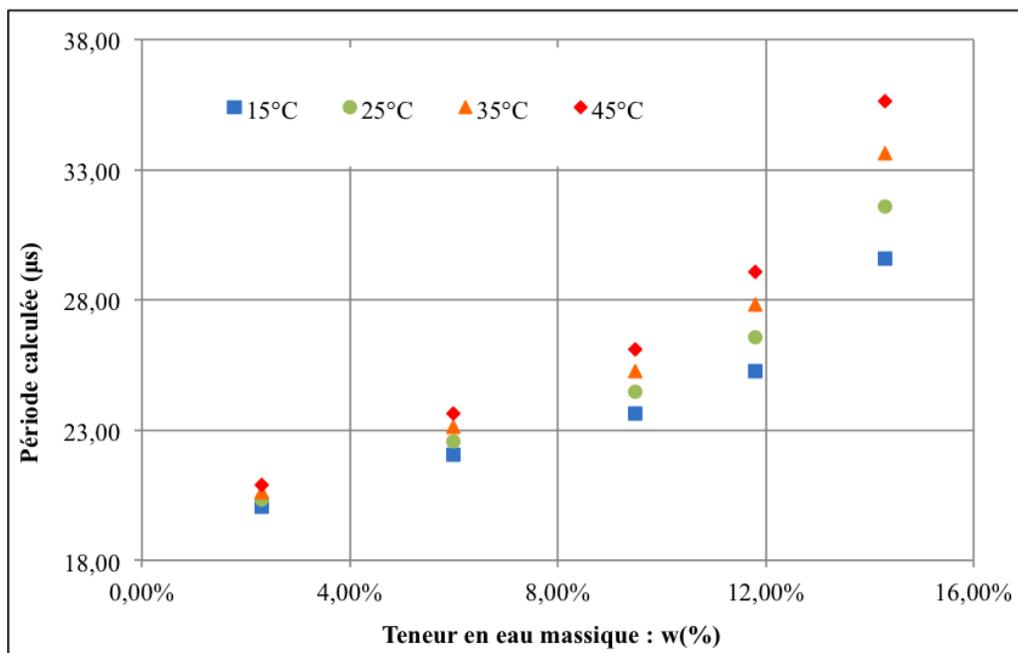


Figure 5.1 Variation de la période calculée en fonction de la teneur en eau massique sur l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 à partir des droites de régression de la Figure 4.10

Les résultats présentés à la Figure 5.1 confirment que la période mesurée augmente avec la teneur en eau. En revanche, alors qu'une relation linéaire a pu être établie entre la période et

la température, il semble ici difficile de trouver une quelconque relation entre la période mesurée et la variation de la teneur en eau massique. Enfin, cette Figure nous permet d'observer sous un autre angle l'effet conjugué de la teneur en eau et de la température sur la réponse de la sonde WCR. Ainsi, nous validons l'une de nos précédentes conclusions sur le fait que l'augmentation de la teneur en eau accentue l'influence de la température sur la mesure de la période. À titre d'exemple, pour les valeurs calculées à 15°C et 45°C, nous constatons que les périodes calculées pour une teneur en eau massique de 2,3%, sont respectivement égales à 19,60 μ s et 20,92 μ s, soit un écart de 1,32 μ s dans un intervalle de 30°C. En revanche, pour la même éprouvette (MR5-TFE-B-33,9) et pour les mêmes température, lorsque la teneur en eau massique est de 14,3%, les périodes calculées sont respectivement de 29,60 μ s et 35,61 μ s, soit un écart de 6,01 μ s dans le même intervalle de 30°C. En conclusion, une correction de la période mesurée est d'autant plus nécessaire que, la teneur en eau et la température au sein du milieu étudié sont importantes.

5.2 Modèle d'étalonnage

5.2.1 Introduction

Notre programme expérimental nous conduit à développer un modèle d'étalonnage inspiré des travaux menés par Benson et Wang (2006). Bien que les études de ces auteurs ont porté sur des sols naturels, et non sur des matériaux recyclés traités, elles ont mis en évidence qu'une correction de l'effet de la température sur la réponse des sondes WCR de type CS616 est possible, et surtout, qu'elle permet une mesure plus juste et représentative de la teneur en eau dans le matériau. De ce fait, nous avons choisi d'adapter leur protocole à nos besoins dans la perspective de pouvoir, à termes, exploiter les mesures réalisées dans la chaussée de l'avenue des Érables.

5.2.2 Évolution des constantes a et b en fonction de la teneur en eau

Dans la section 5.1, nous avons cherché à analyser l'effet conjugué de la teneur en eau et de la température sur la réponse des sondes WCR. Il est ressorti, entre autres, que la période

peut être décrite comme une fonction linéaire de la température de la forme $P=aT+b$. En outre, les résultats des cinq essais réalisés pour étudier l'effet de la température nous ont permis de déterminer la pente a et l'ordonnée à l'origine b décrivant l'équation de la courbe de tendance période-température propre à chaque essai et ce, pour chaque teneur en eau (Voir Tableau 5.1).

Une manière intéressante de traduire les résultats présentés au travers le Tableau 5.1 et la Figure 4.10 est de mettre en relation, la pente a et l'ordonnée à l'origine b de chaque droite de tendance, par une analyse de 2^{ème} niveau, en fonction de la teneur en eau volumique θ . De ce fait, la période, qui jusque là était décrite comme une fonction de la température, devient également dépendante de la teneur en eau volumique du matériau de confinement. À cet égard, la Figure 5.2 représente l'évolution conjointe des coefficients a et b en fonction de la teneur en eau pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,.

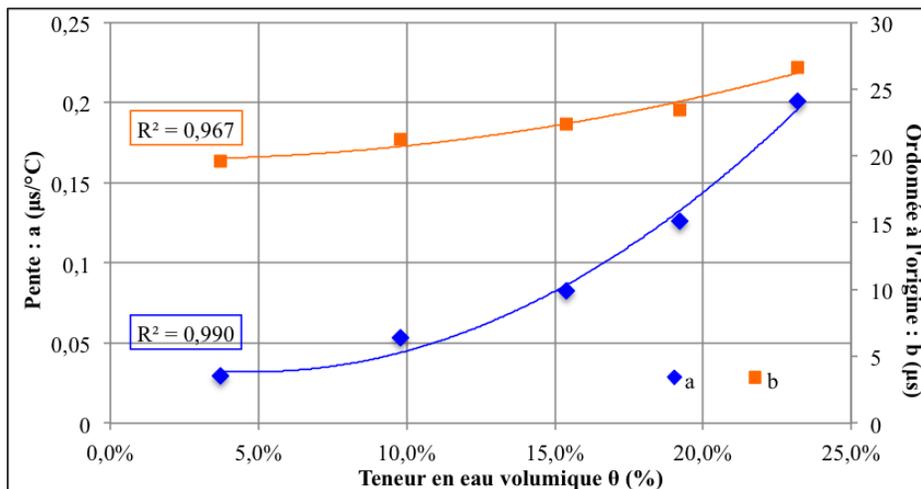


Figure 5.2 Variations de la pente a et de l'ordonnée à l'origine b des droites décrivant la relation entre la période et la température, en fonction de la teneur en eau volumique ($d_s=1,625$)

Les résultats présentés à la Figure 5.2 montrent qu'il est possible d'établir des courbes de tendance polynomiale pour traduire la variation de la pente a et de l'ordonnée à l'origine b en fonction de la teneur en eau volumique θ . En effet, on observe des coefficients de détermination, R^2 , relativement proches de 1 en considérant une corrélation de type polynomiale de second degré. Ainsi, les deux facteurs étudiés peuvent être décrits comme des fonctions quadratiques de la teneur en eau, soit :

$$a = a_0\theta^2 + a_1\theta + a_2 \quad \text{et} \quad b = b_0\theta^2 + b_1\theta + b_2$$

Où a_i et b_i décrivent les coefficients de la fonction quadratique servant à définir les constantes associées aux droites de relation période-température pour les différentes teneurs en eau. Les valeurs de a_i et b_i sont données au Tableau 5.3 :

Tableau 5.3 Valeurs des coefficients définissant a et b pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 ($d_s=1,625$)

Coefficients définissant l'équation de a en fonction de θ		Coefficients définissant l'équation de b en fonction de θ	
a_0	5,7199	b_0	163,05
a_1	-0,7276	b_1	-11,177
a_2	0,0548	b_2	19,974
$a = a_0\theta^2 + a_1\theta + a_2$		$b = b_0\theta^2 + b_1\theta + b_2$	
$R^2=0,990$		$R^2=0,967$	

5.2.3 Définition d'un modèle d'étalonnage

L'instrumentation de la planche d'essai située sur l'avenue des Érables nous permet de collecter, à toutes les heures, la période des deux sondes mises en place dans le haut et le bas de la couche de MR5-TFE-B composant la structure de la chaussée (Voir Figure 3.2). Par ailleurs, deux thermocouples nous renseignent à la même fréquence sur l'évolution de la température au sein des deux zones de confinement créées autour des sondes. Ainsi, le

modèle d'étalonnage développé repose sur le principe qu'à chaque enregistrement, un couple période-température est défini et peut être associé à une teneur en eau. Pour ce faire, la période, initialement décrite comme une fonction de la température, est désormais caractérisée de la manière suivante :

$$P(\theta, T) = (a_0\theta^2 + a_1\theta + a_2)T + (b_0\theta^2 + b_1\theta + b_2) \quad (5.1)$$

Les coefficients a_i et b_i étant constants et définis au Tableau 5.3.

La période P et la température T étant des données connues, issues des acquisitions de données en chantier, la variable θ , associée à la teneur en eau volumique du milieu, demeure la seule inconnue de l'équation de second degré. En admettant que pour une teneur en eau en eau et une température données, une seule valeur de la période existe, on peut écrire :

$$(a_0T + b_0)\theta^2 + (a_1T + b_1)\theta + (a_2T + b_2) - P = 0 \quad (5.2)$$

La solution d'une telle équation est de la forme :

$$\theta(P, T) = \frac{(-a_1T - b_1) \mp \sqrt{(a_1T + b_1)^2 - 4 \times (a_0T + b_0) \times (a_2T + b_2 - P)}}{2(a_0T + b_0)} \quad (5.3)$$

En outre, puisque physiquement la teneur en eau volumique ne peut pas être négative, une seule solution est valable et permet de décrire un modèle d'étalonnage, soit :

$$\theta(P, T) = \frac{(-a_1T - b_1) + \sqrt{(a_1T + b_1)^2 - 4 \times (a_0T + b_0) \times (a_2T + b_2 - P)}}{2(a_0T + b_0)} \quad (5.4)$$

Pour calculer l'évolution de la teneur en eau sur l'avenue des Érables, nous utiliserons le modèle $\theta(P, T)$, décrit par l'équation (5.4) et dont les constantes a_i et b_i sont données au Tableau 5.3.

5.2.4 Validation du modèle en laboratoire

5.2.4.1 Introduction

Dans la perspective d'exploiter notre modèle prévisionnel de la teneur en eau ($\theta(P,T)$) pour l'analyse des mesures réalisées in-situ, nous avons décidé, dans un premier temps, de valider ce dernier à l'aide des données collectées via les essais de laboratoire et de le confronter au modèle d'étalonnage que nous avons développé par le fabricant des sondes. De ce fait, précisons que le modèle développé est établi à partir des résultats issus de l'étude sur l'effet de la température et se base donc, sur des mesures réalisées pour une porosité élevée de 33,9%.

5.2.4.2 Modèle d'étalonnage du fabricant

Le fabricant précise un modèle d'étalonnage pour les sondes WCR, lequel a été développé à partir d'essais en laboratoire sur des sols naturels. L'équation (5.5) présente le modèle d'étalonnage proposé par le fabricant :

$$\theta = -0,0663 - 0,0063P + 0,0007P^2 \quad (5.5)$$

Dans la perspective de mettre en évidence la précarité du modèle proposé par le fabricant et de montrer la justesse de celui que nous proposons, nous présentons à la Figure 5.3 les valeurs des teneurs en eau calculées à partir de ces deux modèles appliqués à l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3.

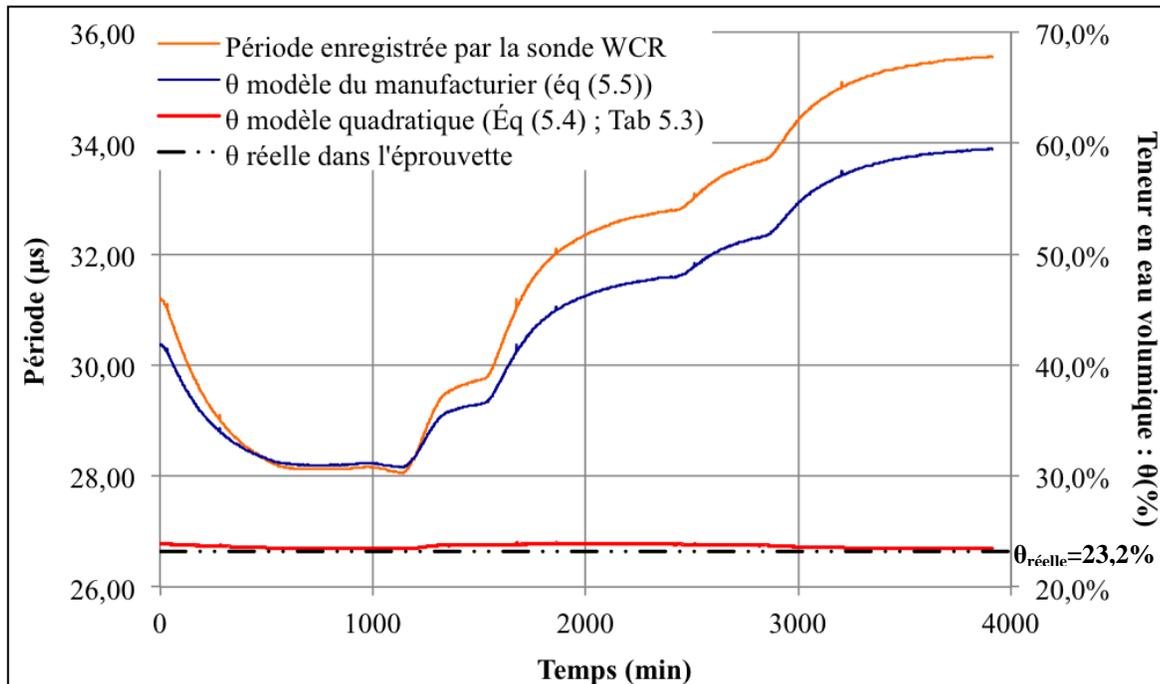


Figure 5.3 Application de l'équation d'étalonnage du fabricantier et de celle établie à partir de notre protocole aux données relatives à l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3 ($d_s=1,625$; $\theta=23,2\%$)

La Figure 5.3 montre clairement que le modèle du fabricantier n'est pas adapté. En effet, la teneur en eau volumique calculée via le modèle du fabricantier fluctue largement dans le temps, sa courbe épousant une allure similaire à celle de la période. Présentant des variations de la teneur en eau volumique de près de 20% en cours d'essai et atteignant une valeur aberrante de 59,5% au cinquième palier de mesure, il est évident que l'application de ce modèle à nos données est impossible. La raison à cela est l'absence de correction du facteur température dans le modèle. En revanche, l'application du modèle quadratique issu de notre programme expérimental nettement semble plus prometteuse. En effet, la Figure 5.3 montre que la teneur en eau volumique, calculée à partir du modèle quadratique, prenant en compte la période et la température mesurées en cours d'essai, est relativement stable. En outre, afin de valider cette observation, nous présentons à la Figure 5.4 la teneur en eau calculée à partir de notre modèle quadratique pour une échelle plus détaillée autour de la valeur de la teneur en eau volumique réelle dans l'éprouvette ($\theta_{réelle}$). La Figure 5.4 montre ainsi une teneur en

eau volumique calculée qui varie entre $\theta=23,5\%$ et $\theta=24,1\%$, soit un intervalle restreint de $0,6\%$ qui nous conforte dans l'idée qu'une correction efficace de la période mesurée est possible. Cependant, il est difficile de décrire une tendance dans l'évolution de la teneur en eau volumique calculée. En outre, nous constatons que la teneur en eau volumique moyenne calculée à partir du modèle est égale à $23,7\%$, soit un écart de $0,5\%$ avec la teneur en eau réelle du matériau de confinement constituant le corps d'épreuve. L'application du modèle quadratique développé à partir de notre programme expérimentale semble donc cohérente et permet de déterminer la valeur de la teneur en eau volumique θ en fonction de la période et de la température.

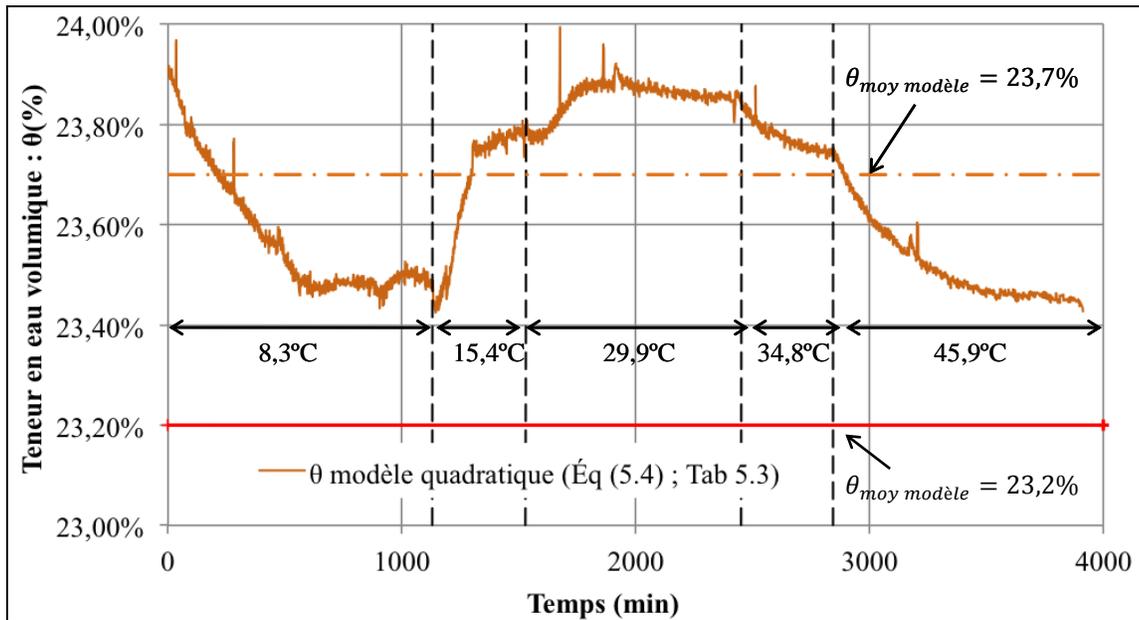


Figure 5.4 Évolution de la teneur en eau volumique calculée en fonction du temps après application de notre modèle d'étalonnage aux mesures de l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3

5.2.4.3 Les limites du modèle

Dans la perspective de valider le modèle, nous avons par la suite choisi de l'appliquer aux données de période et de températures moyennes enregistrées au cours des cinq cycles de température de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9 destinée à évaluer l'effet de la température sur la réponse des sondes, à savoir :

1. MR5-TFE-B-33,9-14,3
2. MR5-TFE-B-33,9-11,8
3. MR5-TFE-B-33,9-9,5
4. MR5-TFE-B-33,9-6,0
5. MR5-TFE-B-33,9-2,3

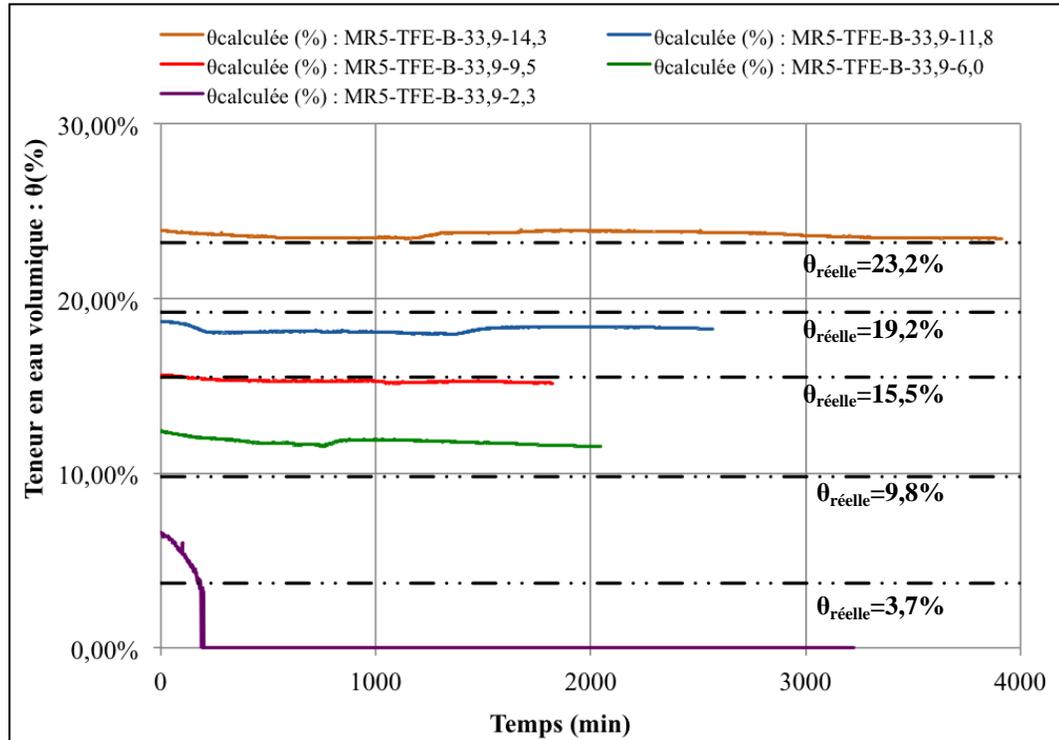


Figure 5.5 Calcul des teneurs en eau volumiques à partir du modèle quadratique de l'éprouvette MR5-TFE-33,9

La Figure 5.5 présente les teneurs en eau volumiques ($\theta(P,T)$) calculées à partir du modèle quadratique proposé. Les courbes de la Figure 5.5 montre une relative stabilité dans le temps des teneurs en eau volumiques calculées à partir du modèle quadratique pour les quatre teneurs en eau élevées ($w=14,3\%$; $w=11,8\%$; $w=9,5\%$ et $w=6,0\%$). Rappelons que pour ces teneurs en eau, les mesures ont été réalisées à divers paliers de température (Voir Tableau 4.5), montrant clairement l'efficacité de notre modèle. Néanmoins, nous constatons que le modèle ne s'applique pas pour la teneur en eau faible ($w=2,3\%$). En vue de valider ces premières conclusions, nous avons tracé à la Figure 5.6 l'évolution de la teneur en eau volumique calculée à partir du modèle quadratique proposé pour des échelles plus précises quant à la teneur en eau.

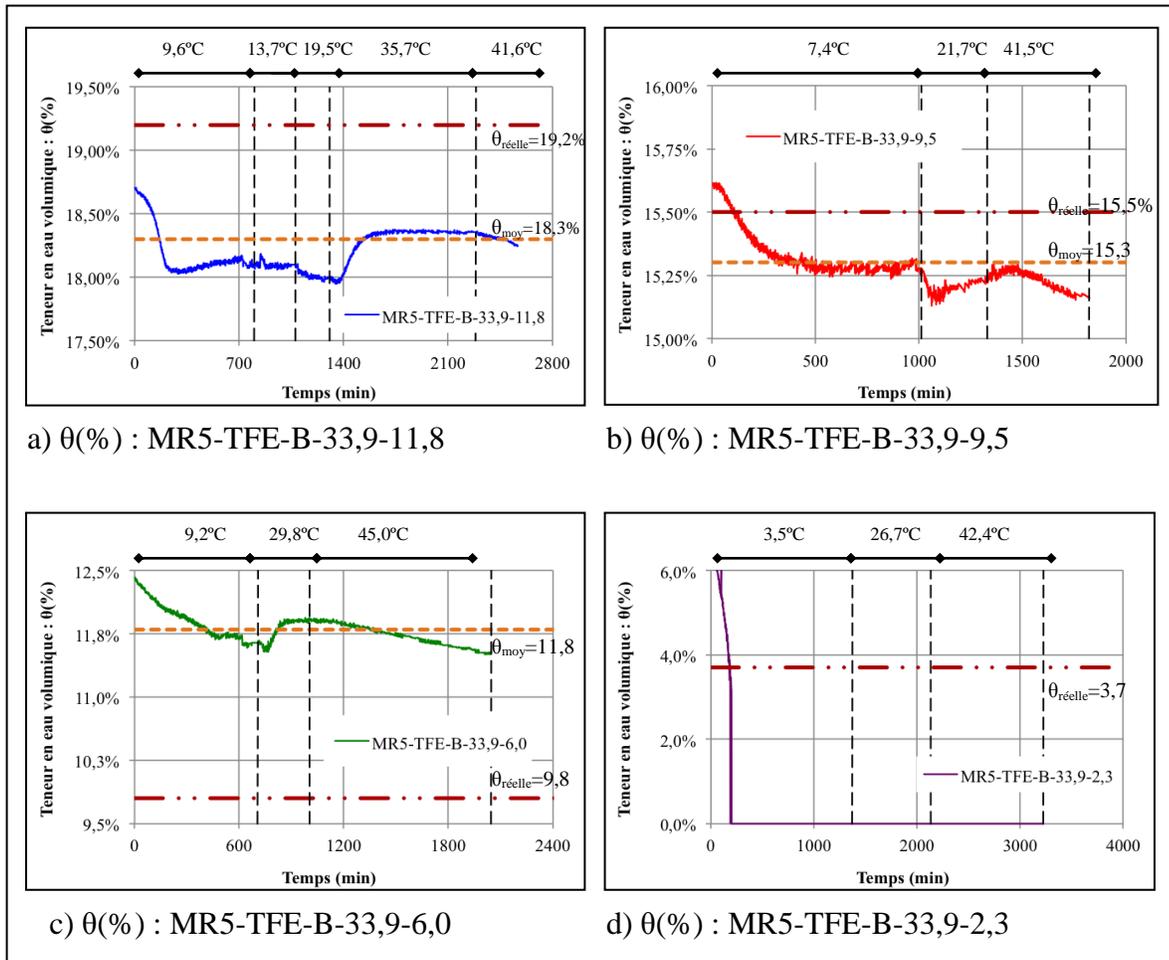


Figure 5.6 Zoom sur les calculs des teneurs en eau volumiques à partir du modèle quadratique

La Figure 5.6 a) montre que la teneur en eau volumique calculée oscille entre 18,0% et 18,7%. Dans la seconde moitié de l'essai cette teneur en eau semble néanmoins stabilisée autour de 18,4%, ce qui est proche de la teneur en eau moyenne de 18,3% qui est calculée sur l'ensemble de l'essai. Enfin, bien que la teneur en eau volumique réelle au sein du corps d'épreuve ait été mesurée égale à 19,2%, l'écart entre $\theta_{réelle}$ et θ_{moy} calculée n'est que de 0,9% et reste, dans le cadre de ce projet, une première approximation très acceptable qui confirme que l'effet de la température, s'il n'a pas complètement disparu, a cependant été nettement atténué par l'application du modèle.

La Figure 5.6 b) montre que la teneur en eau calculée pour le MR5-TFE-B-33,9-9,5 tend à diminuer au cours du temps sans pour autant se stabiliser. Ainsi, proche de 15,6% au début de l'essai, la teneur en eau calculée à partir des mesures réalisées avoisine les 15,2% après 1800 minutes d'enregistrement. Par ailleurs, nous remarquons que la teneur en eau moyenne obtenue à partir du modèle est égale à 15,3% soit seulement 0,2% de moins que la teneur en eau réelle ($\theta_{réelle}$). L'application du modèle aux résultats de cet essai est donc concluante.

Au travers la Figure 5.6 c), comme dans les trois cas précédents, il apparaît que l'application de notre modèle d'étalonnage aux données collectées lors de l'essai MR5-TFE-B-33,9-6,0, entraîne de légères fluctuations de la teneur en eau calculée. Dans le cas présent, nous constatons qu'après une première baisse significative de la teneur en eau calculée dans le premier tiers de l'essai jusqu'à une valeur de 11,5%, cette dernière augmente pour se stabiliser brièvement autour de 11,9% avant de chuter de nouveau jusqu'à 11,5% à la fin de l'essai. Il est donc difficile d'établir une tendance pour la variation de la teneur en eau calculée. En outre, avec une valeur moyenne de 11,8%, la teneur en eau calculée est près de 2% supérieure à celle mesurée dans le corps d'épreuve ($\theta_{réelle}$). L'analyse de la cohérence de notre modèle à partir de cette Figure est donc plus délicate. En effet, un écart de 2% entre la teneur en eau réelle et celle mesurée à l'aide de la sonde WCR est, dans le cadre de ce projet, plutôt significatif car il représente un large risque d'erreur dans l'exploitation des données réalisées in-situ. Le modèle montre aussi certaines limites.

Enfin, la Figure 5.6 d) présente les teneurs en eau calculées avec notre modèle pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-2,3. À travers cette Figure, il semble que le modèle quadratique développé ne s'applique pas aux mesures réalisées sur cette éprouvette. En effet, il apparaît que la teneur en eau volumique calculée chute rapidement dès le début de l'essai pour s'annuler à la 188^{ème} minute d'enregistrement. Une anomalie que nous expliquons par la forme de l'équation définissant le modèle. En effet, cette équation qui est, rappelons-le, la solution d'un polynôme du second degré, est formée, entre autres, par la racine carrée du déterminant de ce polynôme.

5.2.4.4 Conclusion pour le modèle

Notre analyse, du modèle d'étalonnage appliqué aux mesures de périodes et de températures réalisées dans le cadre de l'étude sur l'effet de la température, permet de conclure deux choses.

Tout d'abord, nous sommes en mesure de confirmer qu'une correction de la période, en particulier de l'effet de la température sur cette dernière, est possible. En effet, contrairement à l'équation établie par le manufacturier, notre modèle permet le calcul d'une teneur en eau volumique relativement stable, même s'il nous est difficile, à priori, d'interpréter la tendance des fluctuations observées.

Par ailleurs, l'application du modèle aux résultats issus des éprouvettes avec teneurs en eau élevées ($w=14,3\%$; $w=11,8\%$; $w=9,5\%$ et $w=6,0\%$) révèle des écarts variant de 0,2% à 2% entre les teneurs en eau volumiques réelles et celles calculées. Ces écarts, lorsqu'ils s'avèrent significatifs, peuvent s'avérer problématiques en vue d'appliquer le modèle à des mesures de la teneur en eau in-situ. En effet, aucun élément ne nous permet à ce jour d'estimer le taux d'approximation du modèle établi, et donc les risques d'erreurs dans la mesure de la teneur en eau. En outre, l'application du modèle aux résultats de l'éprouvette (MR5-TFE-B)-[33,9]-[2,3] n'est pas concluante. Ce constat suggère que notre modèle n'est pas adapté à la mesure de faibles teneurs en eau, du moins dans le cas présent, où la porosité est très élevée ($n=33,9\%$).

Néanmoins, si le modèle développé montre certaines limites dans son application, les résultats observés n'en demeurent pas moins encourageants. Par ailleurs, l'étude traitant de l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR (section 4.2.3) a mis en évidence l'influence de ce facteur sur les mesures de la période. Ainsi, nous pouvons conjecturer qu'une prise en compte de la porosité dans le modèle d'étalonnage pourrait le rendre plus cohérent pour la mesure de la teneur en eau dans un matériau recyclé traité à l'émulsion de bitume. Nous traiterons plus en détail cet aspect à la section 5.4.

5.3 Analyse des données collectées in-situ

À partir des résultats issus du programme expérimental en laboratoire, nous sommes en position de mieux appréhender la gestion des données enregistrées in-situ. Bien que les conclusions présentées dans la section précédente mettent en évidence certaines lacunes du modèle établi, il ressort que ce modèle permet, malgré tout, une estimation cohérente de la teneur en eau du matériau étudié lorsque celle-ci n'est pas trop faible. De ce fait, nous proposons dans la suite une application du modèle aux mesures réalisées dans la planche d'essai réalisée avenue des Érables.

5.3.1 Application du modèle aux mesures réalisées in-situ

5.3.1.1 Introduction

Les mesures des périodes et des températures qui sont exploitées par la suite ont été réalisées dans les deux zones de confinement ayant servi à mettre en place deux sondes d'humidité de type WCR CS616 dans la couche de MR5-TFE-B de la planche d'essai réalisée sur l'avenue des Érables entre le mois d'octobre 2010 et le mois d'août 2011 (*Voir* Figure 3.2).

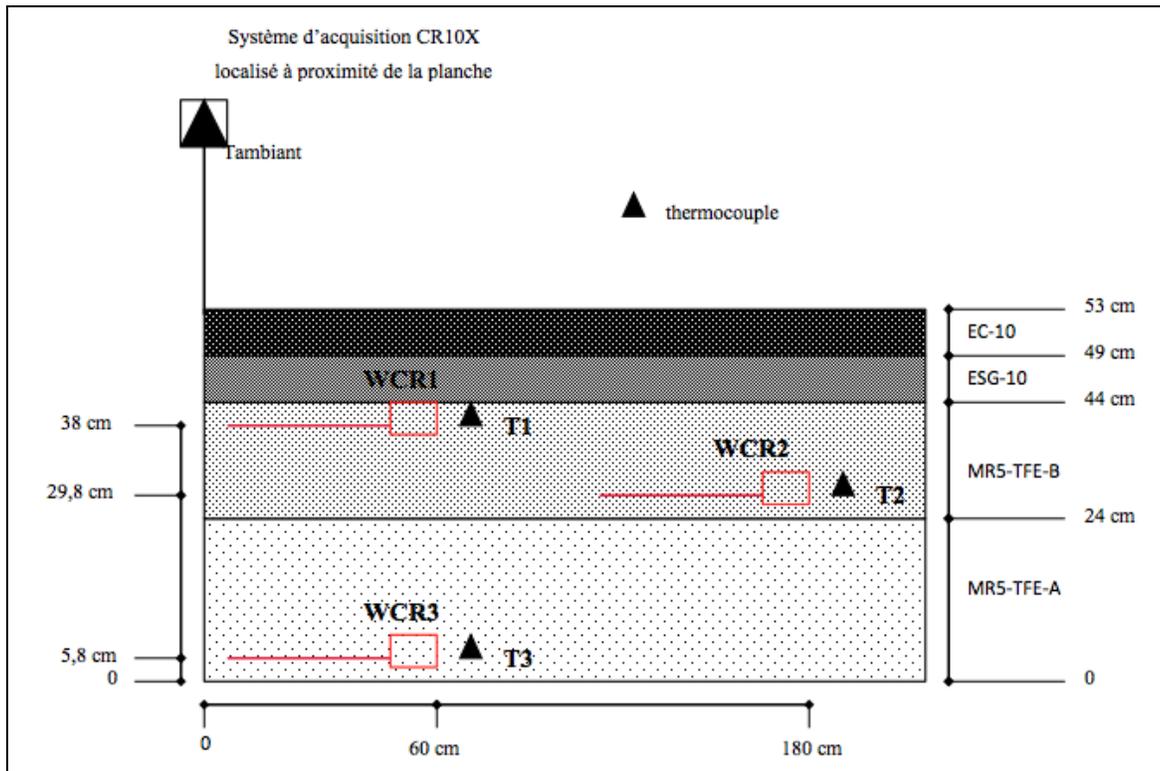


Figure 3.2 Schéma du positionnement des sondes WCR et des thermocouples dans la chaussée bitumineuse instrumentée dans le cadre de la planche d'essai avenue des Érables (coupe transversale)

L'acquisition des mesures dans chaque zone de confinement étant réalisée à toutes les heures, il est difficile de regrouper l'intégralité des données sur un même graphique (Voir Figure 5.7). C'est pourquoi, nous avons choisi de présenter les données collectées sur des périodes de quelques semaines. En particulier, nous avons souhaité mettre en lumière trois périodes déterminantes dans l'analyse de ces 10 mois d'instrumentation, soit : 1) les premières semaines d'instrumentation, 2) le début de la période hivernale et 3) après 10 mois d'acquisition.

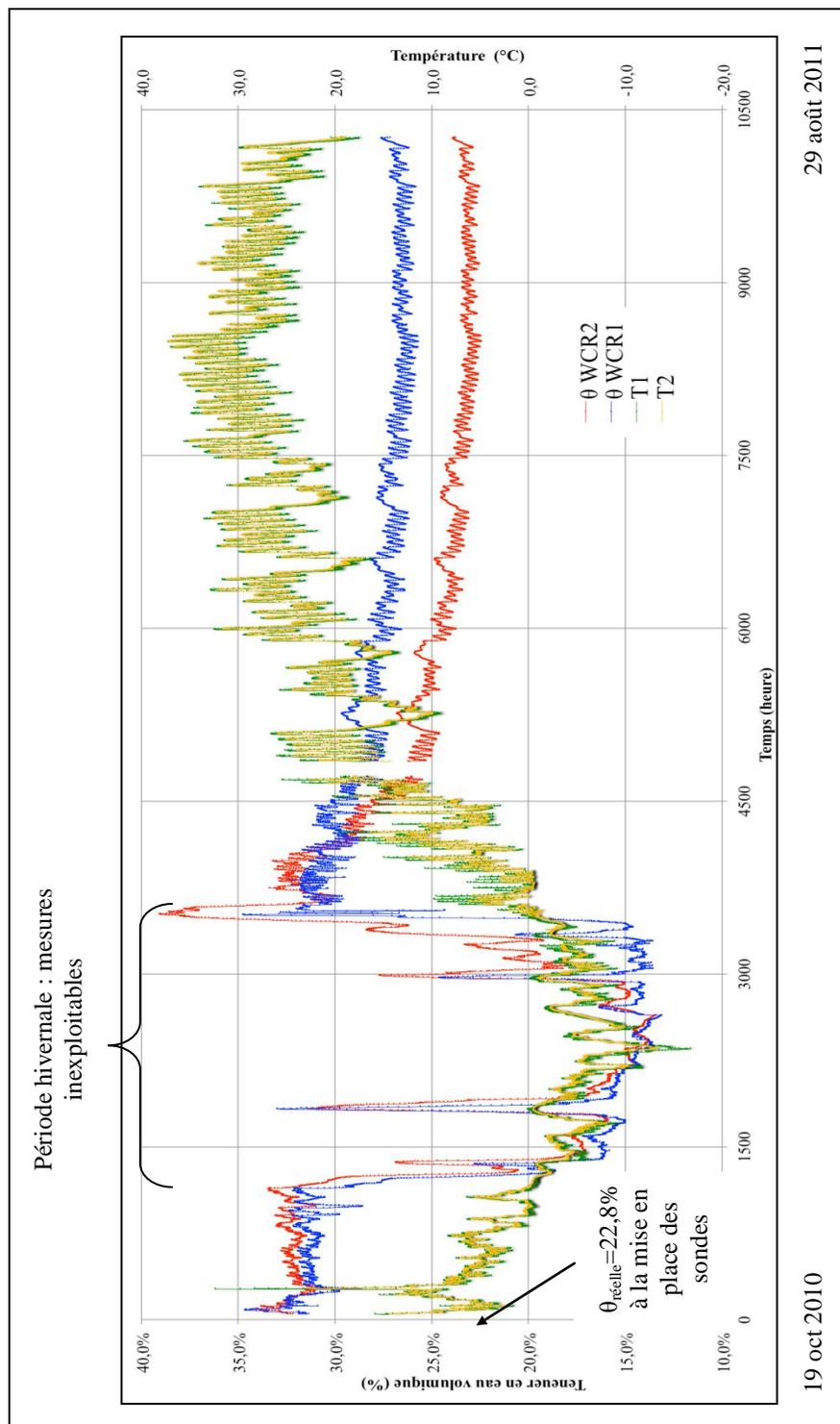
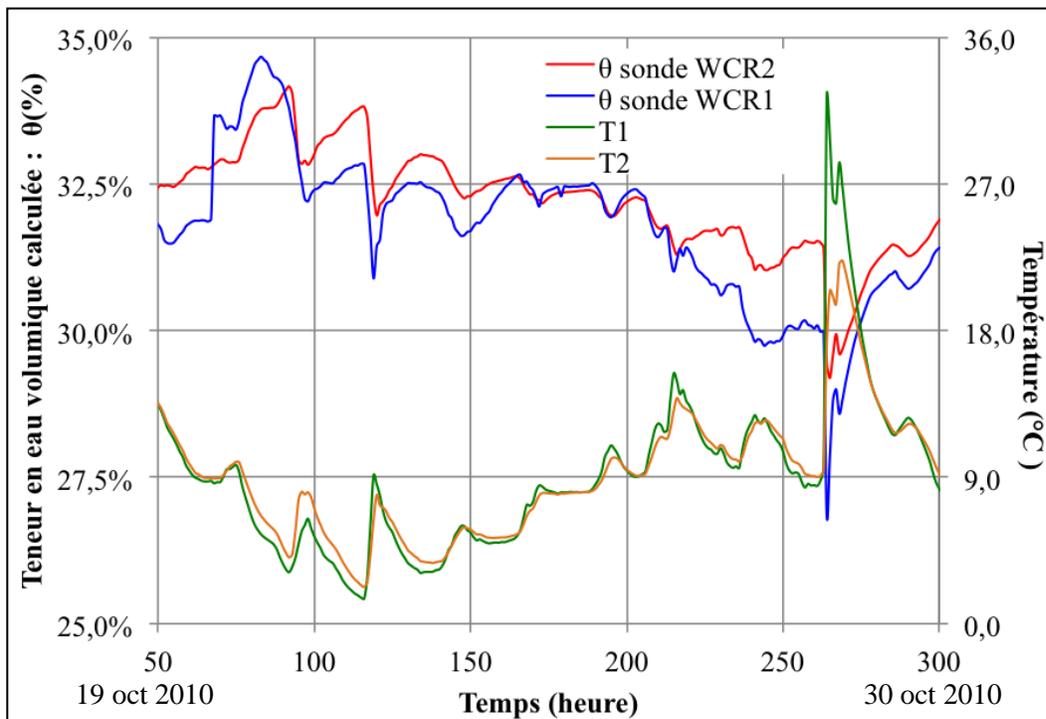


Figure 5.7 Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 29 août 2011

5.3.1.2 Les premières semaines d'instrumentation

5.3.1.3 Les premières semaines d'instrumentation

La première période regroupe les premières semaines qui ont suivi l'instrumentation de la planche d'essai avenue des Érables. Plus précisément, cette phase longue de 250 heures d'acquisition est comprise entre le 19 octobre 2010 et le 30 octobre 2010. Ainsi, la Figure 5.8 présente la teneur en eau volumique calculée à partir de l'application du modèle quadratique proposé à partir des mesures des sondes (WCR thermocouples) dans les heures qui ont suivie la mise en place des sondes.



* $\theta_{réelle}=22,8\%$ à la mise en place des sondes suivant les mesures in-situ

Figure 5.8 Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 30 octobre 2010

Les résultats présentés à la Figure 5.8, montrent que les teneurs en eau volumiques calculées

à partir des mesures in-situ via le modèle quadratique présente des fluctuations. Il semble également difficile de déduire une quelconque tendance quant à l'évolution des teneurs en eau calculées dans le haut et le bas de la couche de MR5-TFE-B. Néanmoins, nous remarquons une certaine similitude dans l'évolution des valeurs calculées aux deux niveaux de la chaussée. Cette affirmation est confortée par le fait que la teneur en eau du matériau de confinement était la même pour les deux zones instrumentée ($w=14,0\%$, soit $\theta=22,8\%$). Ainsi, il est raisonnable de penser que quelques jours seulement après la mise en place des sondes, les deux zones de confinement possèdent toujours des humidités relatives semblables. Cependant, la Figure 5.8 met en évidence des teneurs en eau calculées très élevées, oscillant autour d'une valeur moyenne de $32,5\%$ au cours des 200 premières heures d'acquisition. Ces résultats sont pour le moins surprenant compte tenu de la teneur en eau massique de 14% mesurée à la mise en place des sondes. Notons que le modèle développé en laboratoire à partir de nos essais a été établi pour une porosité importante de $33,9\%$. Ainsi, bien que nous n'ayons aucun moyen de déterminer la porosité propre à chaque zone de confinement, il est probable que celle-ci soit différente de la porosité étudiée via nos essais en laboratoire.

Les résultats présentés à la Figure 5.8 donnent des indications quant à l'évolution de la température dans la structure de la chaussée et ce, pour deux niveaux distincts. Nous remarquons que l'évolution de la température, dans le haut et le bas de la couche, n'est pas similaire. En effet, le décalage visible entre les deux courbes, suggère qu'un gradient de température existe dans l'épaisseur de 75mm qui sépare les deux sondes. De manière générale, la température apparaît plus faible dans la partie inférieure de la couche de MR5-TFE-B. Enfin, précisons que le pic de chaleur visible à la $264^{\text{ème}}$ heure d'acquisition coïncide avec l'application d'un enrobé à chaud de type ESG-10 sur le dessus de la couche instrumentée.

Enfin, nous nous devons également de souligner la large influence de la température sur les teneurs en eau présentées. En effet, bien que le modèle quadratique soit conçu pour atténuer les effets de la température sur la réponse des sondes en vue de déterminer une mesure plus

juste de la teneur en eau, il est clair ici que l'application de notre modèle n'est pas concluante. Pour preuve, lors de la mise en place de la couche de surface qui entraîne une hausse importante de la température dans la structure de la chaussée, les teneurs en eau volumiques calculées dans le haut et le bas de la couche de matériaux MR5-TFE-B chutent respectivement de 3,2% et de 2,3% en l'espace d'une heure, pour atteindre des valeurs de 26,8% et 29,2%. Une vingtaine d'heures plus tard, suite à la baisse de la température au sein du matériau, les deux teneurs retrouvent leur valeur initiale.

5.3.1.4 Le début de la période hivernale

Les données présentées à la Figure 5.9 sont issues des mesures enregistrées dans la planche d'essai entre le 29 novembre 2010 et le 30 décembre 2010. Sur cette période d'un mois, nous observons certaines anomalies dans l'évolution des teneurs en eau calculées à partir du modèle. En effet, il apparaît qu'autour de la 1150^{ème} heure d'acquisition les températures enregistrées à deux niveaux de la couche de MR5-TFE-B passent sous le point de congélation. Ce changement s'accompagne rapidement d'une baisse majeure des teneurs en eau calculées. Ainsi, entre la 1130^{ème} heure et la 1400^{ème} heure d'acquisition, les teneurs en eaux volumétriques calculés à partir du modèle quadratique se retrouvent divisées par deux! Quelques jours ont donc suffi pour que le gel s'installe dans la structure de la chaussée et vienne perturber nos prises de mesures. Ce phénomène, qui est lié à une forte baisse de la permittivité du milieu lors du passage d'un état liquide de l'eau à l'état solide, est évoqué dans la littérature. Ainsi rappelons que les sondes WCR permettent de mesurer en continu la période d'une onde électromagnétique carrée, dont la vitesse dépend de la permittivité diélectrique du matériau. Cette permittivité traduit l'aptitude d'un matériau à réfléchir l'onde électromagnétique. En outre, si la permittivité de l'eau à 20°C est voisine de 80, passée le point de congélation, celle-ci chute à 3. En d'autres termes, les sondes WCR ne permettent pas une mesure de la teneur en eau lorsque cette dernière est sous forme de glace.

Dans le cadre cette planche d'essai, nous n'avons donc pas été en mesure d'exploiter les données collectées par nos sondes in-situ, entre le début de la période hivernale, que nous

situations autour de la 1150^{ème} heure d'acquisition (5 décembre 2010), et la mi-mars 2011 correspondant à la fin de la période de dégel dans la couche de matériaux MR5-TFE-B.

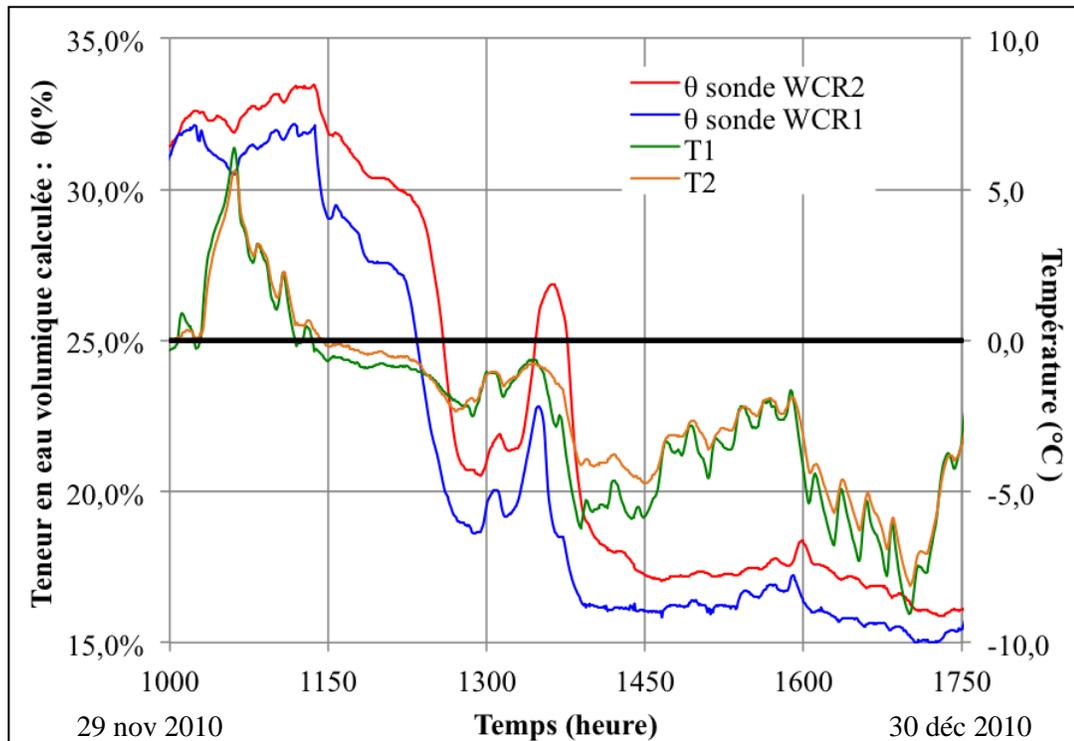


Figure 5.9 Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 29 novembre 2010 et le 30 décembre 2010

5.3.1.5 Après 10 mois d'acquisition

Après 10 mois d'instrumentation, nous avons jugé pertinent de présenter, via la Figure 5.10, les teneurs en eau calculées ainsi que les températures mesurées dans le matériau MR5-TFE-B entre le 19 août 2011 et le 28 août 2011. On constate que les teneurs en eau volumiques calculées à l'aide du modèle quadratique sont moins stables. Comme nous l'avons constaté précédemment, les variations de la température dans la chaussée engendrent d'importantes fluctuations dans la réponse de la sonde. Néanmoins, les teneurs en eau calculées entre la

9800^{ème} et la 10200^{ème} heure d'acquisition sont nettement inférieures à celles obtenues dans les premières heures ayant suivi la mise en place des sondes. En effet, alors que les premières valeurs calculées oscillaient autour de 32,5%, dans le haut et le bas de la couche de matériaux MR5-TFE-B, nous remarquons à la Figure 5.10, une teneur en eau volumique moyenne qui avoisine 26,7% dans le haut de la couche et 23,1% dans le bas. Une perte d'eau significative est donc visible après 10 mois, ceci traduisant l'évolution classique de ce type de matériau, à savoir, une montée en cohésion dans le temps due à l'évacuation de l'eau.

Par ailleurs, si cette diminution de la teneur en eau aux seins des deux zones de confinement était attendue, nous remarquons que la perte d'eau est plus significative dans le bas de la couche de matériau MR5-TFE-B. Un constat que nous expliquons en posant l'hypothèse que la couche de MR5-TFE-A située sous le matériau MR5-TFE-B joue un rôle drainant dans la structure de la chaussée. Une diminution plus importante de la teneur en eau volumique dans le bas de la couche de MR5-TFE-B serait alors logique.

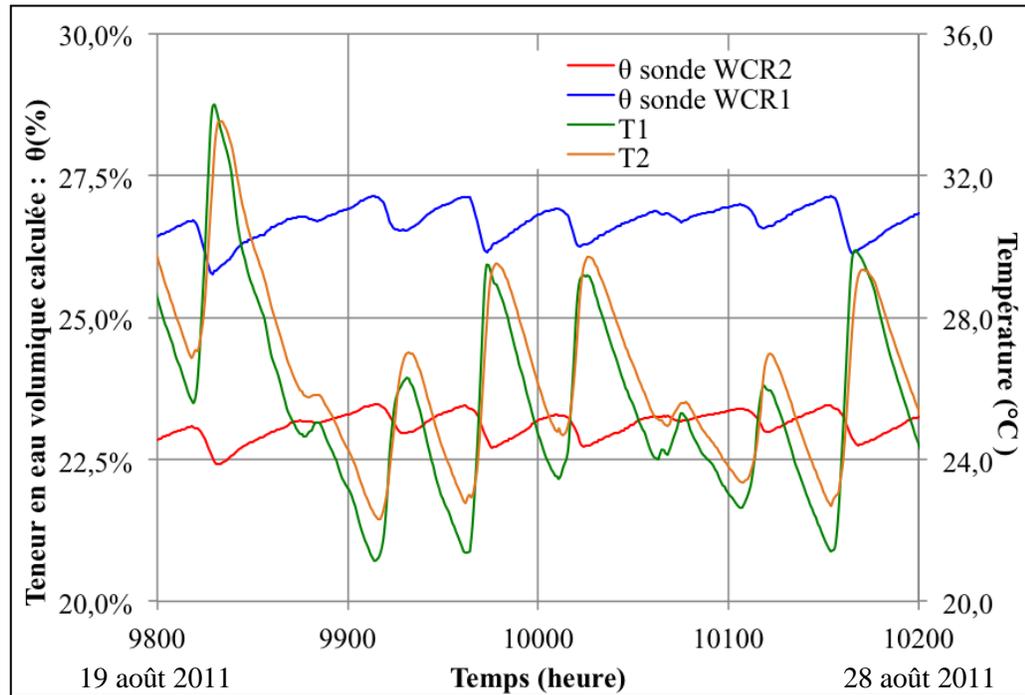


Figure 5.10 Évolution des températures et des teneurs en eau volumiques à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B entre le 19 août 2011 et le 28 août 2011

5.3.2 Extrapolation des données in-situ

Dans le cadre de l'instrumentation de la planche d'essai, nous avons choisi de créer une zone de confinement autour de chaque sonde WCR en vue d'optimiser leur utilisation. Pour ce faire, le matériau recyclé traité à l'émulsion a été tamisé in-situ pour n'en conserver que la fraction 0/5 comme matériau de remplissage pour le positionnement des sondes. Il serait donc imprudent de généraliser les teneurs en eau calculées dans les deux zones de confinement à l'ensemble de la couche de MR5-TFE-B, dont la granularité est plus grossière, fraction globale (0/14). Malgré cela, il est raisonnable de penser que la teneur en eau évolue de manière similaire dans les zones de confinement et dans le reste de la couche. En effet, bien que ce projet n'ait pas pour ambition l'étude de la mécanique des fluides au sein d'une chaussée, nous pouvons poser l'hypothèse qu'un équilibre hydrostatique s'établit rapidement,

dans l'ensemble de la chaussée, après la mise en place des différentes couches. Les forces de gravitation qui poussent l'eau à s'écouler vers le bas de la structure étant contrebalancées par un gradient de pression de direction opposée : la teneur en eau du milieu se stabilise. Néanmoins, la porosité du mélange de fraction 0/5 constituant la zone de confinement et celle de l'ensemble de la couche de MR5-TFE-B sont très différentes. Les lois d'écoulement de liquide au sein de ces deux matériaux sont donc distinctes et les données mesurées par nos sondes in-situ ne permettent pas de déterminer directement la teneur en eau réelle au sein de la couche de MR5-TFE-B.

De plus, outre l'évacuation naturelle de l'eau par gravité ou évaporation, il est également important de souligner que les précipitations, le gel hivernal ou le phénomène de remontée d'humidité par capillarité sont autant de facteurs à prendre en compte dans l'étude de l'évolution de la teneur en eau au sein du MR5-TFE-B. En revanche, en posant l'hypothèse que la vitesse d'évolution de la teneur en eau dans la zone de confinement est semblable à celle de la teneur en eau dans l'ensemble du matériau MR5-TFE-B, il est possible d'estimer l'évolution de la teneur en eau globale dans la couche de MR5-TFE-B. Ainsi, à partir de l'ensemble des données collectées au cours de 10 mois d'instrumentation, nous avons tracé l'évolution des teneurs en eau volumiques calculées à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B (*Voir Annexe VIII*) en vue d'en extraire leur pente moyenne. En outre, les échantillons de matériaux prélevés in-situ lors de la phase d'instrumentation nous ont permis de mesurer la teneur en eau massique réelle initiale de la fraction 0/14 du mélange MR5-TFE-B. Cette teneur en eau massique, mesurée égale à 10,2% (*Voir Tableau 3.6*), peut donc être associée aux teneurs en eau volumiques moyennes calculées via le modèle quadratique à partir des mesures de chaque sonde à la 50^{ème} heure d'acquisition, à savoir, respectivement 31,4% pour la sonde WCR1 et 32,3% pour la sonde WCR2.

Dans le cadre de ce projet, nous avons déterminé, par échantillonnage in-situ, la teneur en eau massique réelle du matériau de confinement entourant chaque sonde à sa mise en place. De plus, à l'aide du modèle quadratique, nous connaissons la teneur en eau volumique initiale dans les zones de confinement. De ce fait, nous sommes en mesure de tracer

l'évolution des teneurs en eau massiques du matériau MR5-TFE-B à deux niveaux de la chaussée, en considérant que la pente de chaque droite est similaire à celle caractérisant l'évolution de la teneur en eau volumique calculée.

L'Annexe VIII présente le détail des calculs utilisés pour déterminer la pente de l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée par chacune des deux sondes. Une fois appliquée à la teneur en eau massique réelle mesurée à lors de la première prise de mesure par échantillonnage, cette pente permet d'obtenir la Figure 5.11.

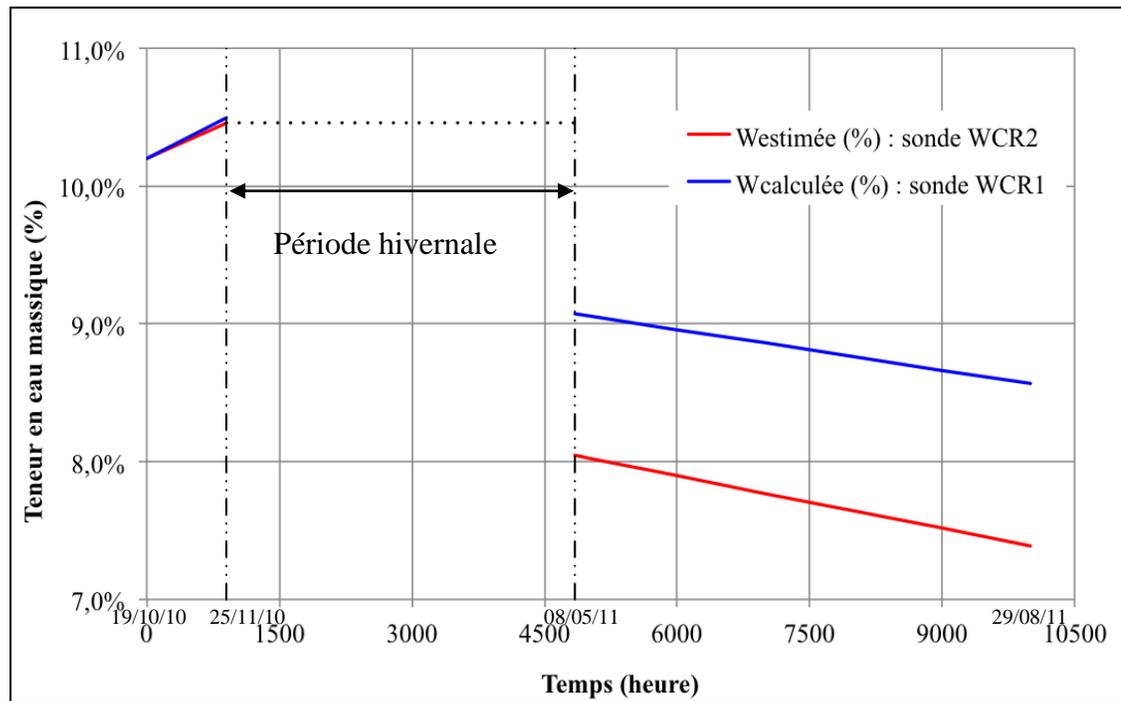


Figure 5.11 Évolution de la teneur en eau massique à deux niveaux instrumentés de la couche de MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 29 août 2011

La Figure 5.11 propose la représentation théorique de l'évolution de la teneur en eau massique à deux niveaux de la couche de MR5-TFE-B en considérant l'hypothèse présentée précédemment. La principale observation qui peut alors être faite concerne la valeur de ces teneurs en eau massique après 10 mois de mûrissement du matériau MR5-TFE-B. Ainsi, au

29 août 2011, la teneur en eau massique dans le haut de la couche de MR5-TFE-B serait de 8,6% alors qu'elle avoisinerait les 7,4% dans le bas de la couche. La teneur en eau initiale ayant été mesurée égale à 10,2%, les valeurs élevées obtenues après dix mois de mûrissement du matériau MR5-TFE-B mettent en évidence une évacuation difficile de l'eau. En effet, la littérature nous suggère que ce type de matériau doit atteindre une teneur en eau bien plus faible dès les premières semaines. Ainsi, Murphy et Emery (1996) estime qu'une fois la cure du matériau achevée, soit environ deux semaines après sa formulation, un mélange d'enrobé recyclé TFE ne devrait pas contenir plus de 2% d'eau.

Une solution simple pour valider notre estimation de la teneur en eau dans l'ensemble de la couche de MR5-TFE-B consiste alors à prélever, par carottage, des échantillons du matériau in-situ. Pour ce faire, nous sommes retournés, au mois d'octobre 2011, réaliser un carottage du matériau MR5-TFE-B mis en place dans la chaussée de l'avenue des Érables. Les échantillons prélevés ont été testés en laboratoire pour une mesure de la teneur en eau selon la méthode d'essai LC26-250 (Détermination de la teneur en eau). Ces essais nous ont permis de confirmer une teneur en eau massique de 8,6% dans le haut de la couche de MR5-TFE-B. Une donnée très intéressante puisque à l'aide de nos sondes nous l'avons estimée à 8,6% au 29 août 2011.

5.3.3 Conclusion sur l'application du modèle d'étalonnage aux mesures in-situ

L'instrumentation de la planche d'essai avenue des Érables, à l'aide de sondes d'humidité WCR, constitue une première dans l'étude des matériaux recyclés traités à l'émulsion de bitume. De ce fait, la réalisation d'un programme d'essai en laboratoire s'est révélée indispensable en vue de mieux cerner le fonctionnement de ces sondes. En outre, dans la perspective d'exploiter les mesures réalisées in-situ pour déterminer la teneur en eau du matériau constituant la couche instrumentée, nous avons cherché à extraire de nos résultats d'essais en laboratoire un modèle d'étalonnage.

Par la suite, nous avons choisi d'appliquer le modèle établi en laboratoire aux mesures réalisées pendant dix mois d'instrumentation dans la planche d'essai. Les résultats obtenus ont mis en évidence un manque de cohérence dans les teneurs en eau volumiques calculées jugées trop élevées. Néanmoins, ce constat était prévisible puisque le modèle d'étalonnage a été établi, suite à notre programme expérimental, pour une porosité donnée de 33,9%. L'influence de la porosité sur la réponse des sondes ayant été montrée au chapitre précédent, nous pensons qu'une porosité différente in-situ peut expliquer des taux d'humidité relative élevés obtenus.

Enfin, l'extrapolation des données collectées in-situ à l'aide des sondes WCR nous ont permis de dresser une estimation de la teneur en eau massique à deux niveaux de la couche de matériau MR5-TFE-B. Les résultats obtenus sont convaincants puisque validés par des mesures en laboratoire. Si des ajustements du modèle sont sans aucun doute nécessaires, les conclusions dressées dans le cadre de ce projet sont encourageantes et nous conforte dans l'idée qu'une mesure de la teneur en eau in-situ à l'aide de sondes WCR est possible.

5.4 Analyse du facteur porosité

Les analyses réalisées tout au long de ce chapitre ont révélé certaines imprécisions du modèle d'étalonnage établi à partir de notre programme expérimental. Nous pouvons cependant poser l'hypothèse que la prise en compte du facteur porosité dans le développement du modèle est un moyen d'augmenter la cohérence de notre outil d'étalonnage. Pour ce faire, nous suggérons, dans la perspective de projets futurs similaires, de chercher à évaluer la faisabilité à établir un lien entre la variation de la période mesurée par la sonde WCR et le changement de porosité du milieu. Pour ce faire, revenons à la Figure 4.11 présentant les résultats issus de notre étude sur l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR.

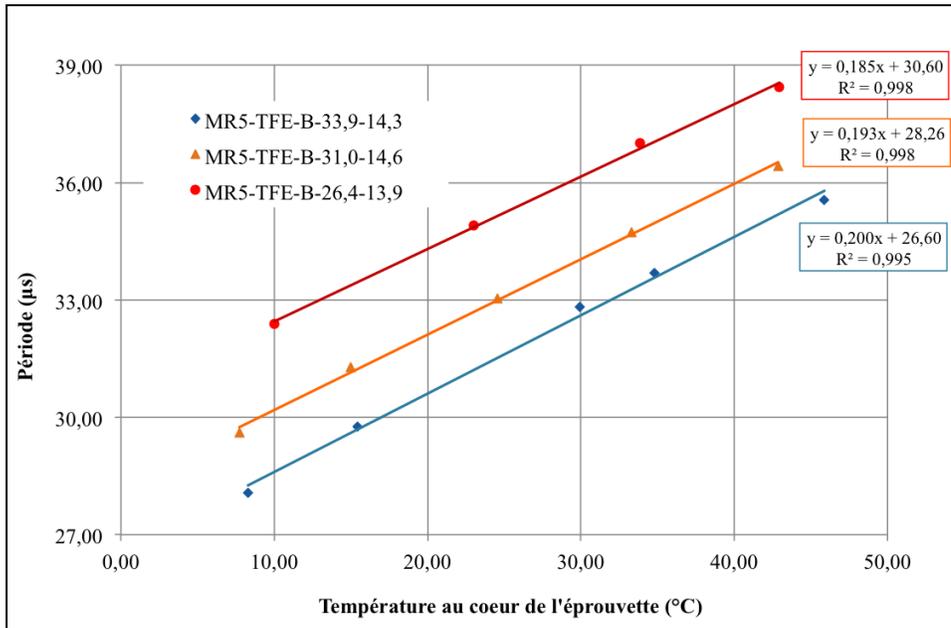


Figure 4.11 Variation des périodes mesurées en fonction de la température moyenne pour trois porosités distinctes

La première conclusion établie à partir la Figure 4.11 est que, pour une teneur en eau relativement semblable mais des porosités différentes du matériau, la période peut toujours être décrite comme une fonction linéaire de la température de la forme $P=aT+b$ où, le coefficient a est associé à la pente de la droite et b représente son ordonnée à l'origine. Le Tableau 5.4 présente les coefficients associés à chaque droite de tendance de la Figure 4.11 ainsi que leur coefficient de détermination.

Tableau 5.4 Équation des courbes de tendance établis à partir des essais sur l'étude de l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR

	n(%)	ρ_s (kg/m ³)	Teneur en eau à l'essai		a (μ s/°C)	b (μ s)	(R ²)
			w(%)	θ (%)*			
MR5-TFE-B-33,9-14,3	33,9	1,625	14,3	23,3	0,200	26,60	0,995
MR5-TFE-B-31,0-14,6	31,0	1,654	14,6	24,2	0,193	28,28	0,998
MR5-TFE-B-26,4-13,9	26,4	1,769	13,9	24,6	0,185	30,60	0,998

* $\theta(\%) = w(\%) \times \frac{\rho_s}{\rho_w}$, avec $\rho_w = 0,99758$ à $22,8^\circ\text{C}$.

En outre, il apparaît aux travers des trois essais réalisés que la période augmente lorsque la porosité diminue. Par ailleurs, nous constatons un certain parallélisme entre les trois courbes de tendance qui se traduit par une pente (a) relativement constante d'un essai à l'autre alors que les ordonnées à l'origine de ces essais (b) varient. Ceci laisse suggérer que, pour le cadre de notre projet, qu'un facteur de correction de la période pourrait être établi en fonction de la porosité du matériau de confinement. Une orientation possible est alors d'analyser la relation liant la période P et la porosité n . En outre, il est possible que la présence des tiges dans le matériau puisse induire un effet de paroi qui influence le squelette granulaire dans le volume du référentiel de mesure de la sonde. Cependant, la variation de la période ne saurait être uniquement imputable à la variation de la porosité du milieu puisqu'on constate au Tableau 5.4 que la teneur en eau volumique (θ) n'est pas exactement égale dans les trois éprouvettes. Or, l'influence de la teneur en eau volumique sur la période est indéniable et contribue à expliquer l'écart entre les résultats présentés à la Figure 4.11. Pour observer la part de l'écart associée à la différence de teneur en eau volumique des éprouvettes, on peut se référer au modèle quadratique élaboré à la section 5.2.

5.4.1 Correction du facteur porosité

Dans le but de mettre en perspective l'effet de la porosité, isolée, sur la variation de la période, nous exploitons, dans un premier temps, les équations des courbes de tendance présentées au Tableau 5.4, afin d'obtenir la période calculée par extrapolation des mesures effectuées par la sonde ($P_{\text{extrapolée}}$) pour une température de référence, choisie en l'occurrence égale à 22,8°C. Cette température est particulièrement intéressante puisque nous connaissons la période dans l'eau à 22,8°C, soit la période associée à un milieu poreux de porosité unitaire : $P_0=42,9\mu\text{s}$. Dans un deuxième temps, nous utilisons l'équation (5.1), avec les coefficients a_i et b_i définis dans le Tableau 5.3 pour le MR5-TFE-B-33,9, afin de calculer la période ($P_{\text{calculée}}$) associée aux différents teneurs en eau volumiques mesurées dans les trois éprouvettes étudiées et ce, toujours pour une température de 22,8°C. Ce faisant, nous sommes en mesure de quantifier la variation relative de la période, attribuable à celle de la teneur en eau d'une éprouvette et de corriger ainsi les périodes mesurées pour les deux autres éprouvettes ($n=31,0\%$ et $26,4\%$) dont les teneurs en eau volumiques sont légèrement différentes ($24,2\%$ et $24,6\%$ comparé à $23,2\%$). Le Tableau 5.5 regroupe les différentes données :

Tableau 5.5 Périodes calculées pour trois éprouvettes étudiées

		Période extrapolée (μs) (à $T=22,8^\circ\text{C}$)	Période calculée (μs) (à $T=22,8^\circ\text{C}$)
	$\theta(\%)$	À partir du Tableau 5.4 $P^{(1)}=aT+b$	À partir de l'équation (5.1) ⁽²⁾
MR5-TFE-B-33,9-14,3	23,2	31,16	30,69 ⁽³⁾
	24,2		31,69
	24,6		32,15
MR5-TFE-B-31,0-14,6	24,2	32,68	
MR5-TFE-B-26,4-13,9	24,6	34,82	

⁽¹⁾ valeurs extrapolées des essais pour les trois éprouvettes;

⁽²⁾ utilisation des valeurs a_i et b_i établis à la section 5.2.2 et présentés dans le Tableau 5.3;

⁽³⁾ valeur de référence pour déterminer l'influence de la teneur en eau (θ) sur la valeur de la période.

Avant d'étudier l'influence de la porosité, nous choisissons de corriger l'effet de la teneur en eau volumique sur la période mesurée en référence à celle de l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9-14,3, soit $\theta=23,2\%$. Ainsi, nous choisissons de corriger la période calculée propre aux deux autres éprouvettes en écrivant :

$$P_{\text{corrigée}} = P_{\text{extrapolée}} \times \frac{P_{\text{réf}}}{P_{\text{calculée}}} \quad (5.6)$$

De cette manière nous obtenons les valeurs de la période dont la variation peut être essentiellement rattaché à l'effet de la porosité. Le Tableau 5.6 présente les valeurs corrigées.

Tableau 5.6 Périodes corrigées à $T=22,8^{\circ}\text{C}$, de manière à ce soustraire aux écarts de la teneur en eau volumique dans les éprouvettes testées : valeurs correspondantes à une teneur en eau volumique fictive de 23,2%

	Points	Porosité : n	Période corrigée (μs) ($\theta_{\text{fictif}}=23,2\%$)	Valeur relative $\frac{P_i}{P_0}$
MR5-TFE-B-33,9-14,3	1	0,339*	30,69	0,715
MR5-TFE-B-31,0-14,6	2	0,310	31,65	0,738
MR5-TFE-B-26,4-13,9	3	0,264	33,24	0,775
Eau	4	1	42,90	1

* valeur de référence de la porosité : $n^{\text{réf}}$

Bien que la période soit corrigée en égard à la teneur en eau au Tableau 5.6, des écarts significatifs demeurent entre les trois éprouvettes. Les résultats du Tableau 5.6 sont présentés à la Figure 5.12. Le facteur porosité a donc un impact sur la mesure de la sonde et une nouvelle correction de la période s'impose. Pour ce faire, nous proposons un facteur de correction du modèle quadratique prenant en compte la porosité.

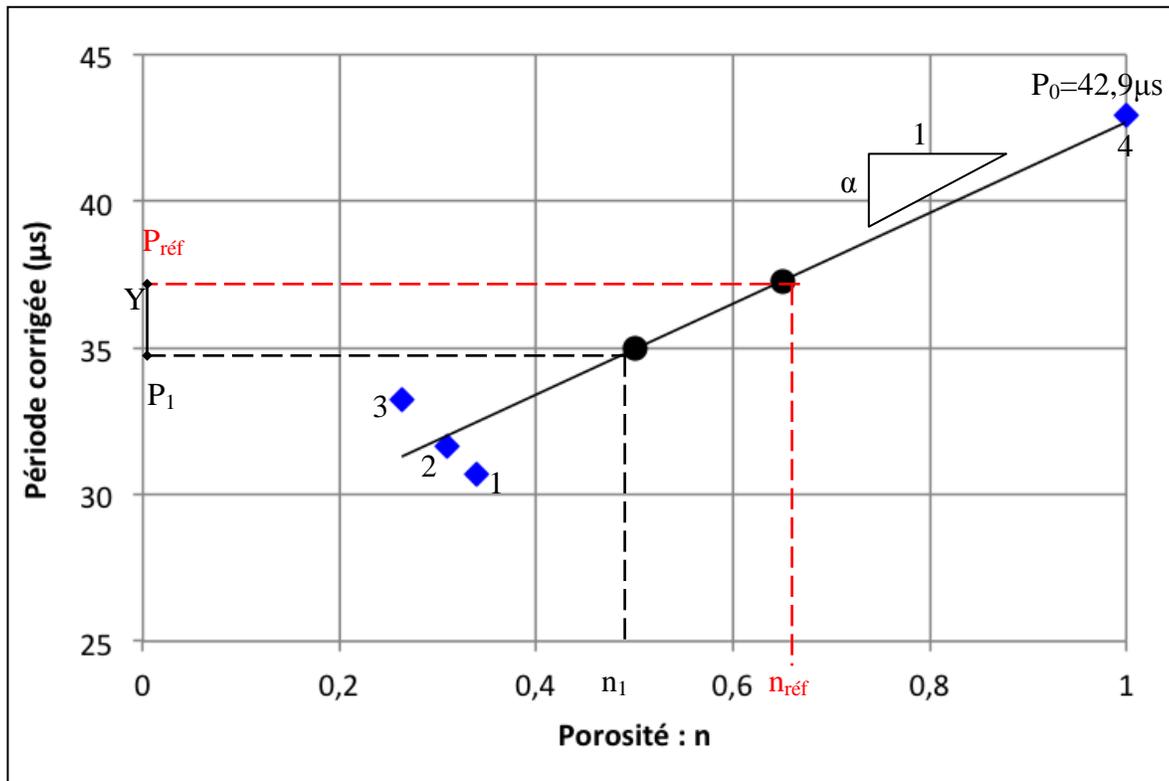


Figure 5.12 Variation de la période corrigée en fonction de la porosité du milieu
($T=22,8\text{ }^{\circ}\text{C}$)

À partir de la Figure 5.12, nous assumons une relation linéaire entre la période corrigée et la porosité et posons ainsi les principes de notre fonction de correction de la période, à savoir :

$$Y = \Delta n \alpha \quad (5.7)$$

$$P_1 + Y = P_{réf} \quad (5.8)$$

Avec $\Delta n = n_{réf} - n_1$.

On peut alors écrire à :

$$P_1 + \Delta n \alpha = P_{réf} \quad (5.9)$$

À noter que le modèle développé à la section 5.2 (Éq (5.1) ; Tab 5.3), et que l'on souhaite corriger a été développé pour l'éprouvette MR5-TFE-B-33,9. En conséquence, les valeurs $P_{réf}$ sont correspondantes aux valeurs aux valeurs établies par l'équation 5.1 et ce, pour toutes les températures.

En traitant les périodes de façon relative, on peut également raisonner de la manière suivante (Voir Figure 5.13) :

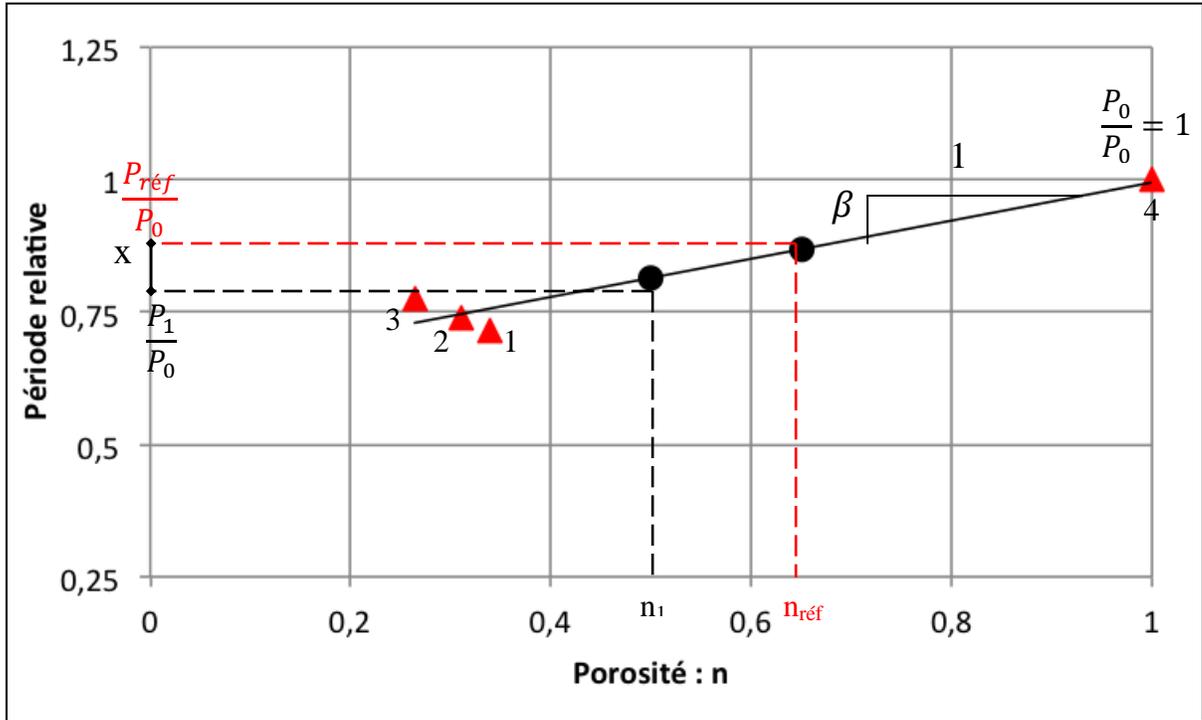


Figure 5.13 Variation de la période relative en fonction de la porosité du milieu (T=22,8 °C)

À partir de la Figure 5.13, nous écrivons :

$$\frac{P_1}{P_0} + X = \frac{P_{réf}}{P_0} \tag{5.10}$$

Soit,

$$\frac{P_1}{P_0} + \Delta n \beta = \frac{P_{réf}}{P_0} \quad (5.11)$$

Avec $\Delta n = n_{réf} - n_1$.

$$P_1 + P_0 \Delta n \beta = P_{réf} \quad (5.12)$$

Le lien entre les deux modèles étant : $\alpha = P_0 \beta$.

Si l'on admet que la relation (5.12) ne change pas avec la température (Voir Figure 4.11), c'est-à-dire que la pente est la même pour les différentes fonctions période-température, quelque soit la porosité du milieu, nous avons graphiquement :

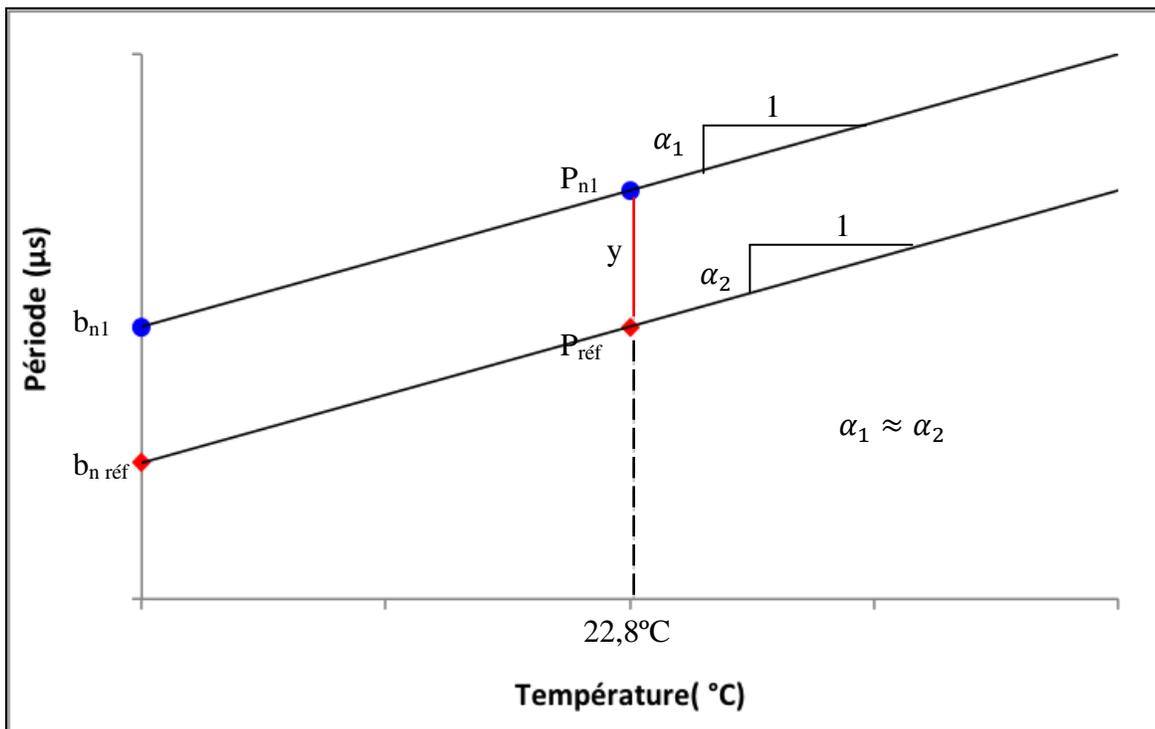


Figure 5.14 Variation de la période en fonction de la température par rapport à l'éprouvette de référence MR5-TFE-B-33,9-14,3

En considérant que b_{n_i} représente la période pour une température nulle dans une éprouvette de porosité n_i , on peut alors écrire :

$$b_{n_1} = b_{n_{réf}} + P_0 \Delta n \beta \quad (5.13)$$

Or, $b_{n_{réf}}$ correspond à « b » tel que défini par l'équation (5.1), soit :

$$b_{n_1} = b_{corrigé} = b + P_0 \Delta n \beta \quad (5.14)$$

Pour la porosité de référence $n_{réf}$, nous avons $\Delta n = 0$, donc $b_{corrigé}$ est égal à « b » tel que défini par l'équation (5.1).

Or, b défini dans le modèle quadratique de la section 5.2.2, s'écrit : $b = b_0\theta^2 + b_1\theta + b_2$

Afin de corriger l'effet de la porosité sur la période qui, rappelons-le, est définie par : $P=aT+b$, nous choisissons de modifier l'expression de b en y intégrant le facteur de correction précédemment établi. Ce facteur permet de translater la fonction période-température en référence à la porosité du milieu, pour une porosité de référence ($n_{réf}$). Ainsi,

$$b_{corrigé} = b_0\theta^2 + b_1\theta + b_2 + P_0 \Delta n \beta \quad (5.15)$$

Où les valeurs b_i sont définies au Tableau 5.3 pour le matériau MR5-TFE-B-33,9. À partir de l'équation (5.2), nous avons :

$$(a_0T + b_0)\theta^2 + (a_1T + b_1)\theta + (a_2T + b_2 + P_0 \Delta n \beta - P) = 0 \quad (5.16)$$

L'inconnue de cette équation du second degré est la teneur en eau volumique θ pour laquelle nous obtenons une solution positive :

$$\theta(P, T) = \frac{(-a_1T - b_1) + \sqrt{(a_1T + b_1)^2 - 4 \times (a_0T + b_0) \times (a_2T + b_2 + P_0 \Delta n \beta - P)}}{2(a_0T + b_0)} \quad (5.17)$$

5.4.2 Validation du modèle corrigé

En vue de valider le modèle corrigé décrit par l'équation (5.17), nous proposons de l'appliquer aux données de périodes P et de températures moyennes T enregistrées sur les trois éprouvettes au cours d'un cycle de variation de la température. Les coefficients a_i et b_i définis dans le Tableau 5.3. Les termes $\Delta n, \beta$ et P_0 sont, quant à eux, présentés dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.7 Résultats de l'application du modèle pour une correction de l'effet de la porosité

	n	P_0	Δn	β
MR5-TFE-B-33,9-14,3 (Référence)	0,339	42,90 μ s	0,000	0,36
MR5-TFE-B-31,0-14,6	0,310		-0,029	
MR5-TFE-B-26,4-13,9	0,264		-0,075	

Les Figures 5.15 montre l'évolution de la teneur en eau volumique calculée à partir du modèle quadratique initial, puis avec sa version corrigée, pour les éprouvettes MR5-TFE-B-33,9-14,3, MR5-TFE-B-31,0-14,6 et MR5-TFE-B-26,4-13,9 en cours d'essais.

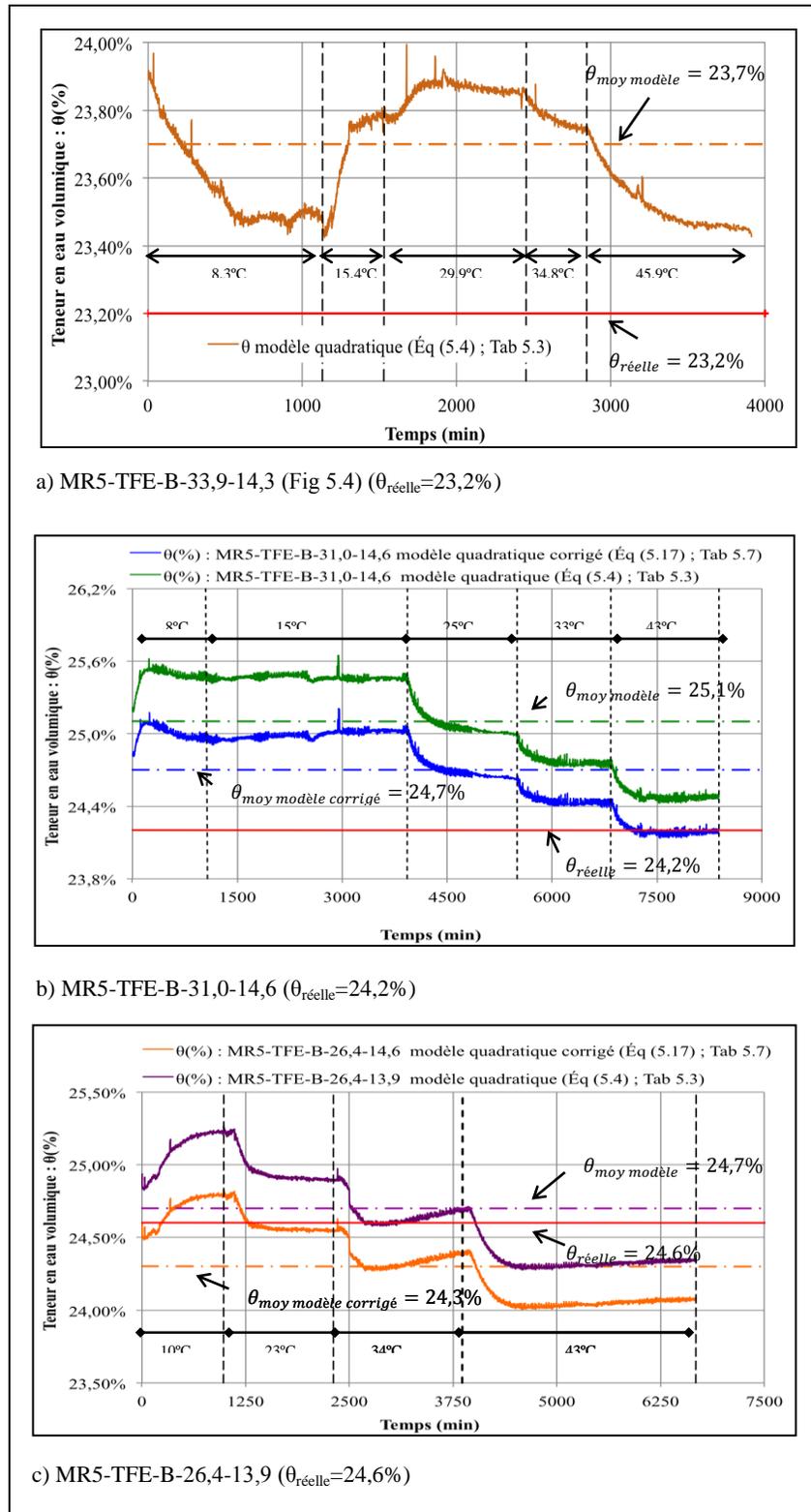


Figure 5.15 Évolution de la teneur en eau volumique en fonction du temps après application du modèle, avant et après correction

La Figure 5.15 b) traite des mesures réalisées sur l'éprouvette MR5-TFE-B-31,0-14,6 au cours d'un cycle de variation de la température allant de 8°C à 43°C. Nous remarquons tout d'abord, que la teneur en eau calculée à partir du modèle quadratique établie à la section 5.2 tend à décroître (de $\theta=25,6\%$ à $\theta=24,4\%$) suivant les différents paliers de température, quoique très stable pour les températures de 8°C à 15°C. La valeur moyenne ainsi calculée est de 25,1%, soit 0,9% de plus que la teneur en eau volumique réelle du corps d'épreuve ($\theta_{réelle}=24,2\%$). La teneur en eau moyenne calculée à l'aide du modèle corrigé (équation (5.17)) est, quant à elle, supérieure de seulement 0,5% par rapport à la valeur ciblée. Dans le cas présent, l'application du modèle quadratique corrigé, rend donc possible une approximation plus juste de la teneur en eau au sein de l'éprouvette étudiée, grâce à la prise en compte du facteur porosité.

Les résultats présentés à la Figure 5.15 c) sont, en revanche, différents. En effet, l'application du modèle quadratique corrigé (équation (5.17)) aux mesures réalisées sur l'éprouvette MR5-TFE-B-26,4-13,9, permettent d'obtenir une valeur de la teneur en eau volumique moyenne égale à 24,3%, soit 0,3% de moins que la valeur réelle $\theta_{réelle}=24,6\%$. Avec l'utilisation du modèle dans sa forme initiale, c'est-à-dire sans correction de l'effet de la porosité (équation (5.4)), la teneur en eau volumique moyenne est supérieure de seulement 0,1% par rapport à la teneur en eau volumique réelle du corps d'épreuve. Néanmoins, les écarts moyens observés restent faibles, dans le cas de l'éprouvette MR5-TFE-B-26,4-13,9.

À la lueur de cette brève analyse sur l'application du modèle quadratique corrigé, nous pouvons conclure sur une bonne cohérence de ce dernier dans le calcul des teneurs en eau volumiques présentées à la Figure 5.15. Ainsi, les valeurs obtenues sont très proches des teneurs en eau réelles. La correction apportée au modèle permet une translation de la teneur en eau volumique calculée, cependant des essais complémentaires s'imposent avant d'affirmer que le modèle corrigé entraîne une meilleure estimation de la teneur en eau volumique au sein du matériau étudié. Par ailleurs, l'influence de la température sur la réponse des sondes est encore très visible puisque des fluctuations des plusieurs dixièmes de pourcent de la teneur en eau volumique calculée sont à noter entre deux consignes de

température. Aussi, bien que le processus de correction développé dans ce mémoire nécessitera des ajustements dans le cadre de futurs projets semblables, la richesse des informations issues de notre programme expérimental, nous permet déjà de nous rapprocher de la réalité pour la mesure de la teneur en eau in-situ.

CONCLUSION

De plus en plus plébiscités par les différents acteurs de l'industrie routière, les matériaux recyclés, puis traités à froid à l'aide d'une émulsion de bitume, constituent une alternative économique et plus respectueuse de l'environnement aux enrobés traditionnels fabriqués à chauds. Par ailleurs, si en pratique ces matériaux ont fait leurs preuves en termes de performances et de durabilité, les normes relatives à leur formulation en laboratoire sont encore le sujet de nombreuses études. Entre autres, la résistance mécanique des ERF est fortement tributaire de l'évolution de la teneur au sein de sa microstructure. L'optimisation de la formulation de ces matériaux en laboratoire exige donc de bien connaître l'évolution de leur teneur en eau en condition de service couplée à celle de leur résistance mécanique.

En vue de corriger la grande incertitude qui pèse sur la mesure de la teneur en eau in-situ des matériaux recyclés traités à froid à l'émulsion, un programme expérimental a été mené dans le cadre d'un projet Recherche et Développement Coopérative (RDC), initié par le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG). Présenté à travers ce mémoire, ce travail de recherche s'est articulé autour d'une planche d'essai instrumentée à l'aide de sondes d'humidité WCR et d'un programme d'essai en laboratoire. Pour ce faire, une stratégie expérimentale a été établie sur 3 volets.

Tout d'abord, dans le cadre de la réalisation de la planche d'essai, qui constitue la première phase de notre programme expérimental, nous avons cherché à exploiter au mieux les informations recueillies via la revue de littérature afin d'optimiser la prise de mesure des sondes WCR. Ainsi, la notion de zone de confinement est introduite en vue de limiter la présence de vides autour des tiges de la sonde qui pourraient fausser les mesures et aussi, de mieux contrôler les facteurs environnants susceptibles d'influencer la réponse des sondes.

Dans le second volet de notre programme, nous avons choisi de centrer nos travaux en laboratoire au cas du matériau MR5-TFE-B pour lequel deux sondes ont été placées dans la structure de la chaussée étudiée. En vue de confectionner des corps d'épreuve instrumentés

représentatifs des zones de confinement in-situ, des essais de caractérisation, du matériau MR5-TFE-B et du MR le composant, sont réalisés pour permettre une reproduction fidèle du matériau mis en place in-situ. Dans l'optique d'étudier la réponse des sondes WCR, des essais sont ensuite menés en laboratoire pour étudier indépendamment l'influence de la teneur en eau, de la température et de la porosité sur la mesure de la période.

Le Chapitre 4 revient ainsi sur les résultats issus de ces essais. Tout d'abord, nous avons mis en évidence que l'onde électromagnétique émise par une sonde WCR voit sa vitesse de propagation ralentie par la présence d'eau et donc, sa période augmentée. Dans un deuxième temps, l'étude sur l'effet de la température nous a permis d'observer le temps de réponse d'une sonde WCR à une variation de la température. Les résultats obtenus montrent un retard d'une quinzaine de minutes de la période mesurée mais soulignent également un temps de stabilisation très long de la température au sein du matériau de confinement. Autre conclusion majeure issue de notre programme d'essais en laboratoire, la période mesurée peut être décrite comme une fonction linéaire de la température. Une constatation qui implique d'importantes fluctuations de la réponse des sondes WCR à un changement de la température, des fluctuations d'autant plus importantes que la teneur en eau du milieu est élevée. Enfin, les essais menés en vue d'évaluer l'influence de la porosité sur la mesure des sondes WCR ont également permis de souligner la dépendance de la période vis-à-vis de cet autre facteur. Ainsi, il apparaît que, pour une teneur en eau donnée et fixe, la période mesurée tend à augmenter lorsque la porosité diminue. Cette observation sous-entend que la présence de vides autour des tiges de la sonde facilite la propagation de l'onde émise et fausse alors la prise de mesure.

La phase III du projet, qui regroupe l'analyse des résultats s'est articulée autour de notre objectif principal, à savoir, exploiter rigoureusement les mesures des sondes WCR in-situ pour évaluer la teneur en eau dans des matériaux recyclés traités à froid à l'aide d'une émulsion. Pour ce faire, nous avons cherché à tirer au mieux parti de nos résultats d'essais en laboratoire afin de développer un modèle d'étalonnage. En particulier, à partir de la relation linéaire établie entre la période et la température, nous avons souhaité faire ressortir la teneur

en eau volumique en l'introduisant dans la définition même de la fonction $P=aT+b$. Par ce biais, notre modèle d'étalonnage s'est bâti autour d'une solution d'équation du second degré dont l'inconnue est la teneur en eau volumique.

Au regard des conclusions issues de l'application de notre modèle aux résultats du programme d'essais en laboratoire, il apparaît que ce dernier permet le calcul d'une teneur en eau volumique relativement stable. Des écarts, parfois significatifs, entre la teneur en eau volumique moyenne calculée et la valeur réelle sont également observés. Il demeure cependant difficile de les justifier ou d'évaluer le taux d'approximation du modèle établi. En outre, nos résultats suggèrent que, dans le cas d'une porosité élevée, le modèle ne s'applique pas pour la mesure de faibles teneurs en eau. Néanmoins, si le modèle d'étalonnage développé à partir de notre programme expérimental montre certaines limites dans son application, les résultats observés n'en demeurent pas moins très encourageants. En effet, si son application aux données collectées dans la planche d'essai ne permet pas une mesure directe de la teneur en eau au sein du matériau constituant la couche instrumentée, une extrapolation des résultats obtenus via le modèle et des mesures réalisées en laboratoire nous a permis de réaliser une estimation probante de la teneur en eau au sein de la couche de matériau MR5-TFE-B après 10 mois de service. Par ailleurs, nous concluons sur la nécessité d'une prise en compte du facteur porosité lors du développement du modèle. Pour ce faire, nous proposons une correction du modèle quadratique précédemment établi en partant du principe que la porosité est un facteur de translation des fonctions période-température à l'origine du modèle. À cet égard, notre analyse conclue qu'il est possible de prendre en compte l'effet de la porosité. Des ajustements du modèle d'étalonnage proposé dans ce mémoire devront donc être réalisés, dans le cadre de futurs projets similaires, en vue de développer un modèle d'étalonnage plus complet. Dans cette optique, nous insistons sur l'importance de la phase I, à savoir la réalisation de la planche d'essai. En effet, afin d'optimiser le modèle et ainsi, d'exploiter au mieux les données collectées in-situ, nous recommandons de respecter quatre étapes fondamentales dans le processus d'instrumentation de la chaussée : 1) mettre en place un thermocouple au plus près de la sonde pour un relevé en continu de la température, 2) déterminer la teneur en eau du matériau à la mise en place de

la sonde, 3) déterminer la densité sèche du matériau de confinement et 4) déterminer la porosité du matériau au sein de la zone de confinement.

Finalement, l'objectif principal de notre projet est atteint puisque nous avons su exploiter les mesures des sondes WCR mises place dans la planche d'essai pour en déduire, grâce à notre programme d'essai en laboratoire, une mesure juste de la teneur en eau du matériau MR5-TFE-B.

ANNEXE I

PROCÉDURE POUR LA RÉALISATION D'UNE ÉPROUVETTE INSTRUMENTÉE

Cette annexe vise à décrire les étapes du protocole établi en laboratoire pour la réalisation d'éprouvettes instrumentées à l'aide d'une sonde WCR et de thermocouples.

1) Préparation du moule

- le moule est tout d'abord pesé vide. Des mesures de sa masse sans ses parois amovibles sont également nécessaires afin de permettre une évaluation de la perte d'eau du matériau par pesée;
- un spray anti-adhérence est appliqué sur les faces intérieures du moule afin de faciliter le démoulage du matériau à la fin du protocole.

2) Mise en place de la première couche de matériau de confinement

- une première couche épaisse de 36mm d'enrobé MR5-TFE-B (fraction 0/5) est déposée dans le moule;
- un bourroir est utilisé pour compacter les bords du moule et éviter la formation de vides;
- l'ensemble de la couche est finalement compacté. En fonction de la compacité visée, un compacteur de plaque BBPAC peut-être utilisé ou bien, de manière similaire à ce qui a été réalisé in-situ, un dameur manuel est préféré (*Voir Figure-A I-1*).



Figure-A I-1 Compactage du matériau de confinement au sein de l'éprouvette :
a) Compactage à l'aide d'un dameur manuel ;
b) Compactage à l'aide d'un compacteur de plaque BBPAC

- 3) Positionnement de la sonde WCR et mise en place de la deuxième couche de matériau de confinement
- la sonde est centrée sur la première couche de matériau compactée (*Voir Figure-A I-2*);
 - son câble d'alimentation passe par l'orifice de la paroi latérale du moule et est directement relié au système d'acquisition;
 - une deuxième couche de matériau MR5-TFE-B (fraction 0/5) épaisse de 36mm est placée sur la sonde ;
 - un bourroir est utilisé pour compacter les bords du moule ainsi que l'espace entre les tiges de la sonde afin de limiter la création de vides qui fausserait les mesures;
 - l'ensemble de la couche est finalement compacté de manière similaire à la première couche.



Figure-A I-2 a) Mise en place de la sonde sur la première couche compactée ; b) Compaction de la deuxième couche à l'aide d'un bourroir pour limiter la formation de vides

- 4) Positionnement des thermocouples et de la troisième couche de matériau de confinement
- les trois thermocouples sont positionnés sur la deuxième couche compactée (*Voir Figure-A I-3*);
 - leurs câbles sont préalablement passés dans l'orifice de la paroi latérale du moule et sont directement reliés au système d'acquisition;
 - une troisième couche de matériau MR5-TFE-B (fraction 0/5) épaisse de 37mm est placée sur la sonde;

- un bourroir est utilisé pour compacter les bords du moule afin de limiter la création de vides;
- l'ensemble de la couche est finalement compacté de manière similaire aux deux précédentes couches (Voir Figure-A I-4).

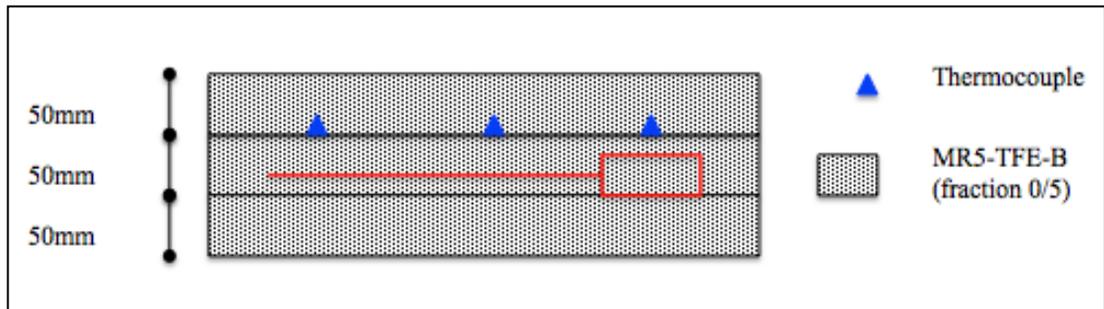


Figure-A I-3 Schéma du positionnement des thermocouples dans l'éprouvette instrumentée



Figure-A I-4 Dernière couche de l'éprouvette compactée

ANNEXE II

SCELLAGE D'UNE ÉPROUVETTE INSTRUMENTÉE

Cette annexe vise à décrire les étapes du protocole établi en laboratoire pour le scellage des éprouvettes instrumentées en vue d'empêcher toute perte d'eau du matériau de confinement.

1) Préparation du moule

- les deux parois amovibles du moules sont scellées au reste du moule à l'aide d'une pâte de silicone qui forme un joint étanche;
- les parois extérieures du moule sont essuyées afin de permettre une bonne adhérence du film plastique.

2) Application d'un film plastique

- l'extrémité du film plastique est collée à l'une des parois du moule à l'aide d'un ruban adhésif afin de faciliter le déroulage du film. Le film doit rester aussi tendu que possible lors de son application pour limiter la formation de bulles d'air (*Voir Figure-A II-1*);
- le moule est enveloppé par trois couches de film dans le sens longitudinal ainsi que trois couches latéralement;
- un ruban adhésif est finalement utilisé pour sceller parfaitement l'extrémité du film plastique.

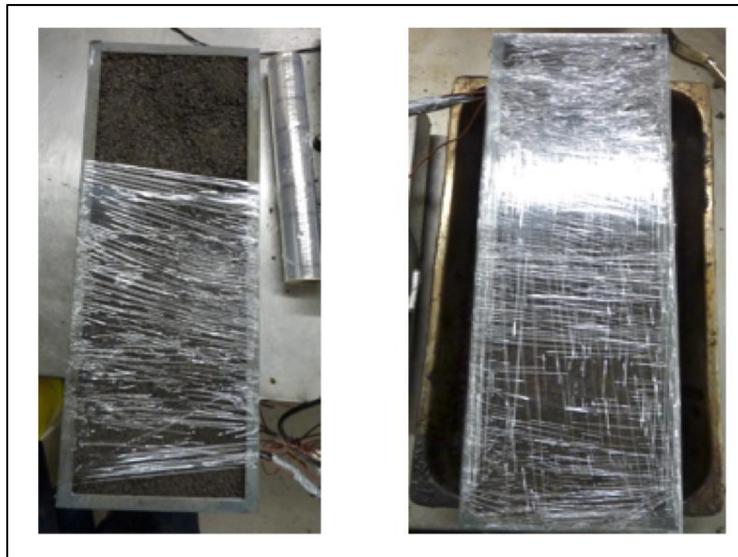


Figure-A II-1 Application d'un film plastique en guise de premier isolant autour de l'éprouvette fraîchement confectionnée

3) Application de la cire de paraffine

- la paraffine, qui se présente sous la forme d'une plaque de 400mm x 30mm x 20mm est tout d'abord découpée en sections rectangulaires plus petites afin de faciliter sa manipulation;
- un échantillon de paraffine est placé dans un bol à l'étuve à 100°C. Une fois fondue, la paraffine est coulée sur le film plastique couvrant l'éprouvette. Cette opération se répète sur chaque face de l'éprouvette afin de permettre un enrobage complet (*Voir Figure-A II-2*);
- une fois entièrement scellé (*Voir Figure-A II-3*), le moule est pesé. Cette mesure constitue la masse de référence qui rend possible un contrôle de la perte de masse tout au long du protocole.



Figure-A II-3 Application de la cire de paraffine fondue sur l'éprouvette préalablement scellée par un film plastique



Figure-A II-2 Éprouvette scellée dans la paraffine

ANNEXE III

FORMULATION DU MATÉRIAU DE CONFINEMENT EN LABORATOIRE

Dans le cadre de ce projet, toutes les éprouvettes instrumentées utilisées lors du programme d'essais en laboratoire sont confectionnées avec le matériau de confinement formulé en laboratoire. La présente annexe expose le protocole de formulation développé pour la réalisation de la première éprouvette ($w=14\%$ et $n=33,9\%$). Ce protocole a été scrupuleusement respecté pour la confection des autres éprouvettes.

1) Notations

En vue de simplifier la présentation des données utiles à la formulation du matériau de confinement, les notations suivantes vont être utilisées :

$M_{H.ag}$	Masse humide de d'agrégats	
$M_{S.ag}$	Masse sèche d'agrégats	
$M_{HT.ag}$	Masse humide totale de l'échantillon	[1]
$\% \omega_{ag}$	Teneur en eau de l'agrégat	[2]
$M_{ST.ag}$	Masse sèche totale de l'échantillon	[3]
$\% c$	Pourcentage de ciment	[4]
M_c	Masse de ciment	[5]
D_{br-EC}	Dosage de bitume résiduel de l'émulsion ciblée	
$\% E$	Pourcentage d'émulsion d'ajout	[6]
M_{TE}	Masse d'émulsion totale	[7]
$M_{eau.ag}$	Masse d'eau dans les agrégats	[8]
F_{br-E}	Fraction de bitume résiduel dans l'émulsion	[9]
$M_{eau.E}$	Masse d'eau dans l'émulsion	[10]
ω_{cible}	Teneur en eau optimale de compaction	[11]
$M_{T.eau}$	Masse d'eau totale nécessaire	[12]
$M_{eau.ajout}$	Masse d'eau d'ajout	[13]

2) Masse du mélange

La confection d'une éprouvette instrumentée de volume $450 \times 150 \times 110 \text{ mm}^3$, nécessite approximativement 12000g du matériau de confinement (fraction 0/5 du matériau MR5-TFE-B) en fonction de la porosité visée. En outre, de manière à pouvoir effectuer différents tests sur le matériau de confinement, tels que des mesures de teneur en eau, de densité brute ou de densité maximale, nous avons décidé de formuler systématiquement des gâchées de 17000g de matériaux recyclés traités.

3) Teneur en eau de l'agrégat

Conformément à la méthode d'essai LC26-002 du Ministère des Transports du Québec sur la formulation des enrobés à froid, l'agrégat utilisé dans le mélange est préalablement séché à 50°C pendant 48 heures. La teneur en eau $\% \omega_{ag}$ de l'agrégat est donc nulle.

4) Teneur en ciment

Le pourcentage de ciment $\%c$ à ajouter par rapport à la masse sèche d'agrégat a été fixé en fonction des recommandations de l'industriel comme égal à 0,70%.

5) Teneur en eau ciblée

La teneur en eau ciblée ω_{cible} lors de l'étalonnage des sondes en laboratoire est fixé d'après les résultats de mesure de teneur en eau sur les échantillons prélevés en chantier lors de l'instrumentation. Dans le cas présent, nous cherchons à formuler un matériau de confinement similaire à celui utilisé in-situ, c'est-à-dire avec une teneur en eau massique de 14%. En outre, nous avons exposé, dans la section 3.2.3 un détail majeur lié au séchage de l'agrégat à 50°C . En effet, il apparaît qu'un séchage à 50°C implique qu'une partie de l'eau reste piégée dans les pores de l'agrégat (environ 1%). Afin d'atteindre une teneur en eau de 14%, nous avons donc choisi de cibler une teneur en eau de 13% lors de la formulation.

6) Teneur en émulsion d'ajout

Pour s'assurer d'une reconstitution fidèle en laboratoire du matériau posé in-situ, les résultats des différents tests d'extraction sont utilisés pour déterminer le pourcentage d'émulsion d'ajout $\%E$. Comme expliqué à la section 3.2.3 après exploitation de ces résultats, nous sommes arrivés à la conclusion qu'une formulation juste du matériau de confinement en laboratoire nécessite un pourcentage d'émulsion d'ajout de 3,08%.

7) Formulation

Le Tableau-A III-1 regroupe les calculs développés pour la formulation du matériau MR5-TFE-B en laboratoire.

Tableau-A III-1 Formulation du matériau MR5-TFE-B (fraction 0/5)

DONNÉES			
$F_{bR-E} = [9]$	60%	$\%c = [4]$	0,70%
$M_{HT.ag} = [1]$	17000	$\%w_{ag} = [2]$	0,00%
$W_{opt-ciblé} = [11]$	13,0%	$\%E = [6]$	3,08%
CALCULS DE FORMULATION (les masses sont en gramme)			Masses pour le mélange (g)
$M_{H.ag} = [1]$	$= [1]$	17 000,0	17000,0
$\%w_{ag} = [2]$	$= [2]$	0,00%	
$M_{ST.ag} = [3]$	$= [1] / (1 + [2] / 100)$	17 000,0	
$M_C = [5]$	$= [4] * [3] / 100$	119,0	119,0
$M_{TE} = [7]$	$= [6] * ([3] + [5])$	527,3	527,3
$M_{eau.ag} = [8]$	$= [1] - [3]$	0,0	
$M_{eau.E} = [10]$	$= [7] * (1 - [9] / 100)$	210,9	
$M_{T.eau} = [12]$	$= [11] * ([3] + [5] + [7] * [9] / 100)$	2266,6	
$M_{eau.ajout} = [13]$	$= [12] - ([8] + [10])$	2055,7	2055,7

8) Mesure de la teneur en eau du matériau de confinement

Le matériau de confinement fraîchement formulé, il est indispensable, dans le cadre de notre programme d'essai, de mesurer la teneur en eau du matériau qui va constituer l'éprouvette instrumentée. Pour ce faire, un échantillonnage du matériau de confinement après malaxage est réalisé suivant la méthode LC26-005 (Échantillonnage) en vue d'une mesure de la teneur en eau suivant la méthode LC26-250 (Détermination de la teneur en eau).

9) Mesure de la densité bute sèche du matériau de confinement

Dans l'optique d'une caractérisation globale du matériau de confinement propre à chaque éprouvette, des mesures systématiques de la densité brute sèche d_{mb} du matériau fraîchement formulé sont réalisées. Pour ce faire, deux briquettes Marshall, numérotées 1

et 2, sont confectionnées suivant la méthode LC26-002 (Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion) à partir de deux échantillons du matériau de confinement. Les résultats, obtenus à partir du matériau de confinement constituant la première éprouvette, sont présentés dans les Tableau-A III-2 et III-3. Ces tableaux ont été développés dans le respect de la méthode d'essai LC26-040 (Détermination de la densité brute et de la masse volumique des enrobés à chaud compactés).

Tableau-A III-2 Densité brute Dmb 1 mesurée pour le matériau MR5-TFE-B (fraction 0/5) à partir de la brique Marshall numéro 1

Mesure de la Dmb 1 (Masse en gramme)			
Masse de la brique humide compactée + moule		2210,0	[4]
Masse du moule		1391,2	[6]
Masse brique humide compactée	B	818,8	[4] – [6]
Masse brique humide compactée après 1 jour		801,0	[5]
Masse brique compactée dans l'eau	E	408,4	[7]
Masse brique compactée saturée superficiellement sèche	F	802,3	[8]
Masse brique compactée sèche (étuve)	A	718,0	[9]
Température de l'eau (°C)	T _{eau}	23,5	[10]
Densité de l'eau à la température T _{eau} (g/cm ³)	ρ _{eau}	0,997417892	
Densité brute de la brique	Dmb	1,823	A/(F-E)
Volume brique compactée (cm ³)	V _{BC}	394,9	(F-E)/ρ _{eau}
Masse volumique humide compactée (kg/m ³)	ρ	2 073	B/V _{BC} * 1000
Teneur en eau de la brique	% w	14,0%	(B-A)/A

Tableau-A III-2 Densité brute Dmb 1 mesurée pour le matériau MR5-TFE-B
(fraction 0/5) à partir de la briquelette Marshall numéro 2

Mesure de la Dmb 2 (Masse en gramme)			
Masse de la briquelette humide compactée + moule		2127,0	[4]
Masse du moule		1378,6	[6]
Masse briquelette humide compactée	B	748,4	[4] – [6]
Masse briquelette humide compactée après 1 jour		731,9	[5]
Masse briquelette compactée dans l'eau	E	343,5	[7]
Masse briquelette compactée saturée superficiellement sèche	F	733,2	[8]
Masse briquelette compactée sèche (étuve)	A	656,3	[9]
Température de l'eau (°C)	T _{eau}	23,5	[10]
Densité de l'eau à la température T _{eau} (g/cm ³)	ρ _{eau}	0,997417892	
Densité brute de la briquelette	Dmb	1,684	A/(F-E)
Volume briquelette compactée (cm ³)	V _{BC}	390,7	(F-E)/ρ _{eau}
Masse volumique humide compactée (kg/m ³)	ρ	1 915	B/V _{BC} * 1000
Teneur en eau de la briquelette	%w	14,0%	(B-A)/A

Le Tableau-A III-4 présente la densité brute moyenne du matériau MR5-TFE-B à partir des deux briquelettes Marshall étudiées :

Tableau-A III-4 Densité brute moyenne du matériau
MR5-TFE-B

Densité brute moyenne (g/cm ³)	3,507
--	-------

10) Mesure de la densité maximale du mélange

Une étude exhaustive du matériau de confinement utilisé pour confectionner les éprouvettes instrumentées utiles à notre programme d'essai en laboratoire implique une mesure de la densité maximale du mélange d_{mm} . Dans ce but, deux mesures de la densité maximale du matériau de confinement sont effectuées suivant la méthode LC26-045 (Détermination de la densité maximale). Les mesures propres au matériau de confinement constituant la première éprouvette, sont présentés dans le Tableau-A III-5.

Tableau-A III-5 Résultat de la mesure de densité maximale du matériau
MR5-TFE-B (fraction 0/5)

		MASSE (g)			D_{mm}
Température de l'eau (C)	Facteur de correction température	Échantillon dans l'air (A)	Récipient rempli d'eau + plaque (F)	Récipient + échantillon + eau + plaque (G)	$(A/(A+F-G))*1,003221751$
24	1,00322175 1	1049,3	5491,4	6054,4	2,165
24	1,00322175 1	1068,8	5544,1	6114,4	2,151
				D_{mm} moyen	2,158

ANNEXE IV

LONGUEURS EFFECTIVES ET TEMPS DE DÉLAIS

1) Définition de la période

Les sondes WCR de type CS616 utilisées dans le cadre de ce projet sont munies de deux tiges métalliques parallèles longues de 300mm et directement connectées au circuit imprimé situé dans la tête de la sonde. Benson et Wang (2006) expliquent le fonctionnement du système de la manière suivante : un amplificateur de signal règle la sortie sur l'un des états qui contrôlent le circuit électronique. Lorsque le circuit change d'état, une onde électromagnétique est émise et se propage le long des tiges de la sonde. Le signal est réfléchi à l'extrémité des tiges et revient vers l'amplificateur de signal. Une section du circuit électronique détecte alors le signal de retour et change l'état de la sortie de l'amplificateur provoquant la transmission d'une nouvelle onde le long des tiges. Après que deux ondes successives aient réalisé un aller-retour, le cycle de mesure est alors complet. Enfin, précisons que le signal de sortie récupéré par le circuit électronique est sous la forme d'une onde électromagnétique carrée représentant le temps de parcours du signal, appelé période et notée P . L'équation définissant la période mesurée par une sonde de type WCR est :

$$P = 2S_f \left(\frac{2L_{ef}\sqrt{\epsilon^r}}{c_0} + t_d \right) \quad (5.7)$$

S'inspirant de l'équation de Topp *et al.* (1980) établie pour les systèmes TDR, l'Équation (1.7) diffère principalement par la présence d'un facteur t_d , appelé temps de délais, et permettant de comptabiliser le temps perdu lors des changements d'états du circuit en cours de mesure. Par ailleurs, le coefficient 2 traduit les deux trajets aller-retour nécessaires à la réalisation d'un cycle complet et le facteur d'échelle S_f est une donnée fournie par le constructeur qui est propre à chaque sonde WCR et qui permet de diviser le nombre de réflexions.

2) Longueur effective L_{ef} des tiges

Kelleners *et al.* (2005) mettent en avant l'importance de connaître avec précision la longueur effective L_{ef} des tiges de la sonde WCR pour une mesure du temps de propagation de l'onde précise à partir de l'Équation (1.7). Afin d'éliminer l'inconnue t_d de l'Équation (1.7), Kelleners *et al.* (2005) proposent d'écrire l'égalité suivante :

$$\frac{P_{\text{eau distillée}}}{S_f} - \frac{P_{\text{air}}}{S_f} = \frac{4L\sqrt{\varepsilon'_{\text{eau distillée}}}}{c_0} - \frac{4L\sqrt{\varepsilon'_{\text{air}}}}{c_0} \quad (5.8)$$

Où $P_{\text{eau distillée}}$ et P_{air} sont les périodes enregistrées par la sonde WCR dans l'eau distillée et dans l'air (Voir Tableaux 4.1 et 4.2). La permittivité apparente de l'air $\varepsilon'_{\text{air}}$ vaut 1 à température ambiante et la permittivité apparente de l'eau distillée $\varepsilon'_{\text{eau distillée}}$ peut être établie à partir d'une relation empirique entre la constante diélectrique apparente $\varepsilon'_{\text{eau distillée}}$ et la température de mesure élaborée par Hasted (1973), soit :

$$\varepsilon'_{\text{eau distillée}} = 87,74 - 4,0008 \times 10^{-1}T + 3,398 \times 10^{-4}T^2 - 1,4 \times 10^{-6}T^3 \quad (5.9)$$

Toutes les variables autres que la longueur effective L_{ef} étant connues, on peut déterminer la longueur effective des tiges de la sonde à partir de l'Équation (1.8) :

$$L_{ef} = \frac{c_0(P_{\text{eau distillée}} - P_{\text{air}})}{4S_f(\sqrt{\varepsilon'_{\text{eau distillée}}} - \sqrt{\varepsilon'_{\text{air}}})} \quad (5.10)$$

Le Tableau-A IV-1 présente la longueur effective des tiges de chaque sonde utilisée dans ce projet :

Tableau-A IV- 1 Calcul de la longueur effective des tiges de chaque sonde

	P_{eau distillée} (T=22,8°C)(μs)	P_{air} (μs)	L_{ef} (cm)
sonde 1	42,86	14,88	25,95
sonde 2⁽¹⁾	43,02	15,06	25,94
sonde 3	42,99	14,92	26,03
sonde 4	42,88	14,90	25,95
sonde 5⁽²⁾	42,69	14,90	25,78
sonde 6⁽³⁾	42,73	14,88	25,83
sonde 7	42,80	14,88	25,89

⁽¹⁾ sonde utilisée dans le cadre du programme d'essai en laboratoire;

⁽²⁾ sonde WCR1 placée dans le haut de la couche MR5-TFE-B;

⁽³⁾ sonde WCR2 placée dans le bas de la couche MR5-TFE-B.

3) Temps de délais t_d

L_{ef} étant alors connue, il est possible de déterminer le temps de délais t_d de la sonde, soit :

$$t_d = \frac{P}{2S_f} = \frac{2L_{ef}\sqrt{\varepsilon'}'}{c_0} \quad (5.11)$$

Appliquée dans le cas de l'air ou de l'eau distillée à 20°C où les permittivités apparentes sont connues, l'Équation (1.11) permet donc d'identifier le temps de délais du circuit t_d (Voir Tableau-A IV-2).

Tableau-A IV- 2 Calcul du temps de délais de chaque sonde

	P_{eau} (T=22,8°C)(μs)	P_{air} (μs)	t_d (ns)
sonde 1	42,86	14,88	5,54
sonde 2⁽¹⁾	43,02	15,06	5,62
sonde 3	42,99	14,92	5,55
sonde 4	42,88	14,90	5,55
sonde 5⁽²⁾	42,69	14,90	5,56
sonde 6⁽³⁾	42,73	14,88	5,54
sonde 7	42,80	14,88	5,54

⁽¹⁾ sonde utilisée dans le cadre du programme d'essai en laboratoire;

⁽²⁾ sonde WCR1 placée dans le haut de la couche MR5-TFE-B;

⁽³⁾ sonde WCR2 placée dans le bas de la couche MR5-TFE-B.

ANNEXE V

ÉTALONNAGE DES THERMOCOUPLES

En vue de procéder à la mesure en continue de la température au sein du matériau de confinement en cours d'essai, trois thermocouples, identifiés T1, T2 et T3, sont utilisés (Voir Figure-A V-1). Afin d'affiner les mesures, un étalonnage de ces thermocouples est réalisé au préalable.

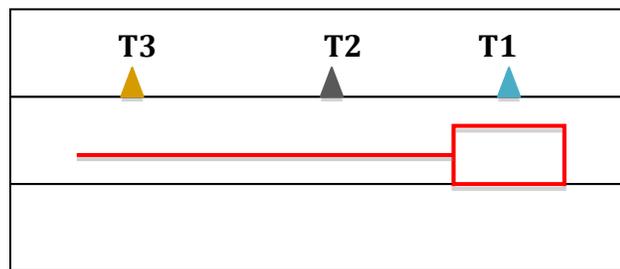


Figure-A V-1 Schéma du positionnement des thermocouples dans l'éprouvette (coupe transversale)

1) Description des thermocouples

Le Tableau-A V-1 regroupe les caractéristiques des trois thermocouples utilisés dans le cadre de ce projet.

Tableau-A V-1 Caractéristiques des thermocouples

Marque	Type	Plage	Immersion	Longueur
Omega	T*	-200°C à 205°C	110mm	4m

*bleu=cuivre ; rouge=constantan

2) Procédure d'étalonnage

Le thermocouple est immergé successivement dans un bain à 0°C, 25°C et 60°C; ce qui est une bonne représentation de sa plage d'utilisation. On considère les conditions

isothermes. L'étalonnage se fait par rapport à une sonde de température étalon dont l'erreur est connue. On procède à une série de 30 mesures prises aux 2 minutes à l'aide du CR1000.

3) Sommaire de l'étalonnage

Le Tableau-A V-2 regroupe les données propres à l'étalonnage en laboratoire des thermocouples T1, T2 et T3.

Tableau-A V-2 Sommaire de l'étalonnage

Lecture cible (°C)	Thermocouple	Lecture thermocouple (°C)	Lecture maximale (°C)	Lecture minimale (°C)	Écart type	Correction (°C)
0°C	T1	-0,032	0,122	-0,195	0,079	0,03
	T2	0,243	0,365	0,09	0,069	-0,24
	T3	0,234	0,358	0,145	0,061	-0,23
25°C	T1	24,84	24,94	24,74	0,047	0,16
	T2	24,83	24,92	24,73	0,057	0,17
	T3	24,87	24,98	24,77	0,054	0,13
60°C	T1	59,96	60,06	59,84	0,053	0,04
	T2	59,98	60,05	59,86	0,048	0,02
	T3	60,05	60,13	59,97	0,048	-0,05

4) Équation d'étalonnage des thermocouples

Les Figures-A V-2, V-3 et V-4 tracent la droite d'étalonnage propre à chaque thermocouple.

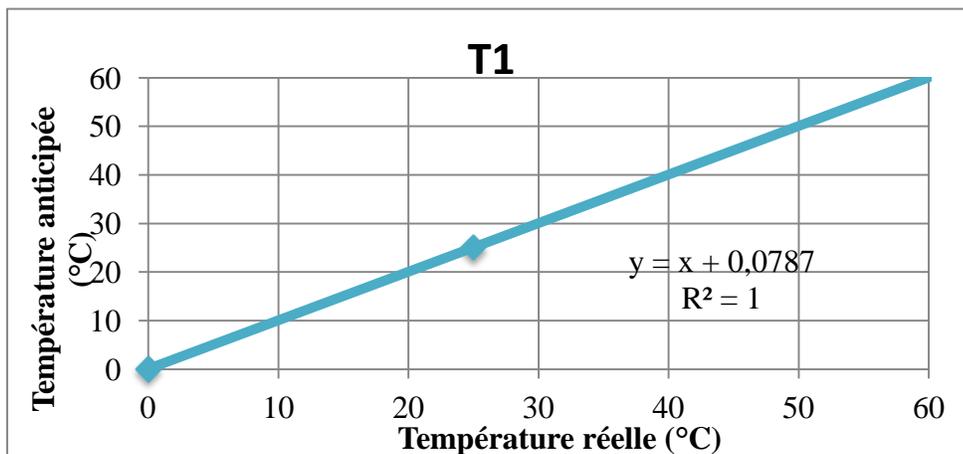


Figure-A IV-2 Équation d'étalonnage du thermocouple T1

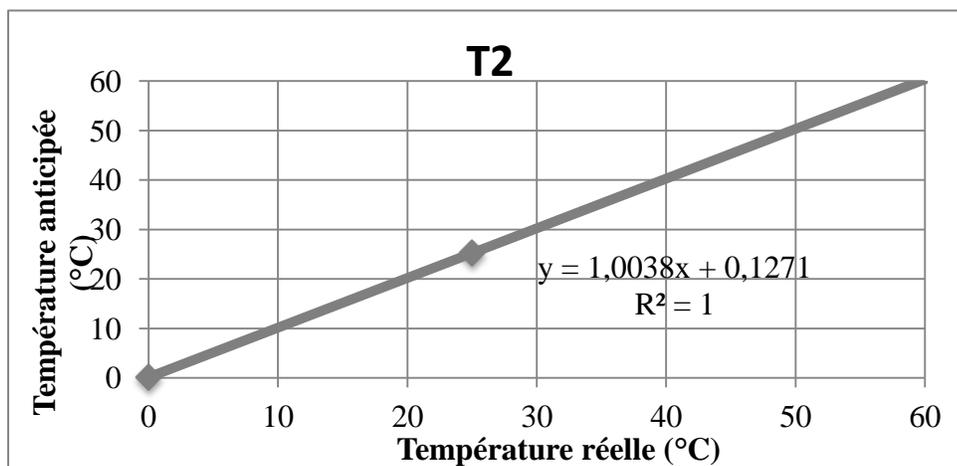


Figure-A IV-3 Équation d'étalonnage du thermocouple T2

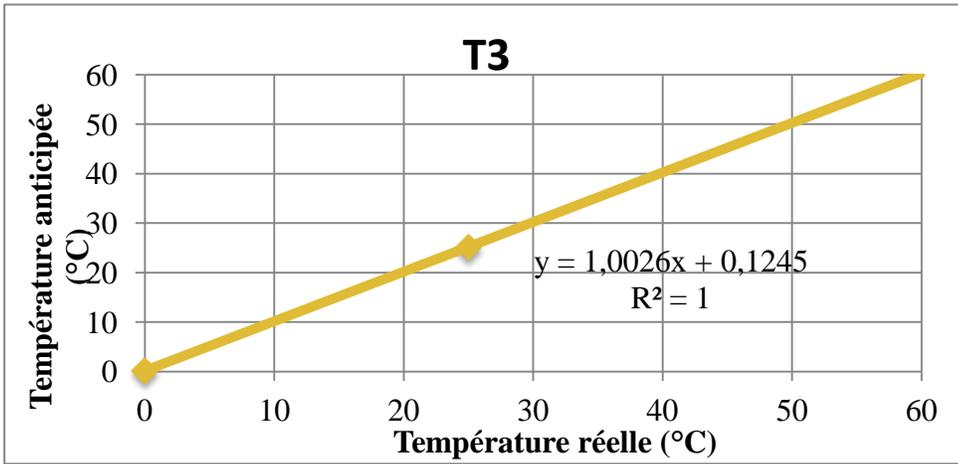


Figure-A IV-4 Équation d'étalonnage du thermocouple T3

ANNEXE VI

CARACTÉRISATION DES ÉPROUVETTES

- 1) Cas des éprouvettes utilisées pour l'étude sur l'effet conjoint de la température et de la teneur en eau sur la réponse des sondes WCR

Dans le cadre de l'étude sur l'effet de la température et de la teneur en eau sur la réponse de la sonde WCR, cinq éprouvettes de teneur en eau distinctes ont été utilisées : $w=14,3\%$, $w=11,8\%$, $w=9,5\%$, $w=6,0\%$ et $w=2,3\%$. Pour ce faire, nous avons cherché à diminuer la teneur en eau de l'éprouvette initiale ($w=14,3\%$) à quatre reprises afin de s'assurer que la formulation du matériau de confinement ainsi que sa porosité demeuraient les mêmes d'un essai à l'autre.

- Mesure de la teneur en eau dans l'éprouvette par perte de masse

Comme expliqué dans le Chapitre 2, la teneur en eau du matériau de confinement constituant la première éprouvette est déterminée par échantillonnage du matériau après malaxage. Par la suite, l'éprouvette fraîchement confectionnée est scellée dans de la cire de paraffine pour éviter toute perte d'eau lors de l'essai. En outre, afin de valider de l'influence de la teneur en eau sur la réponse de la sonde, il est nécessaire de réitérer l'essai pour différentes teneurs. À cet égard, l'éprouvette ayant permis la première mesure est descellée. Placée sur la tranche, son fond amovible est retiré pour permettre un séchage du matériau de confinement plus homogène. Afin de quantifier la perte en eau du matériau de confinement lors de cette étape de séchage, l'éprouvette est pesée. Après une perte de masse significative (2% à 3% d'eau), l'éprouvette est de nouveau scellée pour un nouvel essai. Le Tableau-A VI-1 récapitule les masses de chaque éprouvette ainsi utilisée :

Tableau-A VI-1 Mesure de la teneur en eau par perte de masse dans chaque éprouvette

	1	2	3	4	5
Masse de matériaux (g)	12211,4	11940,4	11701	11325,4	10928,5
Masse d'eau perdue (g)	0	271	510,4	886	1282,9
Teneur en eau massique w (%)	14,3%	11,8%	9,5%	6,0%	2,3%

- Détermination de la densité sèche réelle du matériau de confinement

En vue de traduire la teneur en eau massique w du matériau de confinement en teneur en eau volumique θ , nous avons décidé de déterminer la densité sèche d_s du matériau constituant nos cinq éprouvette. En effet, la densité sèche peut s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} \times w = d_s \times w = \theta \quad (\text{VI-1})$$

Pour ce faire, nous avons adaptée la méthode d'essai LC26-002 (Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion) à des échantillons de notre matériau de confinement. En effet, la méthode LC26-002, préconise la réalisation d'éprouvettes Marshall en vue d'en mesurer la densité sèche. C'est d'ailleurs de cette manière que nous avons calculée la densité sèche à partir du matériau fraîchement formulé (*Voir Annexe III*). Cependant, dans l'optique de valider cette donnée, nous avons choisi de réaliser cette mesure à partir de quatre blocs extraies de la cinquième éprouvette ($w=2,3\%$). Ainsi, ces quatre échantillons du matériau de confinement ont été immergés dans l'eau sous vide jusqu'à saturation de leurs pores. Des pesées des masses saturées superficiellement sèches dans l'eau et dans l'air ont alors pu être réalisés et finalement les échantillons ont été placés 24 heures à l'étuve à 100°C afin d'obtenir leur masse sèche, conformément à la méthode LC26-002. Les résultats liés à cet essai sont présentés dans le Tableau-A VI-2.

Tableau-A VI-2 Mesure de la densité sèche du matériau de confinement

	Échantillons de l'éprouvette prélevés à la fin des 5 essais				Moyenne des échantillons
	i	ii	iii	iv	
Mss eau (g) C	85,1	63,8	134	102,5	96,4
Mss air (g) B	176,1	128,5	271,4	208,5	196,1
Msec (g) A	143,9	108,1	225,2	172,1	162,3
T-eau à l'essai (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Densité de l'eau à l'essai ρ_w (kg/m ³)	997,7	997,7	997,7	997,7	997,7
Densité sèche ρ_s (kg/m ³) $=\rho_w * A / (B-C)$	1577,6	1666,9	1635,2	1619,8	1624,9

Le bilan des mesures réalisées à partir des quatre échantillons fait état d'une densité sèche moyenne de $d_s=1,625$, soit une valeur inférieure à la densité sèche mesurée égale à $d_s=1,754$ sur le mélange frais. Néanmoins, nous avons estimé que la valeur établie à partir d'échantillons directement prélevés sur l'éprouvette était plus représentative et avons donc retenu $d_s=1,625$ pour le calcul de la teneur en eau volumique.

2) Cas des éprouvettes utilisées pour l'étude sur l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR

Dans la perspective d'étudier l'effet de la porosité sur la réponse des sondes WCR, trois éprouvettes de porosité distincte ont été réalisées : $n_1=33,9\%$, $n_2=31,0\%$ et $n_3=26,4\%$. Pour ce faire, nous avons choisi d'adapter le mode de compaction de chaque éprouvette en fonction du taux visé, tout en conservant la même formulation pour le matériau de confinement constituant les éprouvettes. Ainsi, des teneurs en eau similaires ont été mesurées dans les trois éprouvettes par échantillonnage du matériau de confinement fraîchement formulé : $w_1=14,3\%$, $w_2=14,6\%$ et $w_3=13,9\%$.

- Détermination de la porosité du matériau de confinement

Afin d'évaluer la porosité de chacune des trois éprouvettes utilisées lors des essais, nous avons choisi de raisonner en terme de volumes absolus. En effet, déterminer la porosité d'un matériau revient à définir sa teneur en eau volumique théorique à saturation. Pour cela, à la suite des essais réalisés sur les trois éprouvettes, ces dernières ont été fractionnées en blocs échantillons représentatifs du matériau de confinement les composant. De manière similaire à la technique développée pour mesurer la densité sèche du matériau de confinement, les échantillons issus des trois éprouvettes ont été immergés dans l'eau sous vide jusqu'à saturation de leurs pores. Des pesées des masses saturées superficiellement sèches dans l'eau et dans l'air ont alors pu être réalisées et finalement les échantillons ont été placés 24 heures à l'étuve à 100°C afin d'obtenir leur masse sèche, conformément à la méthode LC26-002. Le bilan des résultats liés à cet essai sont présentés dans les Tableaux-A VI-3, VI-4 et VI-5 :

Tableau-A VI-3 Mesure de la densité sèche du matériau constituant l'éprouvette 1

	Échantillons				Moyenne
	i	ii	iii	iv	
Msss eau (g) C	85,1	63,8	134	102,5	96,4
Msss air (g) B	176,1	128,5	271,4	208,5	196,1
Msec (g) A	143,9	108,1	225,2	172,1	162,3
T-eau à l'essai (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Densité de l'eau à l'essai ρ_w (kg/m ³)	997,654	997,654	997,654	997,654	997,654
Densité sèche ρ_s (kg/m³) = $\rho_w * A / (B - C)$	1577,609	1666,869	1635,165	1619,776	1624,855
Volume échantillon compacté (m ³) = $(B - C) / \rho_w$	0,0912	0,0649	0,1377	0,1062	0,1000
Volume des vides (L) = $(B - A) / \rho_w$	0,0323	0,0204	0,0463	0,0365	0,0339
Volume solide (L) = $(A - C) / \rho_w$	0,0589	0,0444	0,0914	0,0698	0,0661
Porosité n (%)	35,4%	31,5%	33,6%	34,3%	33,9%

Tableau-A VI-4 Mesure de la densité sèche du matériau constituant l'éprouvette 2

	Échantillons				Moyenne
	i	ii	iii	iv	
Msss eau (g) C	115,5	125,9	114,0	107,4	115,7
Msss air (g) B	231,8	255,9	232,8	220,5	235,3
Msec (g) A	196,2	215,1	196,4	184,9	198,2
T-eau à l'essai (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Densité de l'eau à l'essai ρ_w (kg/m ³)	997,65419	997,65419	997,65419	997,65419	997,65419
Densité sèche ρ_s (kg/m³) = $\rho_w * A / (B - C)$	1683,059	1650,734	1649,321	1631,001	1653,529
Volume échantillon compacté (m ³) = $(B - C) / \rho_w$	0,1166	0,1303	0,1191	0,1134	0,1198
Volume des vides (L) = $(B - A) / \rho_w$	0,0357	0,0409	0,0365	0,0357	0,0372
Volume solide (L) = $(A - C) / \rho_w$	0,0809	0,0894	0,0826	0,0777	0,0826
Porosité n (%)	30,6%	31,4%	30,6%	31,5%	31,0%

Tableau-A VI-5 mesure de la densité sèche du matériau constituant
l'éprouvette 3

	Échantillons			Moyenne
	i	ii	iii	
Msss eau (g) C	438,3	232	296,2	322,2
Msss air (g) B	865,6	458	575,9	633,2
Msec (g) A	751,6	397,6	503,8	551,0
T-eau à l'essai (°C)	22,5	22,5	22,5	22,5
Densité de l'eau à l'essai ρ_w (kg/m ³)	997,654	997,654	997,654	997,654
Densité sèche ρ_s (kg/m³) = $\rho_w * A / (B - C)$	1754,825	1755,165	1796,990	1768,994
Volume échantillon compacté (m ³) = $(B - C) / \rho_w$	0,4283	0,2265	0,2804	0,3117
Volume des vides (L) = $(B - A) / \rho_w$	0,1143	0,0605	0,0723	0,0824
Volume solide (L) = $(A - C) / \rho_w$	0,3140	0,1660	0,2081	0,2294
Porosité n (%)	26,7%	26,7%	25,8%	26,4%

ANNEXE VII

BILAN DES CYCLES DE VARIATION DE LA TEMPÉRATURE

Afin d'étudier l'effet de la température sur la mesure des sondes WCR, nous avons choisi de comparer la période enregistrée en fonction de la température, par une même sonde WCR, dans cinq corps d'épreuve de teneur en eau et de porosité connues et fixes. Les cinq essais ainsi réalisés sont identifiés de la manière suivante :

1. MR5-TFE-B-33,9-14,3
2. MR5-TFE-B-33,9-11,8
3. MR5-TFE-B-33,9-9,5
4. MR5-TFE-B-33,9-6,0
5. MR5-TFE-B-33,9-2,3

Les résultats propres à l'essai MR5-TFE-B-33,9-14,3 sont présentés et analysés dans la section 4.2. Cette annexe vise à présenter sommairement les températures et périodes enregistrées au sein du matériau de confinement au cours des quatre autres essais.

Essai MR5-TFE-B-33,9-11,8

La Figure-A VII-1 trace l'évolution de la période et des températures T2, T3 et de consigne enregistrées au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-11,8.

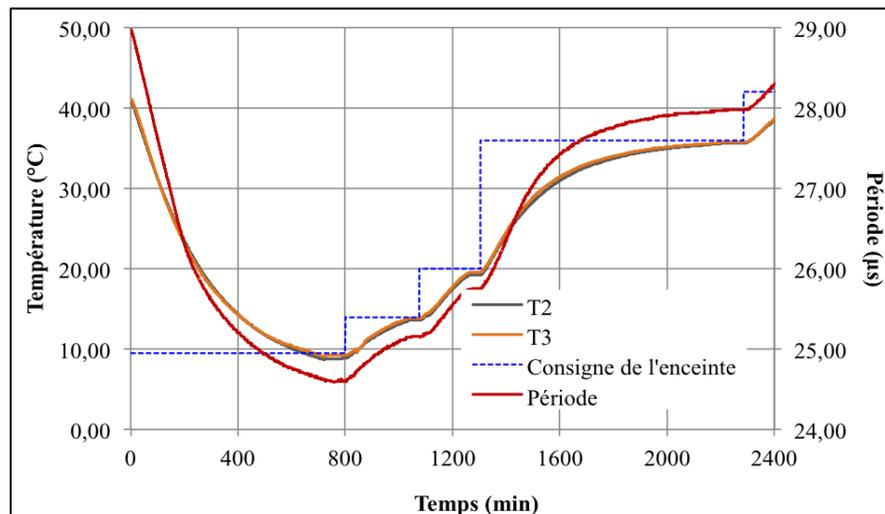


Figure-A VII-1 Évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-11,8

Essai MR5-TFE-B-33,9-9,5

La Figure-A VII-2 trace l'évolution de la période et des températures T2, T3 et de consigne enregistrées au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-9,5.

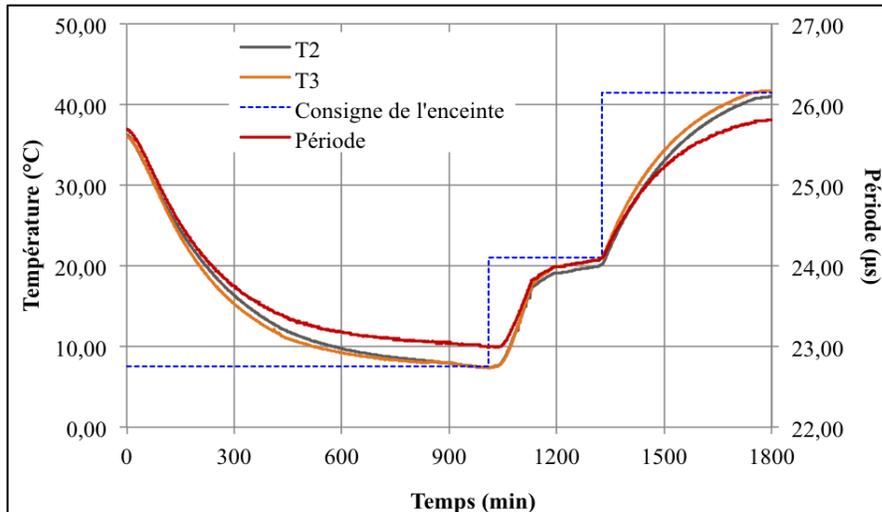


Figure-A VII-2 Évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-9,5

Essai MR5-TFE-B-33,9-6,0

La Figure-A VII-3 trace l'évolution de la période et des températures T2, T3 et de consigne enregistrées au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-6,0.

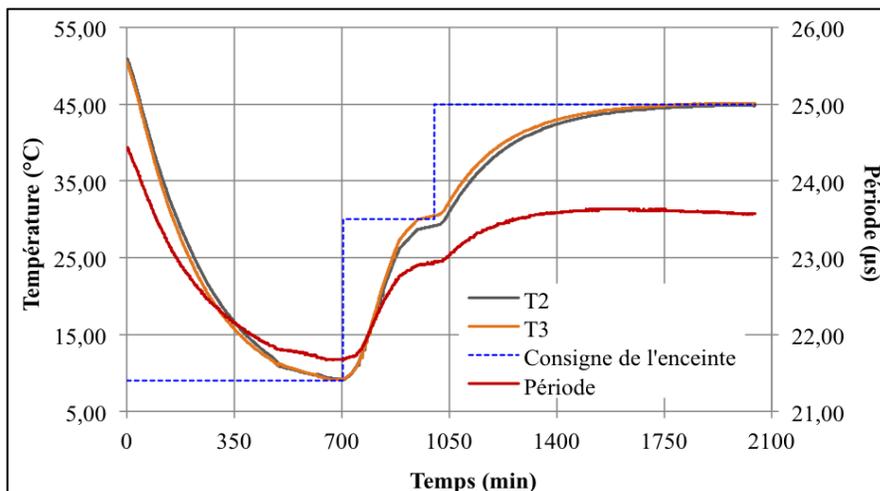


Figure-A VII-3 Évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-6,0

Essai MR5-TFE-B-33,9-2,3

La Figure-A VII-4 trace l'évolution de la période et des températures T2, T3 et de consigne enregistrées au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-2,3.

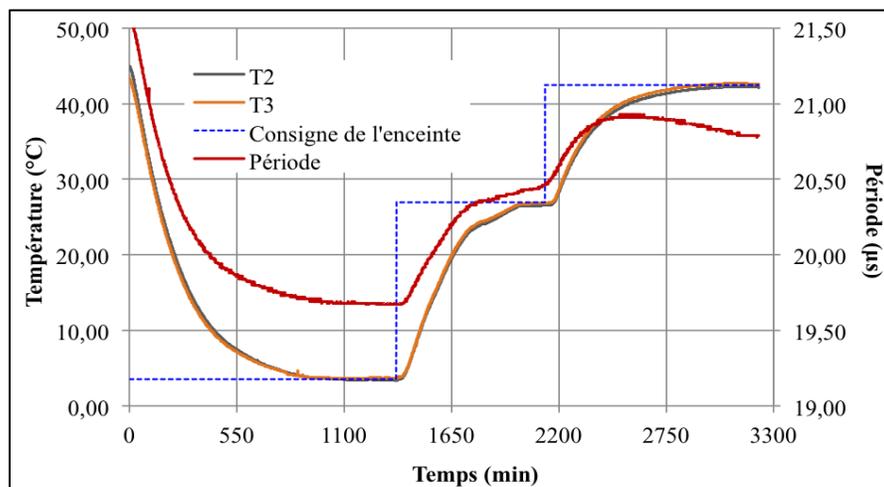


Figure-A VII-4 Évolution de la consigne de l'enceinte et des températures T2 et T3 au cours de l'essai MR5-TFE-B-33,9-2,3

ANNEXE VIII

EXPLOITATION DES MESURES RÉALISÉES DANS LA PLANCHE D'ESSAI

1) Détermination de la pente traduisant l'évolution de la teneur en eau

Afin d'extrapoler le modèle d'étalonnage établi pour la fraction 0/5 du mélange de MR5-TFE-B à la fraction globale (0/14) du matériau, l'hypothèse selon laquelle l'évolution de la teneur en eau volumique calculée au sein de la zone de confinement de chacune des deux sondes WCR est semblable à la variation de la teneur en eau réelle au sein de l'ensemble de la couche de MR5-TFE-B a été posée. Il s'agissait donc de déterminer la pente traduisant cette variation pour chacune des sondes. Pour cela, différents points référence ont été choisis à partir de la Figure 5.7 afin d'établir les pentes moyennes. Il est important de préciser ici que les points de mesures enregistrés entre le 25 novembre 2010 et le 8 mai 2011 ont été volontairement exclus dans le calcul de chaque pente moyenne. En effet, la prise en compte de ces données erronées par de trop faibles températures au sein de la structure de la chaussée auraient faussé l'estimation de ces pentes. Ainsi, le Tableau-A VIII-1 présente les différents points de référence qui ont été utilisés.

Tableau-A VIII-1 Points de référence traduisant l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée par les sondes

Temps depuis l'instrumentation (heure)	Teneur en eau volumique mesurée par la sonde WCR2	Teneur en eau volumique mesurée par la sonde WCR1
48	32,3%	31,4%
450	32,3%	31,6%
900	33,1%	32,2%
4846	26,2%	28,6%
5500	25,4%	28,3%
6000	23,9%	26,9%
6500	24,4%	27,7%
7000	23,1%	26,3%
7500	23,6%	27,0%
8000	23,3%	26,5%
8500	22,7%	26,1%
9000	23,4%	27,0%
9500	22,7%	26,1%
10000	23,3%	26,9%
10257	23,8%	27,1%

Pour chacune des sondes WCR, il est alors possible de tracer l'évolution moyenne de la teneur en eau volumique à partir de ces points références et d'en déduire l'équation de la pente. C'est ce que traduisent les Figures-A VIII-2 et VIII-3

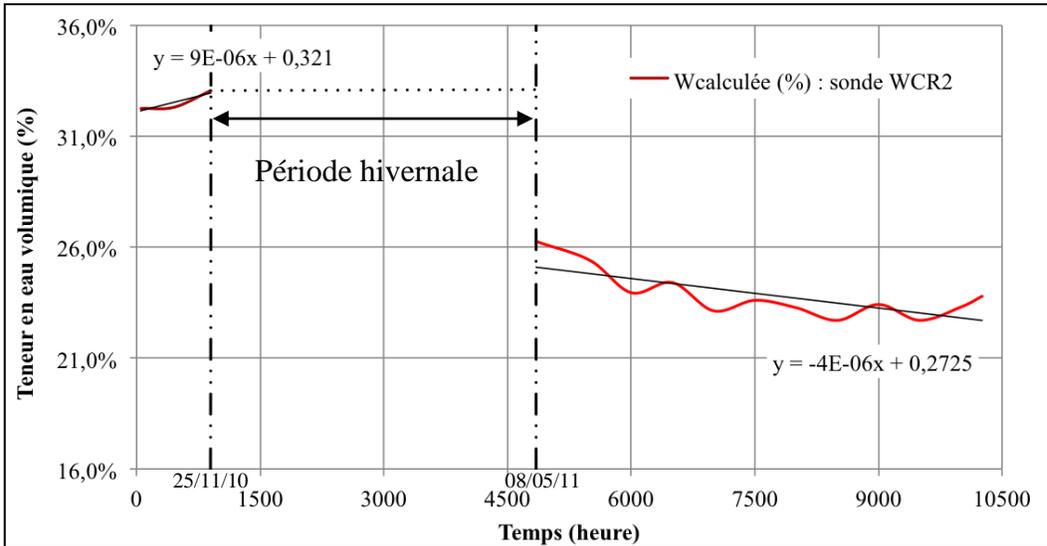


Figure-A VIII-2 Pente traduisant l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée dans le bas de la couche MR5-TFE-B par la sonde WCR2

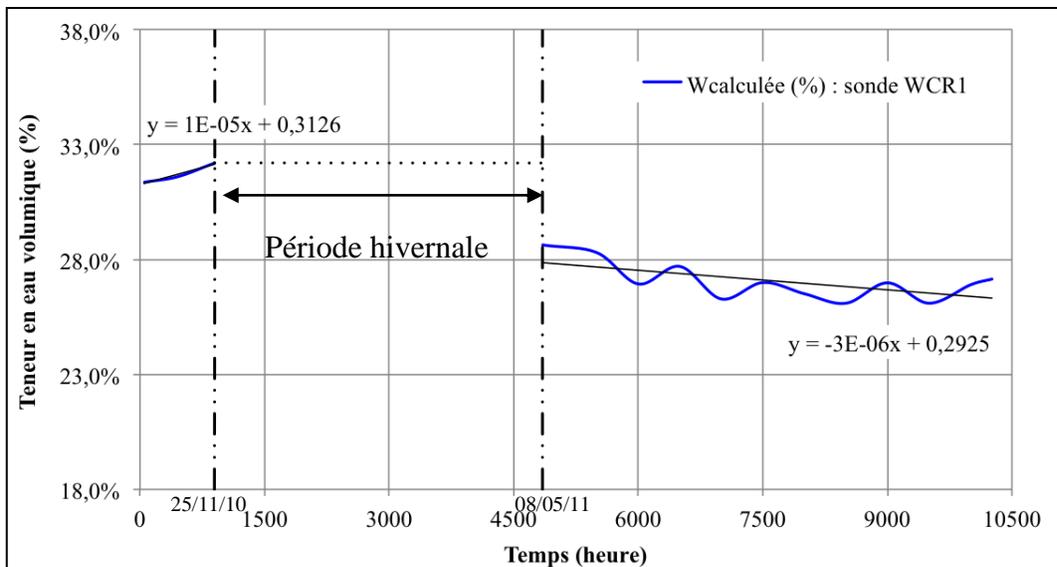


Figure-A VIII-3 Pente traduisant l'évolution de la teneur en eau volumique mesurée dans le haut de la couche MR5-TFE-B par la sonde WCR1

La comparaison des deux pentes obtenues confirme les observations réalisées au Chapitre 5 à savoir que la perte d'eau a été plus importante et plus rapide dans le bas de la couche de MR5-TFE-B.

2) Détermination de la teneur en eau massique à deux niveaux de la couche de MR5-TFE-B

Connaissant désormais la pente associée à l'évolution de la teneur en eau dans le haut et dans le bas de la couche de MR5-TFE-B, il est possible de quantifier cette évolution. Pour cela, il est nécessaire de connaître la teneur en eau massique réelle de la fraction 0/14 du MR5-TFE-B lors de la mise en place du matériau in-situ. Pour cela, référons-nous aux résultats présentés dans l'Annexe III qui mettent en évidence une teneur en eau massique de 10,2% pour la fraction 0/14 du mélange d'après les échantillons prélevés lors de l'instrumentation. L'application des deux pentes calculées précédemment à la teneur en eau massique initiale dans les deux niveaux de la couche de MR5-TFE-B donne la Figure-A VIII-4.

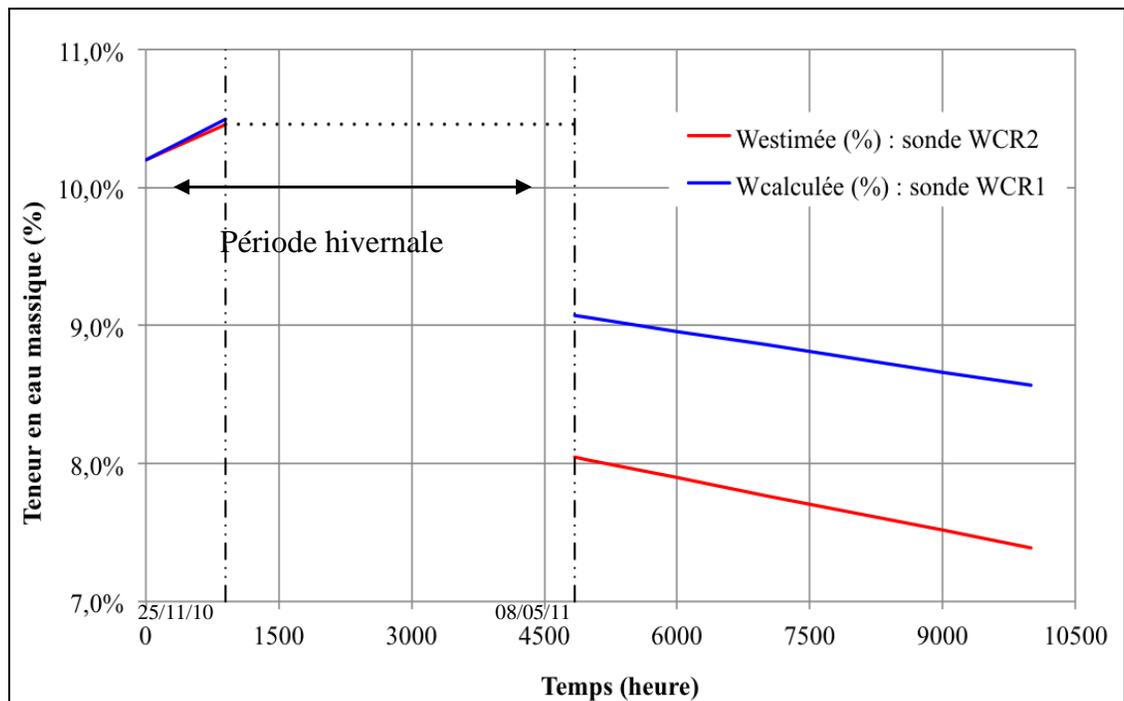


Figure-A VIII-4 Évolution de la teneur en eau massique à deux niveaux instrumentés de la couche de MR5-TFE-B entre le 19 octobre 2010 et le 29 août 2011

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alvenas, Gunnel et Maria Stenberg. 1995. « Problems in Estimating Soil Water Content by TDR Measurements, Paper in the proceedings of the Symposium ». *Time-Domain Reflectometry Applications in Soil Science*. SP Report No. 11, June, Vol. 3, p. 121-123.
- American Society for Testing and Materials. 2005. *Standard test method for determination of water content of soil by the Time-Domain Reflectometry (TDR) method*. American Society for Testing and Materials, ASTM-D 6565-00, p. 790-794.
- Anderson, James C. 1966. *Diélectriques*. Collection Monographies Dunod, No. 63. Édition Paris, Dunod, 1966.
- Association Française de Normalisation (AFNOR). *Bitumes et liants bitumineux : Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille*. Norme française, NF EN 1426 (indice de classement : T66-004). Paris : Association Française de Normalisation.
- Association Française de Normalisation (AFNOR). *Bitumes et liants bitumineux : Détermination du point de ramollissement - Méthode bille et anneau -*. Norme Française, NF EN 1427 (indice de classement : T66-008). Paris : Association Française de Normalisation.
- Graciaa, Alain, Jean Lachaise, Jean-Louis Sayous, Maurice Bourrel, Robert S. Schechter et William H. Wade. 1982. « Partage d'un tensioactif non-ionique polydistribué entre les phases des Systèmes de Windsor ». *Compte rendu du 2^{ème} colloque européen sur la récupération assistée du pétrole*. (University of Texas, 8-10 novembre 1982), p. 61-62.
- Baker, John M., et Raymond R. Allmaras. 1990. « System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry ». *Soil Sci. Soc. Am. J.* No. 54, p. 1-6.
- Baker, John M. et Robert J. Lascano. 1989. « The spatial sensitivity of time-domain reflectometry ». *Soil Sci.* No. 147, p. 378-384.
- Benson, Craig H. et Xiaodong Wang. 2006. « Temperature –Compensating Calibration Procedure For Water Content Reflectometers ». TDR 2006, *Université de Purdue*, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 50, p. 16. En ligne. <https://engineering.purdue.edu/TDR/Papers/50_Paper.pdf>. Consulté le 16 octobre 2011.
- Bergeron, Guy. 2005. « Performance des techniques de retraitement en place et de recyclage à froid au Québec ». *Congrès annuel de l'association des transports du Canada*. (Calgary, 2005). En ligne. <<http://www.tac-atc.ca/english/resourcecentre/>>

readingroom/conference/conf2005/docs/s19/bergeron-f.pdf>.
Consulté le 11 décembre 2011.

Blais, Claude. 2007. « Intervention de retraitement en place à froid, Critères de sélection ». *Conférence sur le retraitement en place des chaussées* (Montréal, 4,5 et 6 décembre 2007). En ligne. Bitume Québec.
http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/c50175fb527d141_file.pdf
f. Consulté le 16 janvier 2012.

Blonquist, James Mark, Scott B. Jones et David A. Robinson. 2005. « Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 2. Evaluation of Seven Sensing Systems ». *Vadose Zone J.*, No. 4, p. 1059-1069.

Boridy, Elie. 1990. *Électromagnétisme : Théorie et applications*. Édition Hardcover : Presses de l'université du Québec, 843 pages.

Brosseaud, Yves. 2007. « Les types de retraitement à froid, Classification, Recommandations en France ». *Conférence sur le retraitement en place des chaussées*. (Montréal, 4,5 et 6 décembre 2007). En ligne. Bitume Québec. < http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/e42bec15909d9c4_file.pdf >. Consulté le 16 janvier 2012.

Bureau de Normalisation du Québec (BNQ), 2002. *Granulats - Matériaux recyclés fabriqués à partir de résidus de béton, d'enrobés bitumineux et de briques - Classification et caractéristiques*. Norme du Québec, NQ 2560-600. Québec (QC) : Bureau de Normalisation du Québec.

Carter, Alan. 2002. « Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieure, 237 pages.

Cerepi, Adrian, Louis Humbert, R. Burlot et Pierre Pouchan. 1998. « Détermination de la teneur en eau d'un milieu poreux non saturé en utilisant Time Domain Reflectometry ». *Bulletin of engineering geology and environment*, No. 57, p. 69-78.

Croteau, Jean-Martin et Stephen Q.S. Lee. 1997. « Cold In-place Recycling : Performance and Practices ». *Road Construction, Rehabilitation and Maintenance Session of the 1997 XIIIth IRF World Meeting*.(Toronto, novembre 1997).

Campbell Scientific, Inc. 2006. *CS616 and CS625 Water Content Reflectometers instruction manual*. Revision 8/06.

Dalton, Frank N., William N. Herkelrath, D.S. Rawlins, et James D. Rhoades. 1984. « Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe ». *Science (Washington, DC)*, No. 224, p. 989-990.

- Dalton, Frank N. 1992. « Development of time domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil conductivity, in Advances in measurements of soil physical properties: Bringing theory into practice ». *SSSA Special Publication*, No. 30, p. 143–167.
- Davis, James L. et Walter J. Chudobiak. 1975. « In-situ meter for measuring relative permittivity of soil ». *Geological Survey of Canada*, Paper 75-1 A, p. 75-79.
- DeClercq, Marc 1985. « Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media ». *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, No. 49, p. 47-50.
- Deneuvillers, Charles et Jena-Eric Poirier. 2002. « Enrobés à froid : caractérisation et maîtrise de la qualité de l'enrobage ». *Revue Générale des Routes et des Aéroports*, No. 803, p. 77-84.
- Di Benedetto, Hervé et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*. Lavoisier, 234 pages.
- Di Benedetto, Hervé et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Lavoisier, 288 pages.
- Diefenderfer, Brian K., Imab L. Al-Qadi et Amara Loulizi. 2000. « Laboratory calibration and in situ measurements of moisture by using Time-Domain Reflectometry probes ». *Transportation Research Record*, No. 1699, p. 142-150.
- Eckmann, Bernard, Sabine Le Bec, Didier Lesueur, Celestin Le Roux et Yvoneic Brion. 2002. « Caractérisation des enrobés à froid vis-à-vis de la mise en œuvre et de la montée en cohésion ». *Revue générale des routes et des aérodromes*. No. 802, janv 2002, p. 51-59.
- Ekblad, Jonas et Ulf Isacsson. 2007. « Time-domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in roads pavement ». *Can.Geotech.J.*, No. 44, p. 858-872.
- Evans, Robert, Matthew W. Frost, Martyn Stonecliffe-Jones et Neil Dixon. 2007. « Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials ». *Transportation Research Record*, No. 2037, p. 128-135.
- Evet, Steven R., Terry A. Howell, Jean L. Steiner et James L. Cresap. 1993. « Evapotranspiration by soil water balance using TDR and neutron scattering ». *Management of Irrigation and Drainage Systems, Irrigation and Drainage Div./ASCE*, July 21-23, 1993, p. 914-921.

- Evelt, Steven R. 1994. « TDR-Temperature arrays for analysis of field soil thermal properties ». *Proceedings of the Symposium on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Sept. 7-9, 1994, p. 320-327.
- Gardner, C.M.K., T.J. Dean et J.D Cooper, J.D. 1998. « Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor ». *Journal of Agricultural Engineering Research*, No. 71, p. 395-403.
- Gauvin, Pierre. 2006. « Adaptation de la grave mousse pour son emploi par l'agence EUROVIA de Reims ». Rapport de travail de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, INSA Strasbourg, 42 p. En ligne. <http://eprints2.insa-strasbourg.fr/83/1/GAUVAIN_Rapport.pdf>. Consulté le 30 novembre 2011.
- Hamed, Yasser, Ghada Samy et Magnus Persson. 2010. « Evaluation of the WET sensor compared to time domain reflectometry ». *Hydrological Sciences Journal*, Vol. No.5 1, Issue 4, p. 671-681.
- Harris, Basil M. et Kevin D. Stuart. 1995. « Analysis of Mineral Fillers and Mastic Used in Stone Matrix Asphalt ». *Asphalt Paving Technology*. Vol. No. 64, p. 54-87.
- Hasted, John B. 1973. *Aqueous dielectrics*. Chapman and Hall, 318 p.
- Heimovaara, Timo.J. et Willem Bouten. 1990. « A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents ». *Water Resources Res.*, No. 26, p. 2311-2316.
- Heizman, Mike. 2001. « Why experts are talking about foamed asphalt 40 years after its debut ». *Technology News*, Jan-Feb 2001, p. 8-9.
- Herkelrath, William N., S.P. Hamburg et Fred Murphy. 1991. « Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry ». *Water Resour. Res.*, No. 27, p. 857-864.
- ISTED. 1989. Le savoir-faire français en matière d'émulsions de bitume. Ministère de l'équipement des transports et du tourisme, 124 p. En ligne. < http://www.isted.com/publications/isted/sf_entretien%20routier.pdf>. Consulté le 30 novembre 2011.
- Jones, Scott B., Jon M. Wraith et Dani Or. 2002. « Time Domain Reflectometry measurement principles and applications ». *Hydrological Processes*, No.16, p. 141-153.
- Kelleners, Thijs J., Mark Seyfried, James Mark Blonquist, Jim Bilskie et David Chandler. 2005. « Improved Interpretation of Water Content Reflectometer Measurements in Soils ». *Soil Science Society of America J.*, No. 69, p. 1684-1690.

- Kim, Kyoung C. et Craig H. Benson. 2002. « Water content reflectometer calibrations for final cover soil ». Geo engineering program, University of Wisconsin-Madison. *Geo Engineering Report*, No. 02-12. Novembre 2002.
- Knight, John H., Ian White et Steve J. Zegelin. 1994. « Sampling volume of TDR probes used for water content monitoring, in Proceedings of the Symposium and Workshop ». *Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*, Sept 1994, p. 93-104.
- Lacombe, Jean-Sébastien. 2008. « Caractérisation des enrobés recyclés à froid et dimensionnement de la couche de roulement ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Sherbrooke (Québec), Université de Sherbrooke, 218 p.
- Langlois, Pierre, Anne-Marie Leclerc, Guy Tremblay et Guy Tourangeau. 2001. *GCI-718 : Enrobés, Introduction, bitumes granulats, enrobés*. Programme de baccalauréat en génie de la construction. Université de Sherbrooke.
- Le Bec, Sabine. 2005. « Les émulsions de bitume : généralités, composition et applications ». Présentation à Montréal le 17 novembre 2005. En ligne. http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/a13658c238a4b06_file.pdf. Consulté le 18 juin 2011
- Ledieu, J., P de Ridder, P. DeClercq et S. Dautrebande. 1986. « A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry ». *J. Hydrol. (Amsterdam)*, No. 88, p. 319–328.
- Logsdon, Sally D. 1994. « Calibrating TDR with undisturbed soil cores for TDR use in monitoring subsurface lateral water flow ». *Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*. (Evanston, Sept. 7–9 1994), p. 269-280.
- Marquis, Bruno et Guy Bergeron. 1998. « Matériaux recyclés dans les chaussées ». Ministère des Transports du Québec, Info DLC, Vol. 3, No. 3, mars 1998.
- Ministère des Transports du Québec, 2001. « Réseau routier, étude réalisée dans le cadre de l'élaboration d'un plan de transport du Bas-Saint-Laurent ». *Ministère des Transports*, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Île-de-la-Madeleine, Service des inventaires et du Plan. Octobre 2001. En ligne. <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/regions/bas/routier.pdf>. Consulté le 20 Août 2011.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2003. *Réduction des échantillons pour essais en laboratoire*. Méthode d'essai, LC21-015. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 6 p.

- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2006. *Analyse granulométrique. Méthode d'essai*, LC21-040. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 8 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2007. *Détermination de la densité et de l'absorption du granulat fin de classe d/D*. Méthode d'essai, LC21-066. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 6 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2007. *Détermination de la densité et de l'absorption du gros granulat*. Méthode d'essai, LC21-067. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 7 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2001. *Méthode de formulation à froid des matériaux recyclés stabilisés à l'émulsion*. Méthode d'essai, LC26-002. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 29 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2007. *Échantillonnage*. Méthode d'essai, LC26-005. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 9 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2008. *Détermination de la densité maximale*. Méthode d'essai, LC26-045. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 20 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2002. *Détermination de la teneur en bitume*. Méthode d'essai, LC26-100. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 8 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 1997. *Détermination de la teneur en eau*. Méthode d'essai, LC26-250. Québec (QC) : Ministère des Transports du Québec, 5 p.
- Navaro, Julien. 2011. « Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques ». Thèse de doctorat, Bordeaux (France), École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 308 p.
- O'Connor, Kevin et Charles Dowding. 1999. « Monitoring soil moisture ». *GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*. Édition Hardover, p. 52-79.
- Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures : relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse pour l'obtention du grade de Docteur, Lyon (France), École doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon, *Nombre page*
- Petersen, Lis W. 1995. « High resolution time domain reflectometry: Sensitivity dependency on probe design ». *Soil Science*, No. 159, p. 149-154.
- Pérez, José-Philippe, Robert Carles et Robert Fleckinger. 2001. *Électromagnétisme : Fondements et applications*. 4^{ème} édition, Dunod.

- Perraton, Daniel. 2011. *CTN-404 : Sciences et technologie des matériaux*. Programme du baccalauréat en génie de la construction. Montréal, École de Technologie Supérieure, pagination multiple, 400 p.
- Proteau, Marc. 2005. « Comparaison entre les chaussées souples bitumineuses et les chaussées rigides en béton ». *Congrès Bitume Québec*. Mars 2005. En ligne. <http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/38fdeb86d7c27ca_file.pdf>. Consulté le 12 janvier 2012.
- Serfass, Jean-Pierre. 2002. « Avantages, particularités et mystères des enrobés à l'émulsion ». *Revue Générale des Routes et des Aéroports*, No. 802, Janvier 2002, p. 3-11.
- Topp, G. Clarke, J. Lee Davis et A. Peter Annan. 1980. « Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines ». *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, June 1980, p. 574-582.
- Topp, G. Clarke et J. Lee Davis. 1985. « Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) : A field evaluation ». *Soil Scientific. Soc. Am. J.*, No. 49, p. 19-24.
- Tremblay, Denis. 2001. « Influence des différents paramètres de formulation et optimisation des enrobés à matrice de pierre ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieure, 145 p.
- Von Hippel, Arthur R. 1954. *Dielectrics and waves*. John Wiley & Sons, 304 p.
- Whalley, William R. 1993. « Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content ». *European Journal of Soil Science*, Vol. 45, Issue 4, p. 503-508.
- Wirtgen GmbH. 2009. « Le laboratoire mobile WLB 10 S pour la mousse de bitume ». Fiche technique, *Wirtgen GmbH*. En ligne. <http://www.wirtgen.de/media/redaktion/pdf-dokumente/03_kaltrecycling_stabilisierung/wlb_10/prospekt_18/p_wlb10_f.pdf>
- Young, Francis, Sidney Mindness, Robert J. Gray et Arnon Bentur. 1998. « Surface properties ». *The Science and Technology Of Civil Engineering Materials*. Prentice Hall, 384 p.
- Zegelin, Steve J., Ian White et D.R. Jenkins. 1989. « Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurements using time domain reflectometry ». *Water Resources Research*, No. 25, p. 2367-2376.

