

Caractérisation expérimentale des propriétés thermiques de granulats de verre postconsommation et analyse par simulation numérique du comportement thermique d'une structure de chaussée avec couche de verre postconsommation

par

Youness BERRAHA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE
EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 19 MAI 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Youness Berraha, 2017



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Michel Vaillancourt, Directeur de Mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

M. François Duhaime, Président du Jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Nam Nguyen, Examinateur Externe
SNC-Lavalin

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

LE 8 MAI 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

"La découverte théorique n'a pour elle que le mérite de l'existence. Elle éveille l'espoir et c'est tout. Laissez-la cultiver, laisser-la grandir et vous verrez ce qu'elle deviendra. Sans la théorie, la pratique n'est que la routine donnée par l'habitude. (...) Et souvenez vous, le hasard ne favorise que les esprits préparés"

- Louis Pasteur, 1857

À mes parents.

À Sophia et Nadia.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Michel Vaillancourt qui a dirigé ce projet de recherche, pour la grande autonomie qu'il m'a accordé, sa disponibilité et son soutien qui m'ont permis de tenir bon tout au long de cette maîtrise. Merci à Monsieur Daniel Perraton pour avoir co-dirigé ce travail de recherche, pour son regard très pertinent sur mon travail et ses encouragements qui ont contribué sans nul doute au succès de cette maîtrise. Enfin, je remercie Monsieur François Duhaime pour avoir présidé mon jury et Monsieur Nam Nguyen pour avoir accepté d'être membre de mon jury.

Ce travail a bénéficié du soutien technique et financier de la Société des Alcools du Québec (SAQ), de la Ville de Montréal, d'Eco Entreprises Québec (EEQ) et de Mitacs-Accélération. Je les remercie pour leur disponibilité et pour avoir jugé régulièrement l'avancée de mes travaux.

L'environnement de travail dans lequel ce projet de recherche a eu lieu a été des plus agréable. C'est pourquoi je remercie également - je ne pourrai pas tous les nommer ici mais soyez certain que le cœur y est - tous les collègues avec qui j'ai passé deux ans (et même un peu plus) au quotidien. Merci tout d'abord à Monsieur Juan Mauricio Rios, Monsieur Sylvain Bibeau, Monsieur Francis Bilodeau et Monsieur Richard Prowt pour les innombrables heures passées ensemble lors de l'élaboration des différents essais de laboratoire : je vous dois mes résultats expérimentaux. Merci à Mademoiselle Sahar Mohsenian, Mademoiselle Laurence Picard, Monsieur Eric Lachance Tremblay, Monsieur Emmanuel Dion, Monsieur Alexandre Bachand, Monsieur Marc André Bérubé, Monsieur Sébastien Lamothe, Monsieur Jordan Ouellet, Monsieur Souleiman El Mansouri, Monsieur Mounir Boussabnia, Monsieur Théophile Kakpo, et Monsieur Quentin Lecuru. Ils ont tous rendu mon séjour à l'ETS très agréable et j'en garderai un excellent souvenir.

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE GRANULATS DE VERRE POSTCONSOMMATION ET ANALYSE PAR SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UNE STRUCTURE DE CHAUSSÉE AVEC COUCHE DE VERRE POSTCONSOMMATION

Youness BERRAHA

RÉSUMÉ

En 2014, ce sont près de 200 000 tonnes de verre qui ont été générées par la société québécoise dont une part non négligeable (57%) est entreposée dans des lieux d'enfouissements techniques, car souvent impropre au recyclage. Il convient donc de trouver des solutions innovantes à l'utilisation de ce verre postconsommation (VPC). L'incorporation de particules de verre dans la structure de chaussée est un concept datant des années 70 et qui a refait surface au LCMB. Les performances mécaniques et hydrauliques de matériaux de chaussées incorporant des particules de VPC ont été très bien documentées tandis que l'aspect thermique est souvent négligé, voir ignoré. Pourtant, le verre est bien connu pour ses propriétés thermiques isolantes et le recours à des couches de conductivité thermique est souvent utilisé pour limiter la pénétration du front de gel.

Le présent projet de recherche a pour objectif d'évaluer l'impact de l'incorporation de VPC dans des mélanges granulaires de pierre calcaire, et ce, par le biais d'essais expérimentaux sur les matériaux, mais également des simulations numériques à l'échelle de la chaussée. Les essais expérimentaux ont permis de mesurer la conductivité et diffusivité thermique de mélange de VPC et de pierre calcaire, et ce, pour différentes classes granulométriques et différentes teneurs en eau et en verre. Les résultats de cette première phase ont mis en évidence l'impact important de la teneur en eau et l'influence de la teneur en verre sur les propriétés thermiques des différents mélanges considérés. D'autre part, le recours aux simulations numériques a permis d'obtenir un aperçu du régime thermique d'une structure de chaussée incorporant une couche de VPC. L'influence de la position et de l'épaisseur de la couche de VPC a été analysée au cours de cette deuxième phase du travail. L'analyse s'est principalement concentrée sur l'évolution du front de gel dans la structure de chaussée et les résultats montrent la conséquence de l'incorporation de cette couche de VPC avec notamment une diminution de la profondeur de pénétration du front de gel.

Mots clés: matériaux recyclés, propriétés thermiques, structure de chaussée, matériaux de fondation, simulations numériques

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THERMAL PROPERTIES OF RECYCLED GLASS AGGREGATES AND NUMERICAL ANALYSIS OF A PAVEMENT STRUCTURE CONTAINING RECYCLED GLASS AGGREGATES

Youness BERRAHA

ABSTRACT

The increasing need to recycle more wastes and reduce the use of landfills is forcing reconsideration of potential uses of recycled glass aggregates in pavement construction. In addition, in cold regions, adequate thermal design of pavement relies on a good prediction of the thermal regime in the road structure. While the mechanical and hydraulic performances of recycled glass aggregates (VPC) in roadwork applications are well documented, the thermal aspect is on the contrary almost unexplored. Yet, glass is known for its insulating properties and aggregates or aggregate mixtures with low thermal conductivity can help decrease the depth of frost penetration.

An experimental study was aimed to evaluate the thermal properties of VPC blended with natural aggregate. In this work, we present the results of thermal conductivity and thermal diffusivity measurement on different VPC and natural aggregates blends. The assessment included the influence of particle size, moisture content and glass content. At given moisture content, thermal conductivity of VPC and natural aggregates decreased with increasing particle size. The results also showed that an increase of water content in any of the studied material increased its thermal conductivity but at different rates depending on the VPC content. Based on these experimental results, the impact of a VPC layer on the thermal regime of a pavement structure was also studied using finite difference method. This phase of the research work consisted in analysing the frost penetration depth according to different VPC layer thickness and position in the pavement structure.

Keywords: recycled material, thermal properties, base-course material, numerical simulation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Le recyclage du VPC	5
1.1.1 Situation québécoise	6
1.1.2 Projets de recherche	7
1.2 Le verre postconsommation (VPC) dans les chaussées	7
1.2.1 Le Glasphalt	8
1.2.2 Le VPC dans les couches granulaires	9
1.2.3 Aspect thermique	11
1.2.3.1 L'intérêt des propriétés thermiques	11
1.2.3.2 Contribution thermique du VPC	12
1.3 Action du gel sur les chaussées	13
1.3.1 Contexte climatique	13
1.3.2 Dégradations liées au gel et dégel	14
1.3.3 Dimensionnement au gel des chaussées	17
1.3.4 Isolation de la chaussée	19
1.3.5 Formation des lentilles de glace	21
1.3.6 Vitesse de gonflement et de dégonflement	22
1.4 Transferts thermiques : quelques éléments fondamentaux	25
1.4.1 Modes de transferts thermiques	26
1.4.1.1 Rayonnement	26
1.4.1.2 Conduction	27
1.4.1.3 Convection	28
1.4.2 Propriétés thermiques	28
1.4.2.1 Conductivité thermique	28
1.4.2.2 Capacité thermique	29
1.4.2.3 Diffusivité thermique	30
1.4.3 Transfert de chaleur dans les milieux poreux	31
1.4.3.1 Effets de la porosité et de la composition minéralogique du milieu	32
1.4.3.2 Effet de l'eau	33
1.5 Mesure des propriétés thermiques	35
1.5.1 Méthodes en régime permanent	36
1.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée	36
1.5.1.2 Méthode à flux radial	38
1.5.2 Méthodes en régime quasi-établi	39
1.5.2.1 Méthode de contact : la sonde thermique	40
1.5.2.2 Mesure de la diffusivité thermique	41
1.5.3 Choix des méthodes de mesures	43

1.6	Synthèse de la revue de littérature	44
CHAPITRE 2 OBJECTIF ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 47		
2.1	Problématiques et objectif de l'étude	47
2.2	Méthodologie	48
2.2.1	Phase I : programme expérimental	48
2.2.1.1	Granulométrie à l'étude	48
2.2.1.2	Influence de la nature minéralogique des mélanges	49
2.2.1.3	Influence de la granulométrie	50
2.2.1.4	Influence de la teneur en eau (w_c)	53
2.2.1.5	Dispositifs expérimentaux	54
2.2.2	Phase II : modélisation numérique	54
2.2.2.1	Outils de modélisation	54
2.2.2.2	Étude paramétrique	55
2.3	Plan de travail	56
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES 57		
3.1	Mélanges à l'étude	57
3.1.1	Source de granulats	57
3.1.1.1	Granulats de pierre calcaire	57
3.1.1.2	Granulats de VPC	58
3.1.2	Préparation des mélanges	58
3.1.3	Préparation de l'eau	59
3.2	Mesure de la conductivité thermique	60
3.2.1	Procédure	60
3.2.1.1	Équipements	60
3.2.1.2	Compactage	61
3.2.1.3	Hétérogénéité, dimensions finies, et paramètres d'essai	61
3.2.1.4	Mesure et acquisition	63
3.2.2	Calibration	65
3.2.3	Analyse des données	66
3.3	Mesure de la diffusivité thermique	68
3.3.1	Théorie	69
3.3.1.1	Méthode des différences finies	69
3.3.1.2	Résolution numérique de l'équation de la chaleur unidimensionnelle	70
3.3.2	Procédure	72
3.3.2.1	Dispositif expérimental	72
3.3.2.2	Compactage	73
3.3.3	Calibration	75
3.3.4	Analyse des résultats	76
3.3.4.1	Acquisition	76
3.3.4.2	Calcul d' α	76

CHAPITRE 4 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	83
4.1 Essais préliminaires : densité des particules sèches des mélanges	83
4.2 Résultats des essais de conductivité thermique	85
4.2.1 Phase de calibration	85
4.2.2 Influence de la taille des granulats	90
4.2.2.1 Résultats sur la pierre calcaire	91
4.2.2.2 Résultats sur le VPC	93
4.2.3 Influence de la nature minéralogique	96
4.3 Résultats des essais de diffusivité thermique	98
4.3.1 Phase de calibration	98
4.3.2 Influence de la taille des granulats	100
4.3.2.1 Résultats sur la pierre calcaire	100
4.3.2.2 Résultats sur le VPC	102
4.3.3 Influence de la nature minéralogique	103
CHAPITRE 5 ÉTUDE PARAMÉTRIQUE PAR SIMULATIONS NUMÉRIQUES	107
5.1 Validation sur un cas simple	107
5.1.1 Caractéristiques de l'échange convectif	107
5.1.2 Solution analytique et résultats de la simulation numérique	109
5.2 Présentation des cas d'étude	109
5.2.1 Configurations considérées	110
5.2.2 Propriétés des matériaux	112
5.2.3 Conditions initiales, aux limites et températures de l'air	113
5.3 Résultats pour le cas T_{air}^{const}	114
5.3.1 Configuration de référence : cas #1 à l'état sec (S : $\theta = 0\%$) et partiellement saturé (PS : $\theta = 10\%$)	114
5.3.2 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 0\%$)	118
5.3.3 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 10\%$)	122
5.4 Résultats pour le cas T_{air}^{sin}	127
5.4.1 Configuration de référence	127
5.4.2 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 0\%$)	130
5.4.3 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 10\%$)	134
CHAPITRE 6 SYNTHÈSE ET ANALYSE	141
6.1 Synthèse des essais de conductivité thermique	141
6.1.1 Effet de la porosité à l'état sec ($\theta = 0\%$)	141
6.1.2 Effet de la teneur en eau	143
6.1.3 Effet de la teneur en VPC	145
6.2 Synthèse des essais de diffusivité thermique	146
6.2.1 Effet de la teneur en eau	146
6.2.2 Effet de la teneur en VPC	147
6.3 Modélisation numérique	148

6.3.1	Impact de la teneur en eau	148
6.3.2	Impact de l'épaisseur et de la position de la couche de VPC	151
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		155
ANNEXE I	EXEMPLE DE PRÉPARATION DES MÉLANGES	161
ANNEXE II	PROCÉDURE POUR LA PRÉPARATION DU MÉLANGE EAU/AGAR-AGAR	163
ANNEXE III	THÉORIE DE LA SONDE THERMIQUE	165
ANNEXE IV	MONTAGE DE LA SONDE THERMIQUE	169
ANNEXE V	EXEMPLE DE CODE FLAC	171
ANNEXE VI	RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES	181
BIBLIOGRAPHIE		197

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Potentiel d'application du VPC	8
Tableau 1.2	Résultats des essais de conductivité	13
Tableau 1.3	Pourcentage de protection en fonction de l'indice de gel (FI) et pour deux types de structure routière	19
Tableau 1.4	Principales caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux isolants utilisés dans la construction routière.....	20
Tableau 1.5	Propriétés thermiques de certains constituants des sols (données à 20°C et 1 atm)	33
Tableau 1.6	Critères permettant de distinguer les classes de méthodes dédiées à la caractérisation thermique	36
Tableau 2.1	Fuseau granulométrique : CS - Courbe Supérieure ; CI - Courbe Inférieure ; GE - Granulométrie à l'étude	49
Tableau 2.2	Mélanges considérés (exprimés en pourcentage massique)	51
Tableau 2.3	Granulométrie des mélanges 75V/25P, 50V/50P, 25V/75P	52
Tableau 2.4	Subdivision granulométrique des mélanges de VPC et de pierre calcaire	53
Tableau 2.5	Teneurs en eau considérées lors des essais de conductivité et de diffusivité thermique	53
Tableau 2.6	Détails des paramètres de la couche qui seront modifiés lors des simulations numériques	55
Tableau 3.1	Caractéristiques physiques du matériau 0/5 non lavé.....	57
Tableau 3.2	Résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur les classes de VPC mixte fournis par Tricentris	58
Tableau 3.3	Appareillage pour l'essai de conductivité thermique	61
Tableau 3.4	Conductivité thermique des matériaux utilisés lors de la phase de calibration.....	65

Tableau 3.5	Caractéristiques physiques du sable d’Ottawa utilisé pour la phase de calibration de la sonde TR-1	66
Tableau 4.1	Densité des particules sèches pour les 3 classes de VPC à 20°C	84
Tableau 4.2	Densité des particules sèches pour les 3 classes de pierre calcaire à 20°C	84
Tableau 4.3	Densité des particules sèches pour les différents combinés à 20°C	85
Tableau 4.4	Conductivité thermique du sable d’Ottawa	85
Tableau 4.5	Récapitulatif des conductivités thermiques moyennes obtenues lors des 5 essais (#1 à #5) de conductivité thermique sur le sable d’Ottawa ($\lambda_{cible} = 0,254 \text{ W}/(\text{m.K})$)	90
Tableau 4.6	Subdivision granulométrique à l’étude	91
Tableau 4.7	Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de pierre calcaire	92
Tableau 4.8	Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de VPC	94
Tableau 4.9	Mélanges considérés (exprimés en pourcentage massique)	96
Tableau 4.10	Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différents combinés choisis	96
Tableau 4.11	Diffusivité thermique du sable d’Ottawa	98
Tableau 4.12	Récapitulatif des résultats obtenus lors des 5 essais de diffusivité thermique sur le sable d’Ottawa ($\alpha_{cible} = 2,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	99
Tableau 4.13	Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de pierre calcaire	100
Tableau 4.14	Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de VPC	103
Tableau 4.15	Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différents combinés de VPC et pierre calcaire	104
Tableau 5.1	Configurations géométriques des structures de chaussées étudiées	111

Tableau 5.2	Propriétés des différentes couches constituant la structure de chaussée modélisée	112
Tableau 5.3	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours	116
Tableau 5.4	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas de figure suivant l'état sec (S : $\theta = 0\%$) (profondeur en (mm))	118
Tableau 5.5	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 10\%$ (profondeur en (mm))	126
Tableau 5.6	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours	130
Tableau 5.7	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 0\%$ (profondeur en (mm))	134
Tableau 5.8	Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 10\%$ (profondeur en (mm))	139
Tableau 6.1	Porosités obtenues dans le cas des classes 1, 2 et 3, à $\theta = 0\%$	141
Tableau 6.2	Caractéristiques géotechniques et minéralogiques des sols de la Figure 6.2	143

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Résultats des essais de conductivité thermique sur des enrobés avec VPC	13
Figure 1.2 Indice de gel (moyenne de 2000 à 2005)	15
Figure 1.3 Schéma indiquant les sources d'eau pouvant alimenter la structure de la chaussée	16
Figure 1.4 Protection partielle contre le gel	18
Figure 1.5 Effet induit par l'ajout d'une couche d'isolation sur la propagation du front de gel et le soulèvement	20
Figure 1.6 Abaque de l'épaisseur minimale h_{GP} de matériaux granulaire nécessaire pour minimiser les risques de glaçage différentiel à la surface des chaussées isolées dans la province de Québec	22
Figure 1.7 Formation des lentilles de glace dans les sols	23
Figure 1.8 Vitesse de gonflement en fonction de la vitesse de propagation du front de gel	24
Figure 1.9 Influence de la vitesse du dégel sur la portance d'une superstructure routière	25
Figure 1.10 Schéma des échanges thermiques ayant lieu entre une structure de chaussée et l'atmosphère	27
Figure 1.11 Définition de la conductivité thermique	29
Figure 1.12 Illustration schématique des transferts thermiques dans un milieu poreux	34
Figure 1.13 Conductivité thermique de trois sols en fonction de la teneur en eau (graphique de gauche) et de la tension de succion (graphique de droite)	35
Figure 1.14 Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gradée	37
Figure 1.15 Schéma de principe de la méthode à flux radial	39
Figure 1.16 Géométrie du modèle ligne source infinie	41

Figure 2.1	Courbes granulométriques : CS - Courbe Supérieure ; CI - Courbe Inférieure ; GE - Granulométrie à l'étude.....	50
Figure 2.2	Courbe granulométrique des mélanges 75V/25P, 50V/50P, 25V/75P	51
Figure 2.3	Subdivision de la courbe GE en 3 classes granulométriques	52
Figure 2.4	Organigramme du programme expérimental	56
Figure 3.1	Photos des différents échantillons de VPC fournis par Tricentris	59
Figure 3.2	Représentation schématique du spécimen (vue de dessus) Le rayon d'influence R_1 doit satisfaire la relation (3.1)	62
Figure 3.3	Représentation schématique de la méthode de mesure de la conductivité thermique. À gauche une vue de face du spécimen (A-A) ; à droite une vue de dessus (B-B)	63
Figure 3.4	Évolution typique de la température au court du temps.....	66
Figure 3.5	Mesures effectuées avec du sable d'Ottawa : (a) résultats obtenus pendant la phase de chauffage, (b) résultats obtenus pendant la phase de repos.....	67
Figure 3.6	Configuration proposée par Mrawira & Luca (2002) pour la mesure de la diffusivité thermique sur éprouvettes de béton bitumineux	69
Figure 3.7	Maillage du domaine semi-infini utilisé pour le calcul de la solution de l'équation de la chaleur unidimensionnelle	71
Figure 3.8	Représentation schématique de la méthode de mesure de la diffusivité thermique (les dimensions sont en millimètres)	73
Figure 3.9	Photo des trois thermocouples	74
Figure 3.10	Photos du moule en béton servant à compacter les matériaux dans le contenant en plastique	75
Figure 3.11	Photo du montage complet de l'essai diffusivité thermique	77
Figure 3.12	Variation de la température à trois profondeurs différentes en fonction du temps	78
Figure 3.13	Variation de la diffusivité thermique en fonction du temps	80

Figure 3.14	Valeur moyenne de la diffusivité thermique obtenue avec les paramètres donnés ci-dessus	81
Figure 4.1	Évolution de la température en fonction du temps : (a) phase de chauffage (heating) (b) phase de repos (cooling).....	86
Figure 4.2	Exemple de résultats d'un essai de conductivité thermique : les 20 courbes sur chacun des graphiques représentent les 20 mesures effectués (5 points de mesure et 4 mesures par point de mesure). (a) et (c) phase de chauffage, (b) et (d) phase de repos	87
Figure 4.3	Résultats des essais de conductivité thermique obtenus pour chacune des 20 mesures de l'essai # 4	88
Figure 4.4	Résultats des essais de conductivité thermique sur le sable d'Ottawa.....	89
Figure 4.5	Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 différentes classes granulométriques de pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique	93
Figure 4.6	Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 différentes classes granulométriques de VPC en fonction de la teneur en eau volumique	95
Figure 4.7	Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 combinés en fonction de la teneur en eau volumique	97
Figure 4.8	Résultats des essais de diffusivité thermique sur le sable d'Ottawa	99
Figure 4.9	Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 classes granulométriques de pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique	101
Figure 4.10	Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 classes granulométriques de VPC en fonction de la teneur en eau volumique	102
Figure 4.11	Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 combinés en fonction de la teneur en eau volumique	105
Figure 5.1	Représentation schématique du domaine semi-infini considéré pour la résolution du problème	108
Figure 5.2	Comparaison des résultats de la simulation numérique avec ceux donnés par la solution numérique	110

Figure 5.3	Évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas #1, pour T_{air}^{const} , $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$	115
Figure 5.4	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour le cas #1, pour T_{air}^{const} , état sec : S ($\theta = 0\%$) et partiellement saturé PS ($\theta = 10\%$)	117
Figure 5.5	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})	119
Figure 5.6	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})	120
Figure 5.7	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})	121
Figure 5.8	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})	123
Figure 5.9	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})	124
Figure 5.10	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})	125
Figure 5.11	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour le cas #1, pour T_{air}^{sin} , état sec : S ($\theta = 0\%$) et partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$)	128
Figure 5.12	Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas #1, pour $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$ et à t=30j.....	129
Figure 5.13	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})	131
Figure 5.14	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})	132

Figure 5.15	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})	133
Figure 5.16	Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas où $\theta = 0\%$ et à $t=30j$	135
Figure 5.17	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})	136
Figure 5.18	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})	137
Figure 5.19	Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})	138
Figure 5.20	Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas où $\theta = 10\%$ et à $t=30j$	140
Figure 6.1	Conductivité thermique de sable et d'argile en condition gelée et non gelée, en fonction de la masse volumique sèche	142
Figure 6.2	Conductivité thermique de différents sols en fonction de la teneur en eau volumique	144
Figure 6.3	Effet de l'eau sur la diffusivité thermique	147
Figure 6.4	Évolution du front de gel dans les cas T_{air}^{const} et T_{air}^{sin} et pour $\theta = 0\%$	149
Figure 6.5	Évolution du front de gel dans les cas T_{air}^{const} et T_{air}^{sin} et pour $\theta = 10\%$	150
Figure 6.6	Potentiel de risque de formation de givre sur les différents types de chaussées	152

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing and Material
CE4	Module d'excitation à courant constant
CR1000	Station d'acquisition de données
EB	Enrobé bitumineux
ETS	École de technologie supérieure
EEQ	Eco Entreprise Québec
FI	Indice de gel
GM	Grosseur maximale
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
MEPDG	Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
MG112	Matériaux granulaire 0-112 mm
MG20	Matériaux granulaire 0-20 mm
MTMDET	Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports
SAQ	Société des alcools du Québec
VMP	Vides du squelette granulaire
VPC	Verre postconsomation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE MESURE

<i>A</i>	ampère (unité d'intensité électrique)
$^{\circ}C$	degré Celsius (unité de température)
<i>g</i>	gramme (unité de masse)
<i>j</i>	jours
<i>Hz</i>	Hertz
<i>K</i>	kelvin
<i>m</i>	mètre (unité de longueur)
<i>mm</i>	millimètre
m^2	mètre carré
m^3	mètre cube
<i>kPa</i>	kiloPascal
<i>MPa</i>	mégaPascal
<i>rad</i>	radian
Ω	ohm
<i>s</i>	seconde (unité de temps)
<i>W</i>	watt

SYMBOLES

α	diffusivité thermique
c	capacité thermique massique
C	capacité thermique volumique
C_{λ}	facteur de correction

δ_X	écart ou erreur relatif pour la variable X
Δt	incrément temporel
Δx	incrément spatial
ds	densité des particules sèches
F_d	facteur d'amortissement
$\overrightarrow{\text{grad}}$	opérateur gradient
h	coefficient de convection
I	intensité du courant électrique
χ	rapport des masses volumiques sèches
L	longueur de la sonde thermique
λ	conductivité thermique
λ_h	conductivité thermique pour la phase de chauffage
λ_{hc}	conductivité thermique pour la phase de chauffage et de repos
n	porosité
n_p	porosité de la pierre calcaire
n_v	porosité du VPC
∇	opérateur nabla
ν	viscosité
ω	pulsation
P	flux de chaleur par unité de volume
ϕ	flux thermique
Pr	nombre de Prandlt
q	flux thermique
R_1	rayon d'influence minimal
Re	nombre de Reynolds

R_{sonde}	résistance de la sonde
ρ	masse volumique
ρ_d	masse volumique sèche
ρ_s	masse volumique des particules sèches
ρ_w	masse volumique de l'eau
s	écart type
S_r	degré de saturation
T	température
T_{air}	température de l'air
τ	période
τ_h	temps de chauffage
t_d	temps de début
t_{dt}	intervalle de temps
t_f	temps de fin
t_i	temps d'attente entre chaque mesure de la sonde
T_0	amplitude de température
T_s	température de surface
V_{air}	vitesse de l'air
w	teneur en eau massique
w_c	teneur en eau cible
z	profondeur

INTRODUCTION

Les Québécois génèrent annuellement autour de 200 000 tonnes de verre (bouteilles de vin, contenant en verre, pots de confitures, ...), dit verre postconsommation (VPC), dont près de 80% est récupéré et sert à la production de nouveaux produit en verre. Néanmoins, une partie non négligeable (20%, 40 000 tonnes) du verre généré annuellement trouve le chemin des centres d'enfouissement. De plus, la fermeture en 2013 d'une grande usine de conditionnement, responsable à elle seule du traitement de 80% du VPC, compliqua la situation québécoise de gestion des déchets de verre. C'est pourquoi, en 2005 à Sherbrooke, puis en 2013 à Montréal, deux groupes de recherches se sont mis à s'intéresser à la valorisation du verre dans le béton (Chaire de la SAQ à l'Université de Sherbrooke) et dans les matériaux de chaussées (au LCMB à l'ÉTS¹).

Le but poursuivi par les étudiants en maîtrise et doctorat du LCMB, et dans lequel s'inscrit le présent projet de recherche, est d'incorporer le VPC dans la formulation d'enrobés bitumineux et dans les couches structurales de la chaussée. Cette idée d'utiliser des granulats de VPC au profit du granulat naturel, parfois difficile à extraire et coûteux, date des années 70 et durant lesquelles plusieurs projets pilotes et travaux de laboratoire furent entrepris aux États-Unis. Tandis que les propriétés mécaniques et hydrauliques de mélanges granulaires incorporant des granulats de VPC ont fait l'objet de nombreuses publications (Larsen (1989), Hughes (1990), Murphy *et al.* (1991), Dames and Moores (1993), Nan Su (2002), Boutonnet *et al.* (2003), Shao-peng Wu (2004), Chen *et al.* (2006), XUN (2007), Arnold *et al.* (2008), Forum (2008), Zhang *et al.* (2011), Lu *et al.* (2011), Lolias *et al.* (2012), Bernard (2014)), l'aspect thermique est presque absent et très peu de travaux se sont intéressés aux propriétés thermiques du VPC dans le cadre d'une chaussée (Dickson (1973), Chesner *et al.* (1998), Dames and Moores (1993)). D'autre part, les conditions climatiques québécoises, particulièrement en hiver, poussent le ministère des Transport du Québec à concevoir de nouvelles approches pour le dimensionnement

1. École de Technologie Supérieure, Montréal

structural des chaussées. Une bonne connaissance des propriétés thermiques est de fait important, notamment lors du dimensionnement face au gel afin de limiter les dégradations liées aux phénomènes de gel et de dégel. Les propriétés thermiques du verre font de ce matériau un bon isolant thermique pouvant par exemple servir comme couche tampon dans le corps d'une chaussée pour la pénétration du front de gel.

L'objectif de ce projet de recherche est d'étudier les propriétés thermiques de mélanges de VPC avec de la pierre calcaire ainsi que leur impact sur le régime thermique d'une structure de chaussée. Ce projet propose une première approche expérimentale visant à caractériser les propriétés thermiques du VPC et de la pierre calcaire séparément ainsi que celles de mélanges de ces deux matériaux. La seconde approche prend en considération les résultats expérimentaux pour étudier, au travers de modélisations numériques, l'impact de l'incorporation de VPC à l'échelle de la chaussée et en particulier sur la profondeur de pénétration du gel.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres.

1. Le premier chapitre présente l'état des connaissances sur les pratiques d'incorporation de granulats de VPC dans la structure de chaussée, sur les problématiques liées au gel et au dégel dans les chaussées ainsi que sur les transferts thermiques dans les milieux granulaires ;
2. Le deuxième chapitre sert à définir la problématique et l'objectif du projet de recherche ainsi qu'à décrire la méthodologie qui a été suivie durant ce projet de recherche ;
3. Le troisième chapitre décrit les deux procédures mises en place au LCMB pour la mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique ;
4. Le quatrième chapitre présente les résultats des essais de conductivité thermique et de diffusivité thermique effectué sur différentes granulométries de VPC et de pierre calcaire ainsi que sur des mélanges de VPC et pierre calcaire. Durant cette phase expérimentale,

des essais ont également été effectués pour étudier l'impact de la teneur en eau dans les mélanges ;

5. Le cinquième chapitre présente les résultats des modélisations numériques. Ces modélisations servent à l'étude de l'incorporation d'une couche à faible conductivité thermique (*i.e.* couche de VPC) dans la structure d'une chaussée conventionnelle. Il s'agit là d'analyser l'influence de l'épaisseur et de la position cette couche de VPC ainsi que celle de la température de l'air et de la teneur en eau, sur le régime thermique de la chaussée et en particulier sur la propagation du front de gel ;
6. Le sixième chapitre sert de clôture au mémoire avec une synthèse des résultats expérimentaux mis en perspective avec les résultats disponibles dans la littérature. Une analyse des résultats de simulation numérique est également présente dans ce dernier chapitre.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

C'est au début des années 70 que furent entrepris les premiers travaux de recherche sur le recyclage du verre postconsommation (VPC) comme substitut granulaire dans les structures de chaussées. Ces recherches furent en partie motivées par la pénurie de granulats naturels dans certaines régions des États-Unis. Mais la principale raison derrière ces travaux a été de trouver une manière de réutiliser ce VPC qui autrement serait entreposé dans des sites d'enfouissement pour une faible valeur ajoutée. Ce sont principalement les performances mécanique et hydraulique du VPC qui ont intéressé les chercheurs. Les travaux sur les performances thermiques du VPC en tant que substitut granulaire dans les chaussées n'ont par contre pas été très approfondis. Selon Carlson *et al.* (2010) cela pourrait être attribué en partie à la complexité et la diversité des matériaux utilisés dans le dimensionnement des chaussées ainsi qu'à un certain manque d'intérêt vis-à-vis des interactions thermiques entre la structure de chaussée et le milieu environnant, comparativement aux performances mécaniques et hydrauliques.

1.1 Le recyclage du VPC

La façon la plus évidente de recycler le VPC est de l'utiliser dans la mise au point de nouveaux produits en verre. Cette pratique permet une diminution majeure du coût énergétique nécessaire à la transformation des différents produits bruts en verre. Powell (1983) a estimé que l'utilisation de 20%, 50% et 100% de VPC dans l'industrie du verre pourrait réduire la consommation d'énergie de respectivement 4%, 11% et 22%.

En revanche, tout le VPC ne peut être réutilisé par les industries de recyclage, car le VPC doit être de couleur unie et non contaminé pour pouvoir entrer dans le circuit de recyclage. Ainsi, une quantité significative du VPC récupérée n'est pas propre au recyclage et doit très souvent être placée dans des sites d'enfouissement.

1.1.1 Situation québécoise

Au Québec le recyclage des matières résiduelles fait partie intégrante des objectifs fixés par la politique québécoise de gestion des matières résiduelles. La tâche n'est cependant pas aisée. Selon les chiffres publiés par Eco Entreprises Québec (2015), en 2014 c'est près de 200 000 tonnes de VPC qui ont été générés au Québec par le milieu résidentiel, dont environ 43% (86 000 tonnes) ont été acheminées à des fins de recyclages. Le reste des déchets de VPC s'en va dans des centres d'enfouissements. De plus, la fermeture en 2013 de l'usine de conditionnement Klareco situé dans le Vieux-Longueuil a plus que compliqué la tâche, car cette usine traitait à elle seule près de 80% du VPC généré au Québec. Klareco était également la seule entreprise en Amérique du Nord en mesure de transformer le VPC mixte issu de la collecte sélective ; le VPC mixte étant le VPC contaminé et de couleur non unie. Ce sont principalement les frais reliés à la décontamination qui ont poussé l'entreprise à la fermeture. L'usine traitait 100 000 tonnes de VPC chaque année. Depuis, les bouteilles et les pots en verre s'entassent dans les centres de tri de la province. La fermeture de Klareco a également touché certaines entreprises qui récupéraient du VPC recyclé. C'est le cas d'Owens-Illinois, une entreprise qui fabrique des contenants en VPC pour l'industrie des aliments, de la bière, du vin et des boissons non alcoolisées. Owens-Illinois possède 80 usines à travers le monde dont l'une d'elles se trouve à Montréal. Cette dernière se procurait plus de 65% de son VPC dans la province, mais depuis la fermeture de Klareco, elle se procure son VPC ailleurs, de l'Ontario ou du Nouveau-Brunswick par exemple, où les contenants en VPC sont consignés.

Au cours des 15 dernières années, le gouvernement du Québec a investi plus de 34 millions de dollars afin de trouver une solution durable pour améliorer et moderniser le système de collecte sélective, tandis que les entreprises concernées par cette problématique encouragent des projets de recherche innovants visant à trouver une forme de valorisation au VPC mixte issu de la collecte sélective.

1.1.2 Projets de recherche

En avril 2004, une chaire de recherche en valorisation du VPC mixte et coloré est créée à l'Université de Sherbrooke en partenariat avec la Société des Alcools du Québec (SAQ). Elle vise à étudier la faisabilité du recyclage de VPC dans le béton. D'autres travaux de recherche sont menés dans le but de trouver de nouveaux débouchés pour le VPC. Il y a par exemple la possibilité technique de substituer, en tout ou en partie, le sable de silice par du VPC recyclé dans la fabrication de silice précipitée. En décembre 2014, la Ville de Montréal a approuvé un contrat de recherche de 80 000\$ avec l'Université de Montréal pour étudier les méthodes d'inclusion du VPC dans les mélanges de béton. Enfin, citons le projet-pilote de valorisation du VPC non conforme qui est utilisé comme matériau de sous-fondation pour les infrastructures de l'éco-centre Michel-Ledoux à Sherbrooke.

Le sujet de recherche présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la même dynamique que les travaux précédents et ne représente d'ailleurs qu'un axe de recherche parmi les nombreux travaux de maîtrise et de doctorat qui sont en cours de réalisation au LCMB et qui visent à valoriser le VPC dans les chaussées. Ils bénéficient du soutien technique et financier de la Société des Alcools du Québec (SAQ), de la Ville de Montréal, d'Eco Entreprises Québec (EEQ) et de Mitacs-Accélération. Deux volets principaux composent ce projet de recherche. Le premier volet concerne l'intégration de VPC dans les matériaux bitumineux et s'intéresse notamment à l'impact du VPC dans les enrobés bitumineux conventionnels ainsi que l'aspect rhéologique et physique du VPC dans les enrobés bitumineux. Le deuxième volet concerne les fondations granulaires et l'utilisation de VPC dans les matériaux de fondation ainsi que la modélisation du comportement d'une chaussée incluant du VPC.

1.2 Le verre postconsommation (VPC) dans les chaussées

La majorité des travaux de recherche effectuée sur le VPC ont eu pour but d'évaluer ses performances en tant que substitut granulaire dans les bétons et chaussées bitumineuses. En effet, le VPC est considéré comme ayant une bonne résistance mécanique et un bon potentiel de drai-

nage (Wartman *et al.* (2004)). Le Tableau 1.1 donne une liste non exhaustive des applications anticipées pour le VPC dans le domaine de la construction :

Tableau 1.1 Potentiel d’application du VPC
Tiré de Wartman *et al.* (2004)

Applications mécaniques	Applications pour drainage
Couche de fondation	Drainage des fondations
Sous-fondation	Couverture de drainage
Remblai	Drain français
Talus	Filtre à sable
Renforcement structural	Installation septique
Revêtement antidérapant	

1.2.1 Le Glaphalt

L’idée d’utiliser le VPC comme substitut d’agrégat dans les enrobés bitumineux (EB) est née en Amérique du Nord au début des années 70. C’est en 1989, aux États-Unis, que la résolution conjointe No. 301 a été adoptée dans le but de mener une étude de faisabilité quant à l’incorporation de VPC dans les EB. L’étude impliqua la participation de trois états – Connecticut, Virginie et Floride (Boutonnet *et al.* (2003))

Selon le rapport rendu par le *Connecticut Departement of Transportation* (Larsen (1989)), la mise en place de Glaphalt s’est faite avec succès dans 45 sites au travers des États-Unis et du Canada entre les années 1969 et 1988. Cela dit, la majorité des sites d’implantation étaient des rues, des voies d’accès ou des places de stationnement, soient des lieux avec des volumes et vitesses de trafic relativement faibles. De plus, certains problèmes sont apparus lors de l’ajout de VPC : mauvaise adhésion entre le VPC et le bitume ; perte d’adhérence en particulier avec des particules grossières ; bris des particules grossières et l’augmentation du coût de production (\$5/t de plus que de l’EB conventionnel). Le rapport en conclut que le Glaphalt ne devrait pas

être utilisé comme couche de surface, mais éventuellement comme couche de base afin d'éviter les risques liés au ressuage et à une moins bonne adhérence des pneus.

L'étude du *Virginia Departement of Transportation* (Hughes (1990)) est basée sur des essais en laboratoire et une analyse économique du Glasphalt. Deux dosages en VPC (5% et 15%) ont été évalués sachant que la grosseur maximale (GM) des granulats de VPC était de 9,5mm. Les résultats montrent que l'ajout de VPC tend à diminuer les vides du squelette granulaire (VMP) et la teneur en vides dans les spécimens Marshall. En revanche, ajouter jusqu'à 15% de VPC n'affecte ni le module réversible ni la résistance à la rupture en tension du Glasphalt. D'un point de vue économique, l'ajout de VPC ne présente pas de gains importants, car le prix du VPC varie considérablement.

Le *Florida Departement of Transportation* (Murphy *et al.* (1991)) a quant à lui effectuer son étude sur trois EB : un enrobé de référence avec des granulats d'une GM de 9,5 mm ; un enrobé avec 15% de VPC (remplaçant la fraction grossière 9,5 mm - 2,06 mm) et un enrobé avec 15% de VPC (remplaçant la fraction fine 2,06 mm – 75 μm). Les essais menés ont mis en évidence une diminution de 15 à 20% des performances lors de l'essai Marshall et une diminution de 20% de la résistance en flexion dans le cas de l'enrobé avec 15% de VPC filler. Murphy *et al.* (1991) en conclu alors que l'utilisation du VPC dans les EB ne semble pas apporter d'avantage économique surtout si les granulats naturels sont présents près des stations d'enrobage.

Les États-Unis possèdent à ce jour le plus grand nombre de spécifications autorisant l'utilisation de VPC comme substitut granulaire dans les EB (ainsi que dans les couches granulaires). Depuis le début de ce millénaire, d'autres pays tels que la Chine ou l'Australie ont entrepris de nouveaux travaux sur les performances du Glasphalt (Chen *et al.* (2006), XUN (2007), Zhang *et al.* (2011), Lu *et al.* (2011), Shaopeng Wu (2004), Forum (2008), Loliás *et al.* (2012)).

1.2.2 Le VPC dans les couches granulaires

La résistance mécanique des granulats de VPC est similaire à celle des granulats conventionnels utilisés dans les couches granulaires (Arnold *et al.* (2008), Bernard (2014)). De ce fait, l'incor-

poration de particules de VPC dans les couches granulaires est envisageable et a fait preuve de quelques projets de recherches. En 1993, Dames & Moore Inc. a mené la première étude publique à ce sujet (Dames and Moores (1993)). Cette étude fut subventionnée par les états du Minnesota, de New York, de California, d'Oregon, de Washington et par la *Southwest Public Recycling Association* dans le but d'évaluer la pertinence de l'utilisation du VPC dans les couches structurales des chaussées. Les aspects environnementaux, économiques, techniques et mécaniques ont tous été abordés dans ce rapport. D'un point de vue mécanique, différents essais ont été menés sur 2 classes de VPC correspondant chacune à une grosseur de particules différentes (retenu 19mm et retenu 6,35mm). Le programme expérimental comprenait les essais suivants : poids spécifique, densité relative, granulométrie, conductivité thermique, perméabilité, résistance au cisaillement direct, CBR (California Bearing Ratio), résistance (norme ASTM D2844) et module réversible. Les proportions massiques de VPC analysées ont été de 0%, 15%, 50% et 100%. Les résultats ont montré que pour les différentes dimensions de VPC étudiés, les mélanges à 15% et 50% de VPC donnent des valeurs de module réversible, de résistance à la fragmentation (essai Los Angeles) et de résistance (normes ASTM D2844) conformément aux exigences.

Plus récemment, en 2012, le *Northern Territory Government* (Lolias *et al.* (2012)) a publié un rapport de recherche portant en partie sur le recyclage du VPC et son utilisation en génie civil. Traditionnellement le VPC ne fut pas considérée par les autorités routières comme une alternative appropriée pour remplacer une partie des granulats naturels. Depuis quelque temps, les recherches et les initiatives pour incorporer le VPC dans les chaussées dans des pays tels que les États-Unis, la Nouvelle-Zélande ou Taïwan (Nan Su (2002)) montrent que le VPC est un bon matériau pour remplacer une partie des granulats et du sable présent dans la structure routière. D'après le *Federal Highway Administration* (FHA, 2002), si le VPC est concassé et traité de la bonne façon, il peut alors avoir une perméabilité similaire à celle du sable grossier. Cela ouvre alors des possibilités quant à son utilisation dans les couches de base.

1.2.3 Aspect thermique

Le développement d'outils fiables pour la prédiction des transferts thermiques qui ont lieu au sein d'une structure de chaussée dépend essentiellement d'une bonne connaissance de ses propriétés thermiques. Tandis que les propriétés physiques et mécaniques ont été abondamment étudiées (Mamlouk & Zaniewski (1999)), de telles études détaillées sur la relation qui existe entre les propriétés thermiques et le dimensionnement des chaussées restent limitées.

1.2.3.1 L'intérêt des propriétés thermiques

Les propriétés thermiques, telles que la conductivité thermique et la diffusivité thermique, sont de plus en plus requises dans les programmes de modélisation de chaussée, et ce pour différentes raisons.

De nombreux modèles furent développés pour l'étude du "taux de refroidissement" d'une chaussée lors de sa mise en place (Corlew & Dickson (1968), Jordan & Thomas (1976), Wolfe *et al.* (1980), Highter & Wall (1984)). Dans ces études, les chercheurs se sont basés sur les propriétés thermiques des matériaux de chaussée pour estimer le temps de cure et le temps disponible pour le compactage en fonction des conditions environnementales extérieures (vitesse du vent, angle d'incidence du rayonnement solaire, taux d'humidité, et la température de l'air). D'autres travaux se sont quant à eux focalisés sur le mécanisme de formation des lentilles de glace et les contraintes induites par les phénomènes de gel/dégel dans les chaussées situés dans des régions plus froides et de plus hautes latitudes (Dempsey & Thompson (1970b), Simonsen & Isacsson (1999), Phukan (1991)).

D'autre part, des modèles empiriques/mécaniques ont été développés pour déterminer l'impact des conditions environnementales sur les performances des chaussées. Citons par exemple le modèle MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, 2004) permettant de prédirer l'apparition de fissures thermiques, d'ornières ainsi que d'autres détériorations liées aux conditions thermiques, et ce pour des chaussées souples et rigides. Par ailleurs, Carlson *et al.* (2010) notent un nombre croissant de travaux à propos de l'impact des chaussées urbaines sur

les conditions environnementales au sein des villes (Pomerantz *et al.* (2000), Golden *et al.* (2005), Golden & Kaloush (2006), Bhardwaj *et al.* (2006)). Les résultats issus de ces travaux ont permis le développement de modèles visant à prédire la température à la surface et au sein des chaussées dans le but d'évaluer la contribution de ces dernières vis-à-vis des phénomènes d'îlots de chaleur (Gui *et al.* (2007)).

1.2.3.2 Contribution thermique du VPC

Le VPC est bien connu pour ses propriétés d'isolation et de rétention de chaleur qui sont essentiellement dues à sa faible conductivité thermique. Des granulats ou mélanges granulaires à faible conductivité thermique peuvent aider à réduire la profondeur de pénétration du gel dans les chaussées (Chesner *et al.* (1998)).

Des travaux menés au sein du *Colorado School of Mines* dans le début des années 70 ont montré que le Glasphalt met plus de temps à se refroidir et cela serait due en partie à la faible conductivité thermique du VPC, comparée à celle des granulats naturels (Dickson (1973)). Des essais de capacité thermique et de conductivité thermique ont été effectués sur des EB incorporant différentes proportions de VPC. La Figure 1.1 reprend la moyenne des valeurs de conductivité thermique des mélanges en fonction de la teneur en VPC dans l'EB. La tendance y est clairement visible ; la conductivité thermique de l'EB diminue à mesure que la teneur en VPC augmente.

Plus tard, en 1993, des essais de conductivité thermique sur du VPC ont été réalisé (Dames and Moores (1993)). Les résultats sont données dans le Tableau 1.2. En comparant la conductivité thermique du verre recyclé avec celle de sable grossier, le verre semble être en mesure de contenir plus de chaleur que les granulats naturels.

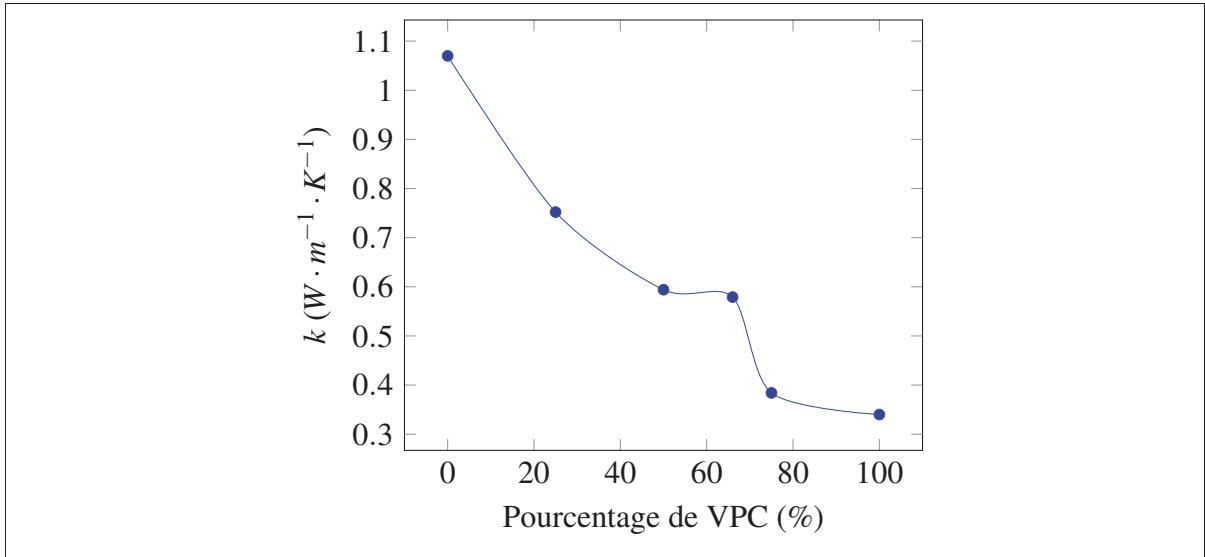


Figure 1.1 Résultats des essais de conductivité thermique sur des enrobés avec VPC
Tirée de Dickson (1973)

Tableau 1.2 Résultats des essais de conductivité
Tiré de Dames and Moores (1993)

Matériaux	Conductivité thermique apparente ⁽¹⁾ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	
	Échantillon 1	Échantillon 2
Verre recyclé	0,315	0,260
Sable grossier	0,463	0,638

(1) Résultats obtenus pour deux échantillons différents

1.3 Action du gel sur les chaussées

1.3.1 Contexte climatique

Le territoire du Québec (1 700 000 km²) est desservi par plus de 170 000 km de route de toutes catégories ; 30 000 km de ces routes constituent le réseau supérieur et sont à la charge du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTM-DET) (Doré (1997)). Le climat québécois est aussi diversifié que rigoureux. La température

hivernale moyenne sur la province est de -15°C et il arrive que la température de l'air atteigne -40°C . Au sud du Québec, portion de la province où se retrouve la très grande majorité de la population et des infrastructures routières, la température hivernale moyenne est de -8°C et des écarts de 20°C peuvent être observés en l'espace de quelques heures (Desjarlais & Blondlot (2010)). La somme des précipitations estivales est d'environ 450 mm tandis que l'équivalent en eau des chutes de neige en hiver peut atteindre 350 mm. Pendant plus de 4 mois, le sol gèle à des profondeurs pouvant atteindre 3 m. Le gel est donc considéré au Québec comme un des facteurs principaux de détérioration des chaussées. Les défis posés par ces conditions climatiques rigoureuses poussent le MTMDET à concevoir de nouvelles approches pour le dimensionnement structural des chaussées en condition de gel.

L'indice de gel fait partie de ces paramètres utilisés dans le domaine du génie civil pour le dimensionnement des chaussées et c'est un bon indicateur pour évaluer quantitativement l'intensité du refroidissement dans un secteur donnée. Généralement noté FI et exprimé en $[^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour}]$, il est le paramètre qui intervient dans les formules de calcul de la profondeur du gel ; élément déterminant pour l'ingénieur lors du dimensionnement structural d'une chaussée en condition de gel (Dysli (1991)). Sur le territoire routier du Québec, l'indice de gel peut varier de $1000^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour}$ au sud jusqu'à $2200^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour}$ à Chibougamau (Saint-Laurent (2006)). Les valeurs moyennes d'indice de gel dans le province de Québec sont représentées sur la carte de la Figure 1.2 et donnent un aperçu de la répartition de l'indice de gel dans le province de Québec entre 2000 et 2005.

1.3.2 Dégradations liées au gel et dégel

En conditions hivernales, la température à la surface d'une chaussée routière est en général sous le point de congélation. La température en dessous de 0°C entraîne le gel progressif des couches qui composent la chaussée, du haut vers le bas. Les couches de fondation et de sous-fondation sont composées de sols granulaires qui se drainent bien et qui ne sont généralement pas gélifs. Lorsque le gel pénètre dans la structure de chaussée, il n'y a pas de variations de volumes significatifs (Dysli (2007)). En revanche, le sol d'infrastructure peut être touché par

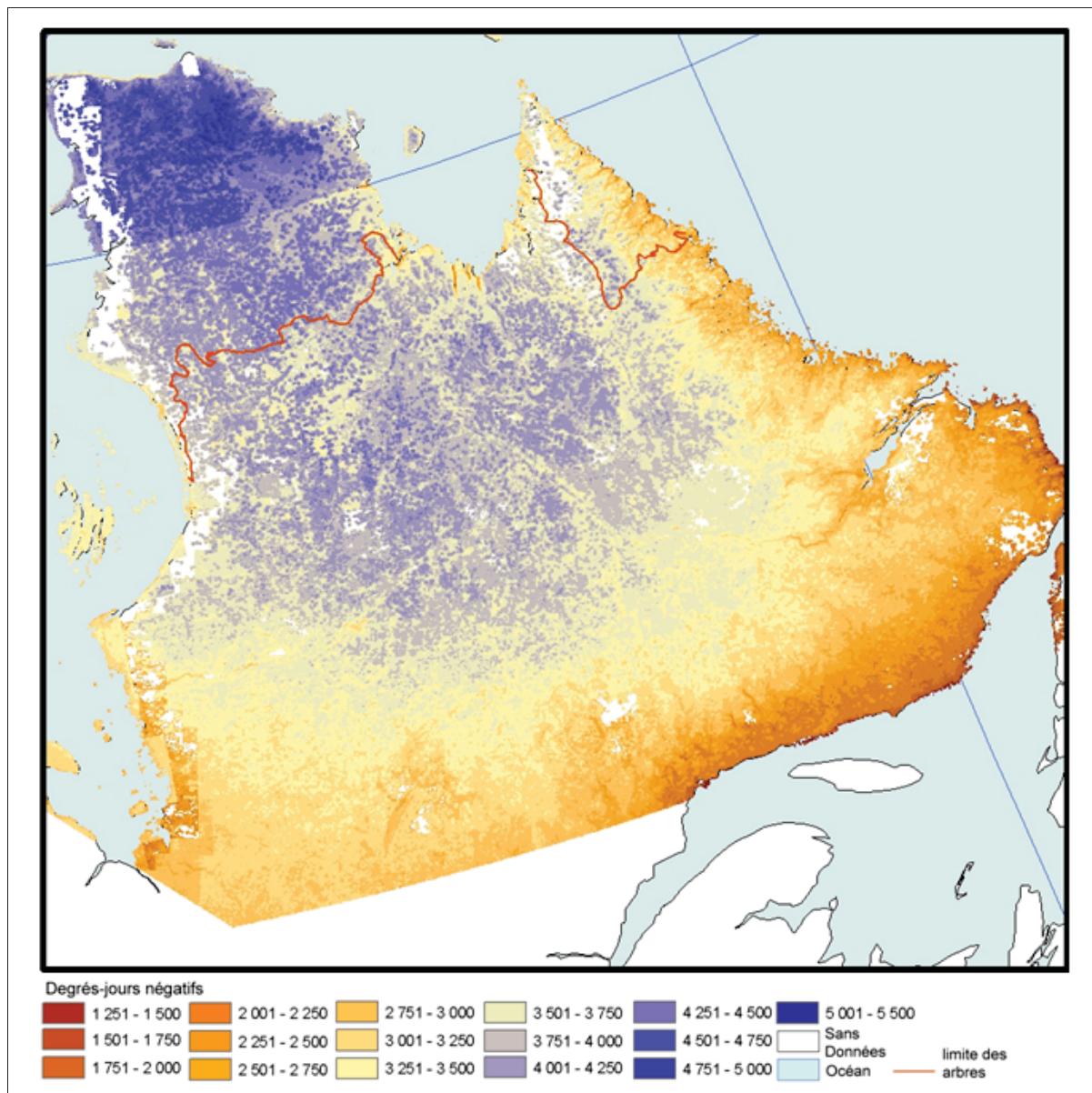


Figure 1.2 Indice de gel (moyenne de 2000 à 2005)
Tirée de Hachem (2008)

la propagation du gel qui se produit généralement jusqu'à 1 à 3 mètres de profondeur par rapport à la surface. Notons qu'en période estivale, l'effet de l'ensoleillement et des températures se traduit principalement par le fluage et l'orniérage des couches bitumineuses en haut de chaussée sous l'effet du trafic. De plus, les rayons ultraviolets accélèrent le vieillissement des matériaux en surface de chaussée par oxydation du bitume, en le durcissant et en le fragilisant.

La température, et en particulier l'effet des températures extrêmes, est donc naturellement le facteur central de tout dimensionnement structural des chaussées, notamment en conditions de gel (*voir* section 1.3.3).

La majorité des cas de dégradations ont pour facteur commun la présence systématique d'eau dans les sections de chaussée. L'eau, qu'elle soit à l'état liquide ou solide joue un rôle important quant à l'apparition des désordres. L'accumulation d'eau dans une chaussée se fait généralement au moyen d'infiltrations pouvant provenir de différentes sources. La cause la plus courante étant par précipitation puis infiltration à des degrés plus ou moins importants au travers du revêtement de surface de la chaussée, qu'il soit sain ou dégradé (Valéry Mauduit (2013)). Au Québec, la nappe phréatique se retrouve généralement très près de la surface et les conditions hydrogéologiques favorisent la formation de lentilles de glace alimentées par des infiltrations provenant des bords de la structure ou par absorption/remontée capillaire de l'eau de la nappe phréatique (Figure 1.3).

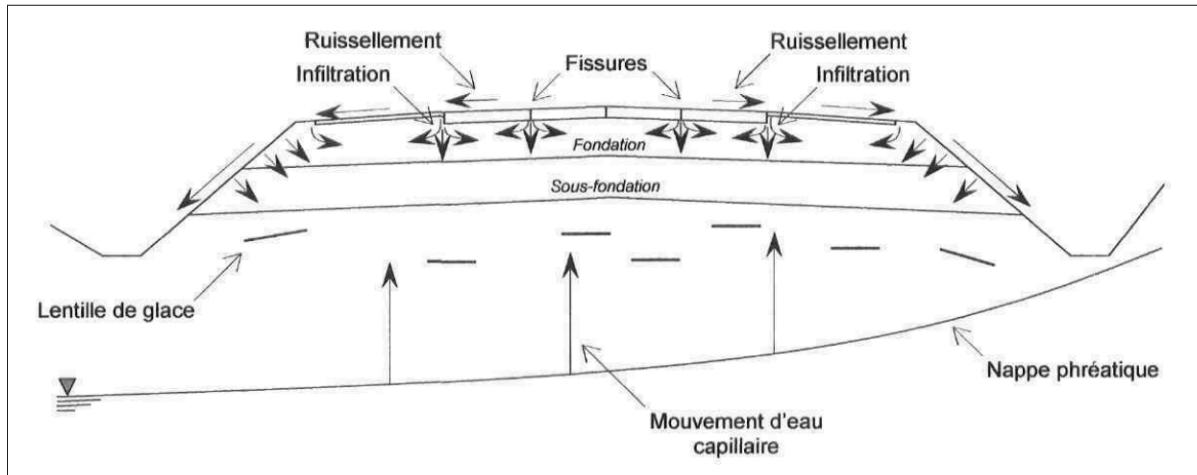


Figure 1.3 Schéma indiquant les sources d'eau pouvant alimenter la structure de la chaussée
Adaptée de Savard (1994)

Les causes de stagnations de l'eau dans la chaussée peuvent être nombreuses (système de drainage mal positionné ou défaillant, présence d'une source phréatique,...) et c'est lors du

dimensionnement que ces dernières doivent être prises en compte. Des zones entières peuvent devenir gorgées d'eau de façon temporaire ou permanente et conduire à plus ou moins long terme à un désenrobage du matériau.

Enfin, le trafic est sans nul doute un facteur commun à toutes les dégradations subies par la chaussée. Exprimé en millions de poids lourds attendus sur la durée de vie de la chaussée, le trafic contribue essentiellement à une fatigue à long terme en partie haute de chaussée et rend celle-ci particulièrement vulnérable au gel/dégel.

1.3.3 Dimensionnement au gel des chaussées

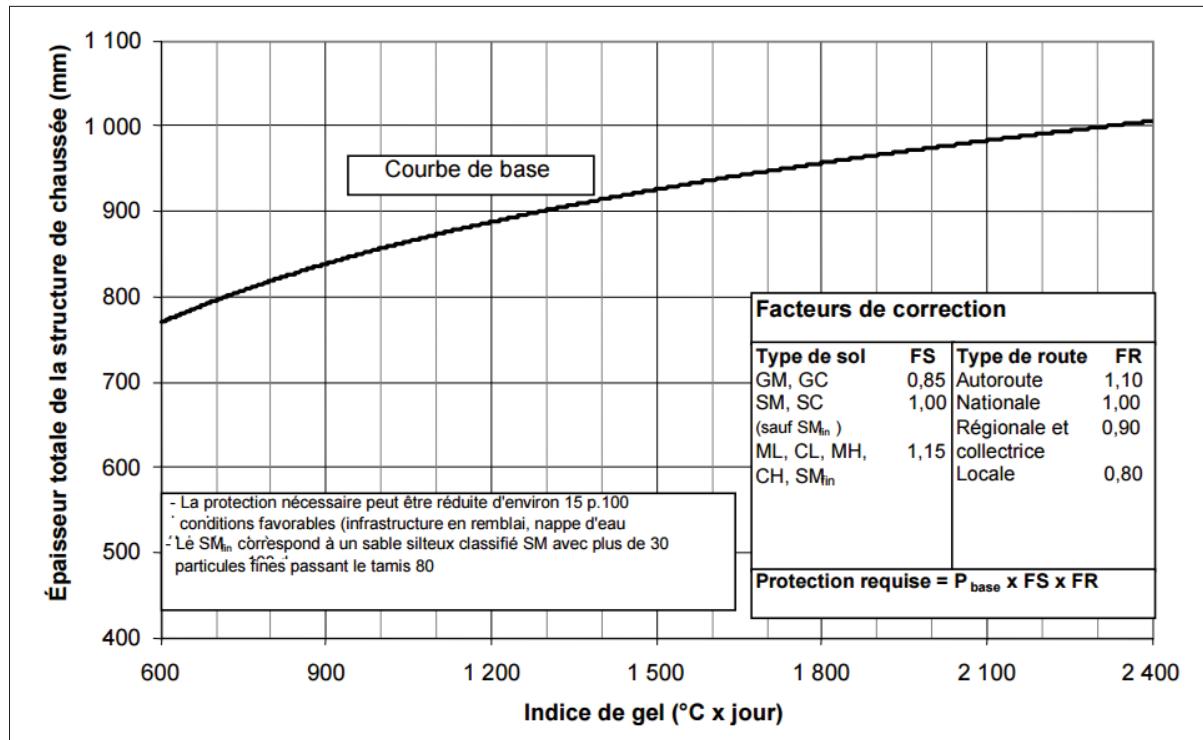
Le dimensionnement thermique peut être conçu afin d'empêcher le gel d'atteindre un ouvrage tel qu'une conduite d'aqueduc ou de protéger un sol d'infrastructure considéré comme sensible vis-à-vis du gel. On se sert dans ce cas de la profondeur de gel comme critère de conception principal (Saint-Laurent (2006)).

Pour ce qui est du dimensionnement des projets routiers, le but est d'éviter l'endommagement du revêtement sous forme de fissures de gel ou de déformation de la surface. Le soulèvement de la chaussée causé par le gel constitue un indicateur directement lié aux dommages ou à la performance au gel. Le défi ultime du concepteur consiste donc à estimer le confort de roulement hivernal et la fissuration du revêtement à partir des variations de soulèvement entre les différents sondages aux points d'analyse. Un soulèvement globalement plus faible a plus de probabilité de conduire vers des soulèvements différentiels plus faibles (Saint-Laurent (2006)).

Gustavsson *et al.* (1999) considèrent qu'un seuil de soulèvement global situé entre 30 et 100 mm constitue un préalable pour maintenir un niveau de service acceptable et prévenir la fissuration du revêtement. Konrad (1998) estime que les soulèvements acceptables au Québec semblent se situer entre 30 et 60 mm selon le type de chaussée. Doré *et al.* (2005) proposent un abaque contenant les valeurs des soulèvements acceptables comme une fonction de l'épaisseur de la fondation granulaire. Le service des chaussées indique que les soulèvements sont peu

perceptibles lorsque le soulèvement global est inférieur à 50 mm et considère un soulèvement supérieur à 80 mm comme étant problématique.

Au Québec il est d'usage d'avoir recours aux critères de protection au gel de 1994. Cette approche empirique des dommages jugés acceptables, notamment utilisée par le MTMDET dans le logiciel CHAUSSÉE 2¹, est tiré d'une courbe élaborée au début des années 50 par *Transport Canada* pour une protection partielle qui correspond à la moitié de la profondeur de pénétration du gel (Figure 1.4). Une protection étant qualifiée de partielle lorsqu'elle indique une épaisseur de chaussée inférieure à la profondeur de pénétration de gel .



Le facteur obtenu grâce à la figure précédente est ensuite multiplié par un facteur fonction du type de route et un facteur fonction du type de sol. Nous pouvons alors en déduire un

1. Logiciel de dimensionnement des chaussées souples développé par le Ministère des Transports du Québec. (Saint-Laurent (2006))

pourcentage de protection typique qui est définie comme le rapport entre l'épaisseur de la chaussée et la profondeur de pénétration du gel. Quelques valeurs de pourcentage de protection sont données en fonction de l'indice de gel dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Pourcentage de protection en fonction de l'indice de gel

(FI) et pour deux types de structure routière

Tiré de Saint-Laurent (2006)

FI ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{jours}$)	Pourcentage de protection (%)	
	Route locale	Autoroute
800	60	80
1200	50	70
2000	40	60

1.3.4 Isolation de la chaussée

Les produits de base des couches thermiquement isolantes sont essentiellement le polystyrène expansé ou extrudé et l'argile expansée (Dysli (1991)). Ils sont conditionnés sous forme de plaques de quelques centimètres d'épaisseur et sont à considérer comme couche isolante uniquement, car leur faible résistance mécanique ne peut intervenir dans la résistance de la superstructure routière. Il existe des bétons isolants à base de particules de polystyrène qui peuvent constituer une couche isolante et portante, mais leur pouvoir isolant par centimètre d'épaisseur est 5 à 10 fois inférieur à celui des plaques de polystyrène. Les couches d'argile expansée quant à elles, interviennent dans la superstructure un peu comme une couche de gravier sans cohésion. Le Tableau 1.4 donne les principales caractéristiques de ces matériaux.

Le recours à une couche d'isolation dans la structure de chaussée est un moyen efficace de diminuer la profondeur de pénétration de gel et de faire les soulèvements différentiels à la surface. Les résultats publiés par Côté & Konrad (2002) sont représentés sur la Figure 1.5 qui donne l'évolution de la pénétration du front de gel dans la structure de chaussée en fonction du temps dans le cas non-isolé et isolé.

Tableau 1.4 Principales caractéristiques thermiques et mécaniques des matériaux isolants utilisés dans la construction routière
Tiré de Dysli (1991)

Isolant	masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$)	conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	teneur en eau dans le sol (%)	Résistance à la compression (kPa)
Plaque de polystyrène extrudé	40-50	0,03-0,04	0,3-5,0	200-700
Plaque de polystyrène expansé	30-40	0,03-0,05	1,0-10,0	150-400
Béton avec particules de polystyrène extrudé	600	0,14-0,30	1,0-5,0	2000-4000
Argile expansée	300-400	0,15-0,30	5-20	-

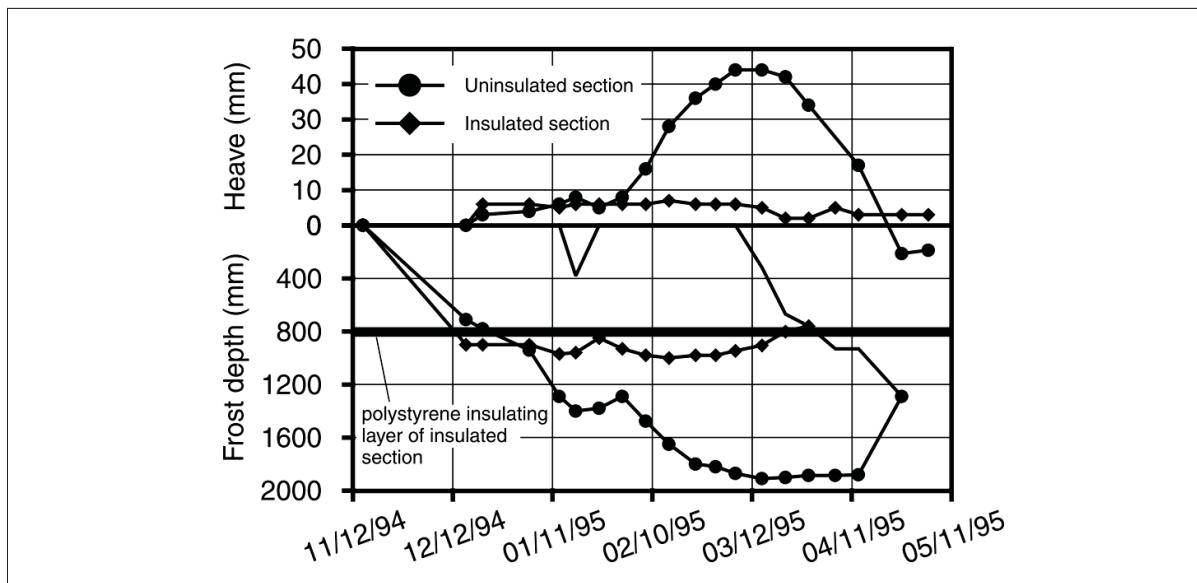


Figure 1.5 Effet induit par l'ajout d'une couche d'isolation sur la propagation du front de gel et le soulèvement
Tirée de Côté & Konrad (2002)

En revanche, la présence d'un isolant thermique dans le corps d'une chaussée modifie son régime thermique. En accomplissant sa fonction de protection au gel, l'isolant bloque le flux de chaleur géothermique s'écoulant vers la surface. Ceci entraîne un refroidissement de la partie

située au-dessus de l'isolant en période automnale et hivernale. Ce phénomène de refroidissement à la surface, aussi appelé glaçage différentiel, peut conduire à des conditions glissantes sur les sections de chaussées isolées alors que les sections de chaussée conventionnelles ont des surfaces sèches. En vue de contrer la formation de givre sur les chaussées avec isolants thermiques, le Ministère des Transports du Québec recommande une épaisseur minimale de 450 mm de gravier au-dessus de l'isolant. Cette couche agit comme tampon thermique permettant de compenser les pertes de chaleur par la surface de la chaussée. Côté & Konrad (2006) ont proposé une approche de conception rationnelle qui considère les conditions de climat de même que les propriétés des matériaux de la chaussée pour établir l'épaisseur minimale de la couche de protection granulaire requise pour réduire le risque de glaçage différentiel. La Figure 1.6 est le résultat de leur travail et donne les épaisseurs minimales h_{GP} de matériaux granulaires nécessaires afin de minimiser les risques de glaçage différentiel.

1.3.5 Formation des lentilles de glace

Le mode de formation et la répartition des lentilles de glace dans un sol sont des concepts relativement complexes. Dans un sol gélif, les lentilles de glaces se répartissent sous forme de plusieurs couches subhorizontales, d'épaisseur et d'expansion latérale limitées.

L'horizontalité des niveaux de glace s'explique par l'horizontalité de l'isotherme 0 °C et par l'homogénéité de la conduction thermique du sol. Des anomalies dans cette horizontalité des lentilles de glace sont souvent la conséquence d'hétérogénéités dans la conductivité thermique du sol. Elles se rencontrent, par exemple, dans les environs de gros grains plus conducteurs que la matrice fine (Dysli (1991)).

Il y a trois conditions essentielles pour qu'il y ait formation de lentilles de glace dans le sol d'infrastructure. Elles se présentent comme suit :

- température en dessous du point de congélation ;
- présence d'une source d'eau proche pour alimenter par capillarité la ligne de gel ;

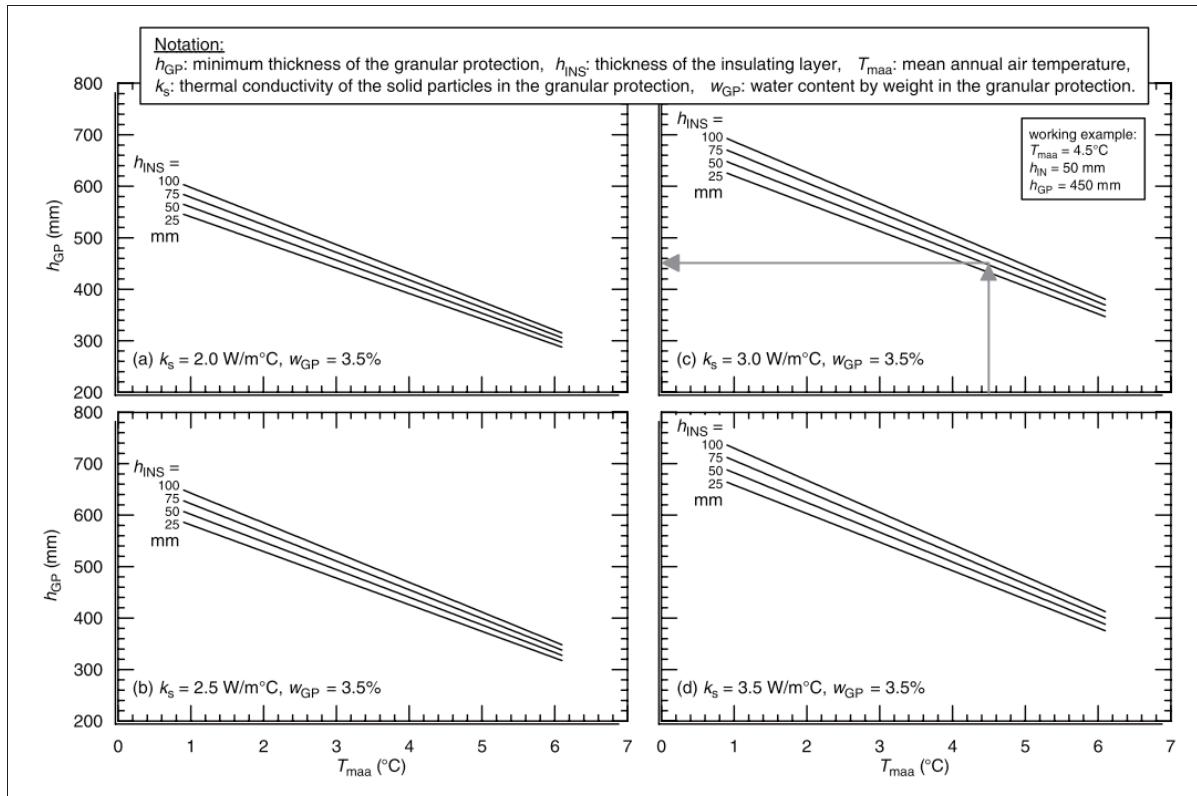


Figure 1.6 Abaque de l'épaisseur minimale h_{GP} de matériaux granulaire nécessaire pour minimiser les risques de glaçage différentiel à la surface des chaussées isolées dans la province de Québec

Tirée de Côté & Konrad (2006)

- présence d'un sol dont la granulométrie et la distribution des pores le rendre susceptible au gel (sol gélif).

La croissance des lentilles se fait par succion de l'eau sous-jacente. Le développement de lentilles de glace a pour effet de soulever de façon inégale la surface de la route.

1.3.6 Vitesse de gonflement et de dégonflement

Dans les sols gélifs, la vitesse de gonflement, soit la vitesse de formation et de croissance des lentilles de glace, est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont la granulométrie, la minéralogie du sol, sa masse volumique qui peut être caractérisée par son

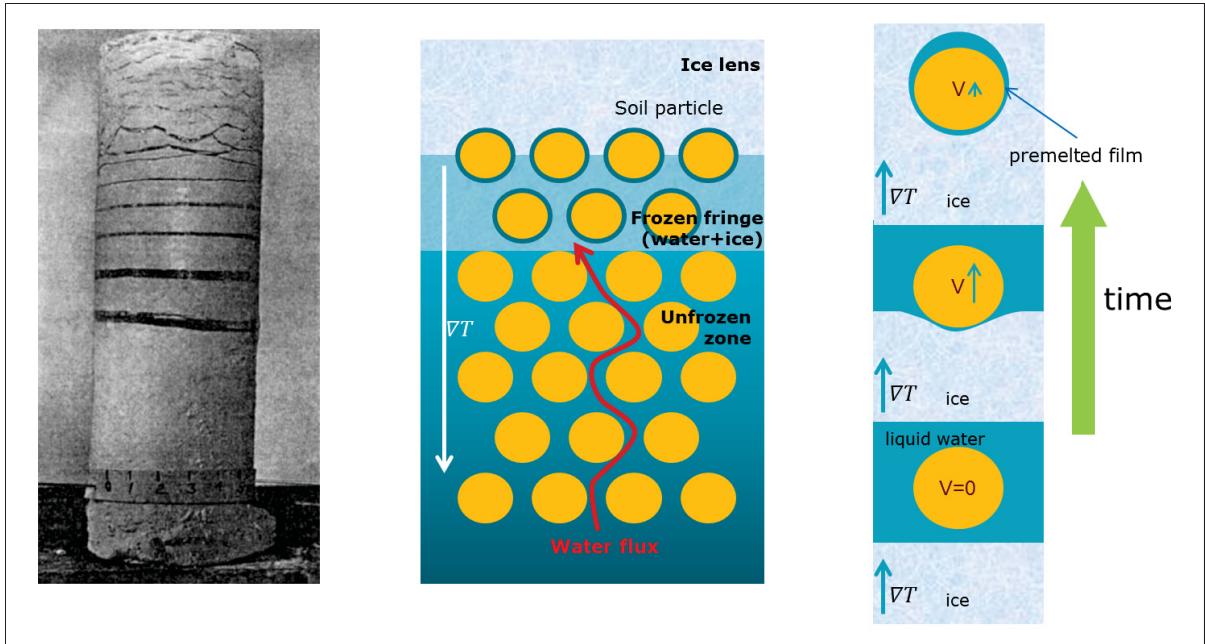


Figure 1.7 Formation des lentilles de glace dans les sols

À gauche une photo de lentilles de glace dans un échantillon de sol (Taber (1930)), au centre une représentation du flux thermique (∇T) et du flux hydrique (en rouge), à droite un schéma de la formation de glace autour d'une particule solide au cours du temps

indice de vides, sa teneur en eau et la vitesse de propagation du front de gel (Dysli (1991)). La vitesse de propagation du front de gel correspond de manière équivalente à la vitesse d'extrac-tion de la chaleur et a une influence déterminante sur le processus de formation des lentilles de glace et donc sur la vitesse de gonflement. Quelques exemples de mesure de l'effet de la vitesse de propagation du front de gel sur la vitesse de gonflement tirés des travaux de Jones en 1980 puis Dysli en 1988 sont donnés sur la Figure 1.8. Ces résultats montrent que la vitesse de gonflement des sols ne peut être fonction que de la vitesse de propagation du front de gel Dysli (2007).

L'allure générale de cette relation est donnée sur cette même figure par la courbe "tendance" en gris ; elle montre que la vitesse de gonflement croît tout d'abord avec la vitesse de propagation du front de gel, se stabilise, puis diminue jusqu'à devenir nulle. Cette vitesse limite où les lentilles de glace n'ont plus le temps de se former est dénommée vitesse critique. Au-delà de cette vitesse, seuls des cristaux de glace disséminés dans la matrice solide peuvent se former. La vitesse critique augmente

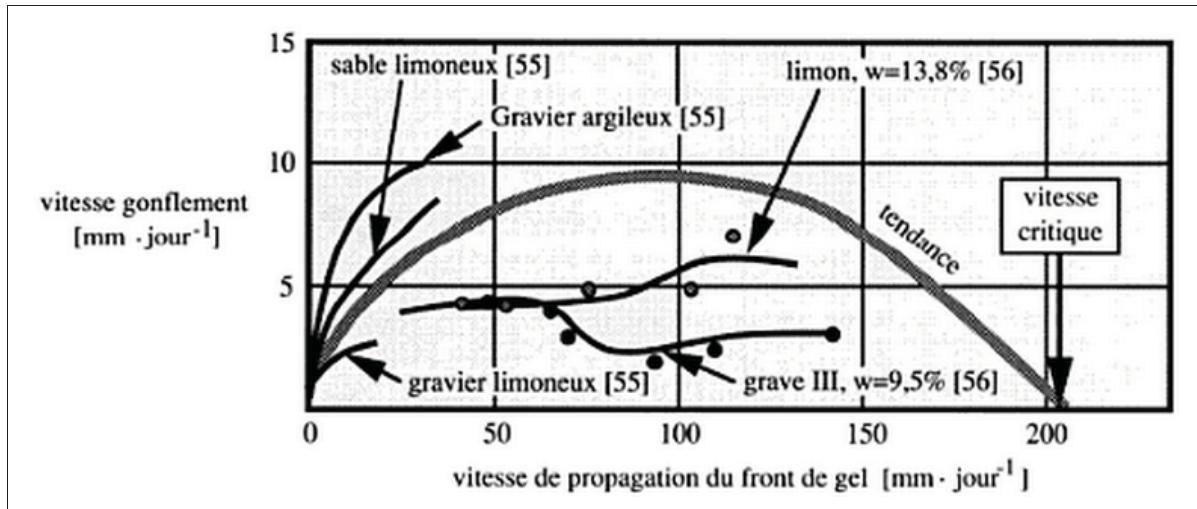


Figure 1.8 Vitesse de gonflement en fonction de la vitesse de propagation du front de gel
Tirée de Jones (1980) et Dysli (1988)

avec la proportion des particules fines du sol, soit lorsque la perméabilité du sol diminue (Dysli (1991), p115).

Lorsque le dégel printanier commence, les lentilles de glace fondent et les gonflements constatés à la surface de la chaussée diminuent. L'eau interstitielle excédentaire provenant de la fonte des lentilles, qui ne peut s'échapper rapidement par drainage, fait chuter la résistance au cisaillement du matériau gélif par diminution de la contrainte effective : une part plus ou moins importante de la contrainte totale due aux charges des essieux est reprise par la pression interstitielle. L'importance de cette perte de portance dépend :

- de l'importance du gonflement, soit de l'eau accumulée sous la fondation ;
- de la vitesse de dégel ;
- des charges appliquées sur la zone des lentilles de glace, soit de la charge des essieux et du pouvoir répartiteur de la chaussée ;
- de la vitesse de drainage de l'eau excédentaire ; ce facteur explique à lui seul la période plus ou moins longue où la portance est réduite par rapport à sa valeur estivale.

La vitesse du dégel est probablement le facteur le plus important comme l'ont montré les essais entrepris par le laboratoire de mécanique des sols de l'École Polytechnique Fédérale de

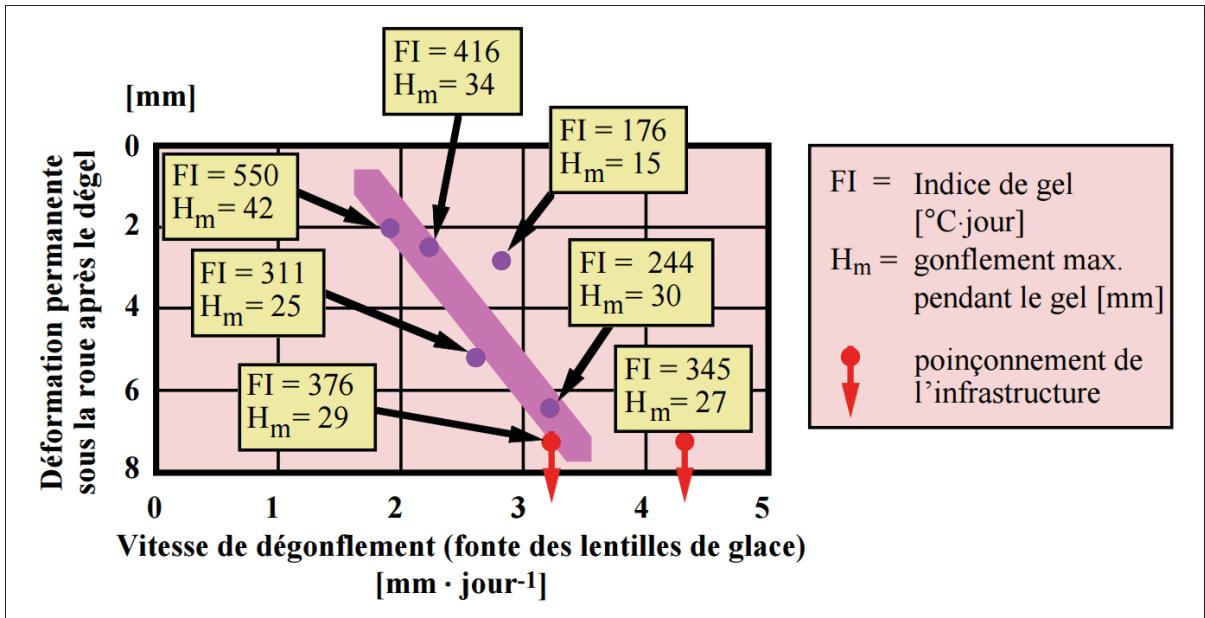


Figure 1.9 Influence de la vitesse du dégel sur la portance d'une superstructure routière
Tirée de Dysli & Pfister (1980)

Lausanne (Dysli & Pfister (1980) puis Dysli *et al.* (1982)). La Figure 1.9 est une synthèse des résultats de ces essais en ce qui concerne l'effet de cette vitesse ; elle donne une relation entre la vitesse de dégonflement de la surface de la route, qui est étroitement liée aux vitesses de fonte des lentilles de glace et d'élimination de leur eau de fonte, et la déformation permanente de la surface de la route après le dégel, déformation qui est un moyen de quantification de la diminution de la portance. Une quantification précise de la diminution de la portance au dégel n'est cependant pas possible, car les interdépendances entre ces différents facteurs sont trop complexes. La diminution de la portance par fonte des lentilles de glace peut conduire à la destruction complète de la chaussée.

1.4 Transferts thermiques : quelques éléments fondamentaux

Le gel et sa pénétration dans les sols dépendent du climat et sont ainsi propres aux régions tempérées à froides de notre globe. La température de l'air n'est cependant pas (et de loin) le

seul facteur qui intervient dans les phénomènes liés au gel (Dysli (1991)). Les facteurs qu'il faut également considérés sont :

- la couverture neigeuse ;
- les radiations solaires ;
- et le type de sol.

1.4.1 Modes de transferts thermiques

La surface d'une chaussée se situe à l'interface entre deux milieux ; l'atmosphère et la structure de chaussée (Dysli (1991)). Il existe trois modes de transfert d'énergie thermique qui peuvent avoir lieu entre ces deux milieux, mais aussi au sein d'un même milieu : le rayonnement, la conduction et la convection (Figure 1.10). Il est important de bien comprendre chacun de ces phénomènes afin de mieux cerner la problématique présentée dans ce mémoire.

1.4.1.1 Rayonnement

Le rayonnement correspond à un transfert de chaleur par propagation d'ondes électromagnétiques.

En effet, ce mode de transfert d'énergie peut se produire dans le vide. À la propagation de l'onde est associé un transport d'énergie auquel nous sommes bien sensibles. Actuellement, le soleil rayonne majoritairement dans le visible et plus particulièrement dans le jaune. Le rayonnement peut avoir des applications plus proches de nous : un feu dans un foyer conduit à l'obtention de braises incandescentes. Le rayonnement qu'elles émettent est composé d'une partie lumineuse à dominante rouge, mais aussi d'une grande partie d'infrarouges qui sont responsables de notre sensation de chaleur. L'atmosphère terrestre diffuse réfléchit et absorbe le rayonnement solaire (Perrot (2011)).

- la diffusion est due aux particules très fines contenues dans l'atmosphère qui dévient le rayonnement dans toutes les directions. La diffusion diminue avec l'augmentation de la longueur d'onde et c'est pour cette raison que le ciel nous paraît bleu, car la lumière bleue est à la limite du domaine visible ;
- la réflexion d'une partie du rayonnement se produit lorsqu'il atteint la surface d'un corps solide, liquide ou gazeux comme l'atmosphère ;
- une autre partie pénètre dans le corps. C'est l'absorption.

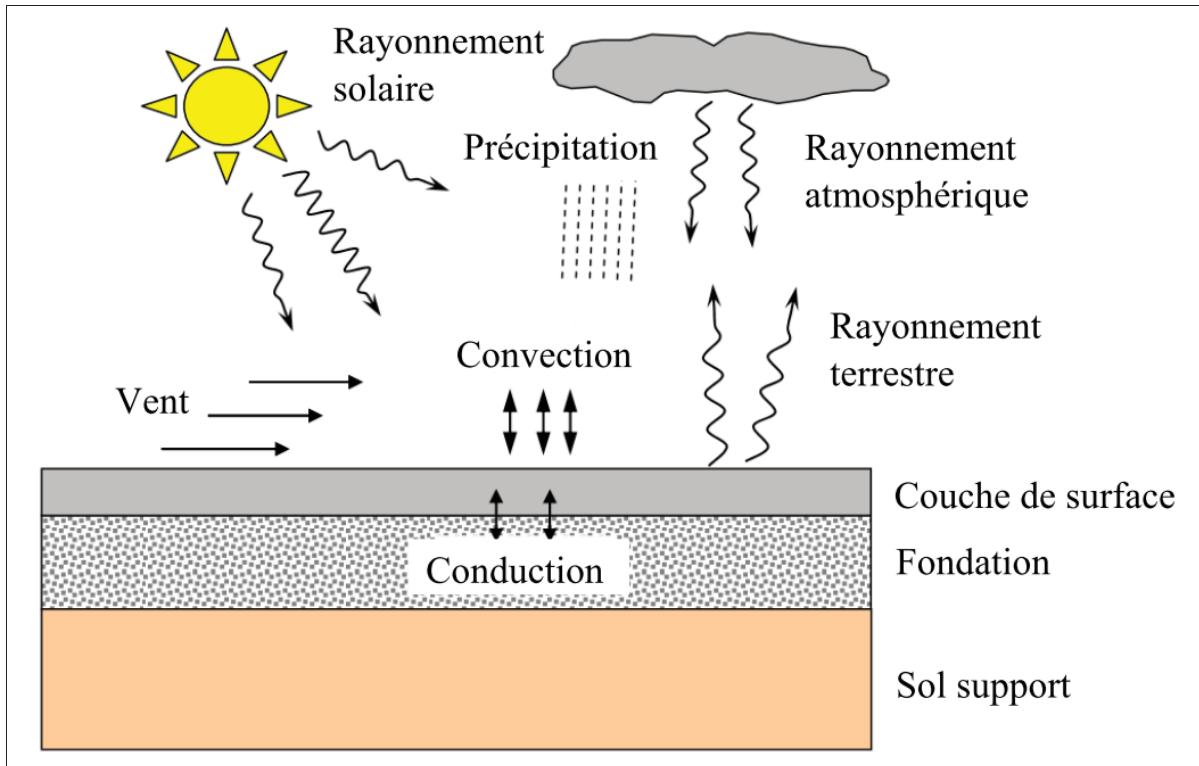


Figure 1.10 Schéma des échanges thermiques ayant lieu entre une structure de chaussée et l'atmosphère

Ces phénomènes ainsi que d'autres phénomènes beaucoup plus complexes expliquent par exemple l'effet de serre, la différence de température entre un objet placé à l'ombre et un autre au soleil ainsi que l'exemple de la diminution du rayonnement terrestre (en d'autres termes la chaleur perdue par la Terre). Le rayonnement est en effet un phénomène connu et mesuré depuis très longtemps (1887-Joseph Vallot). Il est cependant souvent négligé alors que son action sur le gel des sols est considérable surtout en période nocturne (Mammeri *et al.* (2015)).

1.4.1.2 Conduction

Dans le cas de la conduction, la chaleur se propage de proche en proche dans le matériaux ou passe d'un corps à un autre par contact direct. Les molécules du secteur le plus chaud vont venir heurter les molécules voisines et ainsi transmettre leur énergie de vibration aux molécules voisines. La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, ce que nous définirons

comme la conductivité thermique (section 1.4.2), dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur.

1.4.1.3 Convection

La convection est un mode de transfert thermique correspondant à un transfert de chaleur lié au mouvement d'un fluide. La plupart du temps, le champ de pesanteur jouera un rôle important dans les mouvements se produisant au sein du fluide. Dans le cas d'une plaque chauffante se trouvant en dessous de l'air (le fluide), l'air chaud proche de la plaque va monter en altitude de par sa faible densité par rapport à l'air ambiant de plus faible température, donc plus dense).

1.4.2 Propriétés thermiques

D'un point de vue thermique, un matériau est caractérisé par sa conductivité, sa capacité thermique et sa diffusivité thermique.

1.4.2.1 Conductivité thermique

La conductivité thermique λ est la vitesse d'écoulement de la chaleur, au travers d'un corps, sous un gradient thermique unitaire (Figure 1.11). Elle est tirée directement de la loi de Fourier (relation 1.1).

$$\lambda = \frac{q}{\overrightarrow{\text{grad}T}} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (1.1)$$

avec q le flux de chaleur $[W \cdot m^{-2}]$, T la température $[K]$, et $\overrightarrow{\text{grad}T} = \Delta T/e = (T_1 - T_2)/e$ $[K \cdot m^{-1}]$.

On parle ici de "conductivité", car le transfert de chaleur s'effectue principalement au moyen de la conduction. Toutefois, les autres moyens de transfert que nous avons présenté dans la section 1.4.1, peuvent contribuer à la mesure de la conductivité thermique (Farouki (1981)). Une mesure de conductivité correspond donc à la moyenne des conductivités locales se trouvant le long de la section considérée. Autrement dit, il s'agit plus d'une conductivité thermique effec-

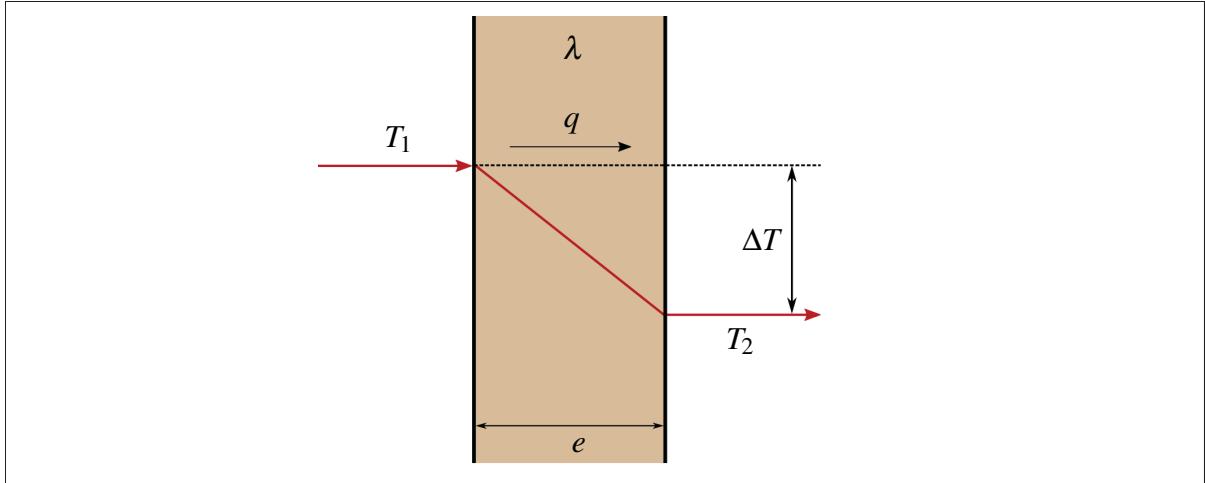


Figure 1.11 Définition de la conductivité thermique

tive dont la valeur varie dépendamment de la variation de la température et de la composition du sol dans la section.

La température est également un paramètre important qui a une influence sur la conductivité thermique d'un sol. A une teneur en glace donnée, la conductivité thermique d'un sol gelé peut varier en fonction de la distribution de la glace dans le sol (Czeratzki & Frese (1958)).

1.4.2.2 Capacité thermique

La capacité thermique massique c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] ou volumique C [$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$] ($C = c \cdot \rho$) est la quantité d'énergie nécessaire à fournir à un corps pour éléver 1 kg (respectivement 1 m^3) de ce corps de 1 K. Cette propriété nous renseigne sur la capacité d'un corps à absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique impliquant une variation de température. Plus la capacité thermique d'un corps est grande, plus grande sera la quantité d'énergie échangée au cours d'une transformation s'accompagnant d'une variation de la température de ce corps.

On désigne souvent la capacité thermique du sol non gelé par C_u et celle d'un sol gelé par C_f . Connaissant la capacité thermique massique du sol sec c_s et de l'eau c_s ainsi que la teneur en

eau (non gelée dans ce cas) w , il est possible d'évaluer la capacité thermique volumique du mélange non gelée par la simple relation (1.2) (Dysli (1991)) :

$$C_u = c_s \cdot \rho_d + \frac{w}{100} \cdot c_w \cdot \rho_d \quad [J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}] \quad (1.2)$$

En présence d'un sol gelé de capacité thermique C_f , il faut prendre en compte la part de glace présente. Connaissant la capacité thermique massique de la glace c_i et le pourcentage massique d'eau gelée w_f dans le sol, la relation (1.2) devient :

$$C_f = c_s \cdot \rho_d + \frac{w - w_f}{100} \cdot c_w \cdot \rho_d + \frac{w_f}{100} \cdot c_i \cdot \rho_d \quad [J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}] \quad (1.3)$$

1.4.2.3 Diffusivité thermique

Sous sa forme la plus générale, l'équation de la chaleur introduite initialement en 1811 par Jean Baptiste Joseph Fourier s'écrit :

$$\lambda \nabla \cdot (\nabla T) + \nabla \lambda \cdot \nabla T + P = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.4)$$

avec :

∇ = opérateur nabla,

λ = conductivité thermique (W/(m.K)),

T = champ de température (K ou °C),

ρ = masse volumique du milieu ,

P = flux de chaleur crée par unité de volume,

c = capacité thermique massique c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

Si on considère λ constante et qu'il n'y a pas de source de chaleur interne nous obtenons la forme commune de l'équation de la chaleur donnée par la relation 1.5.

$$\nabla^2 T = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.5)$$

La diffusivité thermique α [$m^2 \cdot s^{-1}$] est souvent associée à l'inertie thermique du matériau. Elle donne une mesure du rapport entre la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur (conductivité thermique λ) et sa capacité à accumuler la chaleur (capacité thermique C).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{\lambda}{C} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1.6)$$

La diffusivité varie en fonction de la température et comme elle intervient directement dans l'équation de la chaleur (équation (1.5)), cette dépendance est intéressante à examiner. Plus la valeur d' α est grande et plus la vitesse de transmission de la chaleur est rapide. Inversement, plus elle est faible et plus la vitesse de transmission est lente. Des matériaux avec une faible diffusivité thermique sont par exemple bons dans le domaine du stockage d'énergie thermique.

1.4.3 Transfert de chaleur dans les milieux poreux

Les facteurs pouvant influencer les propriétés thermiques d'un sol sont nombreux. Une liste non exhaustive de ces différents paramètres est proposée ci-après (Farouki (1981)) :

- porosité ;
- arrangement structural ;
- taille des grains et des pores ;
- contact entre grains ;
- effets volumétriques ;
- mouvement d'eau ;
- interaction sol/eau ;
- état de l'eau ;

- teneur en eau ;
- température ;
- présence d'ions, sels et autres solutés ;
- nature des matériaux.

Parmi eux, les paramètres qui furent à l'étude dans ce projet sont présentés avec un peu plus de détails dans cette section.

1.4.3.1 Effets de la porosité et de la composition minéralogique du milieu

Les sols consistent en un ensemble de particules solides entourées de vides. Les particules solides sont des grains de différents minéraux alors que les vides peuvent être remplis d'eau, d'air ou d'eau en proportions variables. La "structure physique" du sol est un paramètre important, car l'arrangement des particules solides a un impact sur la direction de propagation du flux de chaleur. En effet, le nombre et la nature des contacts entre particules forment un ensemble de facteurs ayant une influence sur la conductivité thermique effective du sol. Cela s'explique par le fait qu'une grande partie du flux de chaleur se propage via ces contacts, en particulier dans le cas de sols secs ou partiellement secs (Farouki (1981)). Un sol possède également une certaine distribution de la taille et de la forme de ses particules solides qui détermine sa densité, porosité et distribution des vides. Ces propriétés vont à leur tour affecter la propagation du flux de chaleur. La conductivité thermique a ainsi tendance à augmenter à mesure qu'augmente la densité du sol (Horai & Simmons (1969)).

De même, la composition chimique des particules solides joue un rôle significatif dans le comportement thermique du sol. Chaque matériau constituant un sol possède des propriétés thermiques différentes ; les plus importants étant donnés dans le Tableau 1.5. Le quartz a la plus grande conductivité thermique tandis que l'air est le milieu le moins conducteur : avec un rapport proche de 350 :1 entre les deux. La proportion volumétrique de chacun des éléments a donc un impact sur la conductivité thermique effective du sol (Farouki (1981)).

Tableau 1.5 Propriétés thermiques de certains constituants des sols
 (données à 20°C et 1 atm)
 Tiré de Van Wijk (1963)

Matériaux	ρ g/cm ³	c J/(kg · K)	λ W/(m · K)
Quartz	2.65	733	8.4
Minéraux*	2.65	733	2.9
Matière organique	1.3	1926	0.25
Eau	1.00	4185	0.6
Air	0.0012	1005	0.026
Verre	2.2	800	1.05
Calcaire	2.7	850	1.4

* : valeurs moyennes des minéraux présents dans les sols

1.4.3.2 Effet de l'eau

L'eau a un effet complexe mais important sur les transferts de chaleur au sein du sol dans lequel il se trouve. C'est le constituant qui dépend le plus de la température (Winterkorn *et al.* (1946)) et il peut se trouver sous ses trois formes : liquide, solide et/ou gazeuse.

L'importance de l'eau sur les propriétés thermiques des sols est à l'étude depuis plusieurs années ; à commencer par les travaux de Patten (1909), Bouyoucos (1915) et Beskow (1947). L'influence de l'eau se manifeste surtout lorsque le sol subit un gradient thermique. En plus de la géothermie issue de l'énergie de la Terre, les sols se trouvant à la surface, notamment les chaussées, sont soumis à des variations continues de température dues aux cycles diurnes et saisonniers. Ces cycles peuvent provoquer des migrations d'eau ou des changements de phases qui compliquent l'étude des transferts thermiques et altèrent la conductivité thermique effective du sol.

La Figure 1.13 illustre le phénomène de transfert thermique dans un milieu poreux en fonction de sa teneur en eau.

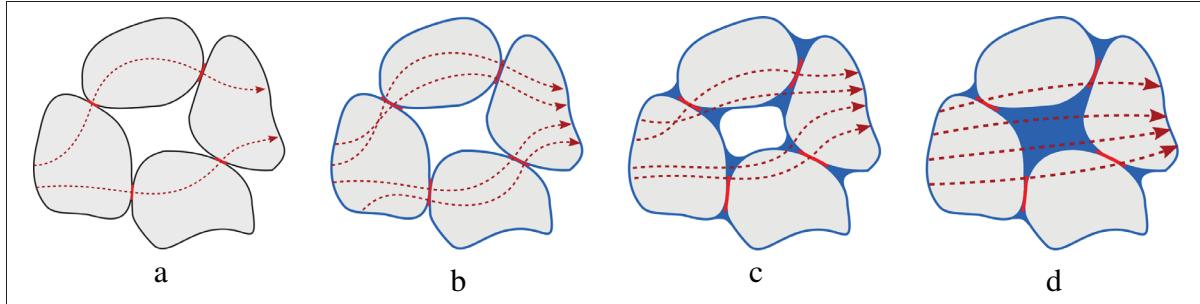


Figure 1.12 Illustration schématique des transferts thermiques dans un milieu poreux. En l'absence d'eau, les contacts entre grains sont étroits (**contact rouge**) et le trajet d'un bord à l'autre de la section est plus long (**a**). À mesure que la teneur en eau augmente, les contacts s'élargissent, entraînant une augmentation de la conductivité thermique (**b, c, d**)

Tirée de Kurt (2012)

Pour des faibles teneurs en eau, l'eau est retenue avec une extrême ténacité à la surface des particules solides. Lorsque tous les granulats sont imprégnés de cette fine couche d'eau (Figure 1.12b), l'eau va alors prendre place au contact entre granulats et ainsi créer des sortes de ponts entre ces derniers ; favorisant le transfert de chaleur. Une augmentation de la teneur en eau se traduit alors par une diminution de la force de tension qui s'exerce entre les particules solides et l'eau. L'eau circule donc plus librement et peut notamment prendre place dans les pores non saturés (Figure 1.12d). Ces différents comportements s'expriment en terme de tension de succion et dépendent bien évidemment de la nature du sol (Farouki (1981)). Dans les sables par exemple la conductivité thermique augmente rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau et c'est de manière plus générale, ce qui est observé pour la majorité des sols comme l'indique la Figure 1.13.

Al Nakshabandi & Kohnke (1965) montrent que l'eau a un plus gros impact sur la conductivité thermique effective d'un sol que ne l'ont la densité ou la granulométrie. La relation qui existe entre la teneur en eau et la conductivité thermique a été étudiée en détail par Kersten (1949) au moyen d'essais expérimentaux. Son étude empirique a permis d'établir des équations donnant la conductivité thermique en fonction du logarithme de la teneur en eau et de la densité sèche. D'autres équations empiriques existent. Citons comme exemple les travaux de Van & Winter-

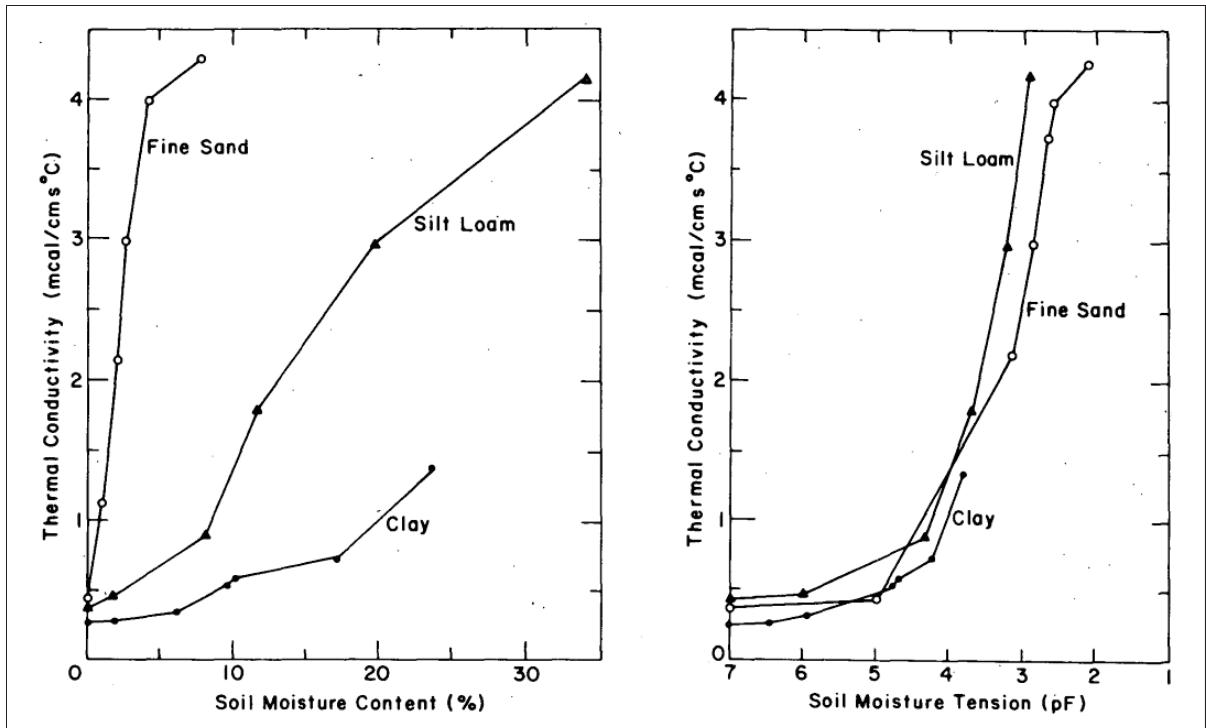


Figure 1.13 Conductivité thermique de trois sols en fonction de la teneur en eau (graphique de gauche) et de la tension de succion (graphique de droite)
Tirée de Al Nakshabandi & Kohnke (1965)

korn (1959) dont l'équation donne la conductivité thermique comme une fonction du degré de saturation.

1.5 Mesure des propriétés thermiques

Dans cette section, nous donnons un aperçu des différentes techniques et méthodes existantes dédiées à la mesure des propriétés thermiques des sols. Les propriétés thermiques qui vont nous intéresser sont la conductivité thermique (λ) et la diffusivité thermique (α), ces grandeurs étant liées à la capacité thermique volumique au travers de l'équation (1.6). Ce panorama ne sera pas exhaustif, car le nombre de méthodes existante et documentée dans la littérature est trop important. Les méthodes les plus courantes seront d'abords présentés succinctement puis nous verrons ensuite les critères qui ont permis de choisir les méthodes pour la mesure de λ et de α . Ces méthodes seront présentées plus en détail dans le second chapitre.

Quelle que soit la méthode considérée, le point de départ sera toujours l'équation de la chaleur (relation (1.4)). De là, un modèle souvent idéal sera considéré, à savoir : une géométrie, des conditions aux limites, des conditions initiales et des hypothèses de travail. Une résolution de cette équation donne la répartition de la température et l'évolution temporelle dans le cas instationnaire. Les nombreuses méthodes qui découlent de cette approche générale peuvent être classées selon quatre critères regroupés dans le Tableau 1.6. Néanmoins, le critère sur lequel l'accent sera mis est celui du régime thermique. Ce critère englobe deux grandes familles de méthodes : les méthodes en régime permanent ou stationnaire et celles en régime quasi-établi (Degiovanni (1994)).

Tableau 1.6 Critères permettant de distinguer les classes de méthodes dédiées à la caractérisation thermique
Tiré de Gauthier (2012))

Géométrie	Régime thermique	Nombre de points de mesure	Type de mesure
demi-espace	permanent	1 point	absolue
cylindre	quasi-établie	2 points	différentielle
sphère		n points	

1.5.1 Méthodes en régime permanent

Les méthodes en régime permanent se basent sur un modèle unidirectionnel et stationnaire. L'échantillon de sol est considéré comme étant dans une situation d'équilibre. On mesure le flux de chaleur ainsi que la différence de température dans l'échantillon ce qui permet de calculer la résistance thermique du sol.

1.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée

La méthode de la plaque chaude gardée (GHP : guarded hot plate) est la méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la conductivité thermique des matériaux isolants. Cette méthode

fait l'objet d'un standard (ASTM C177) établi depuis 1963 par l'ASTM (American Society for Testing and Materials). Son schéma de principe est représenté sur la Figure 1.14.

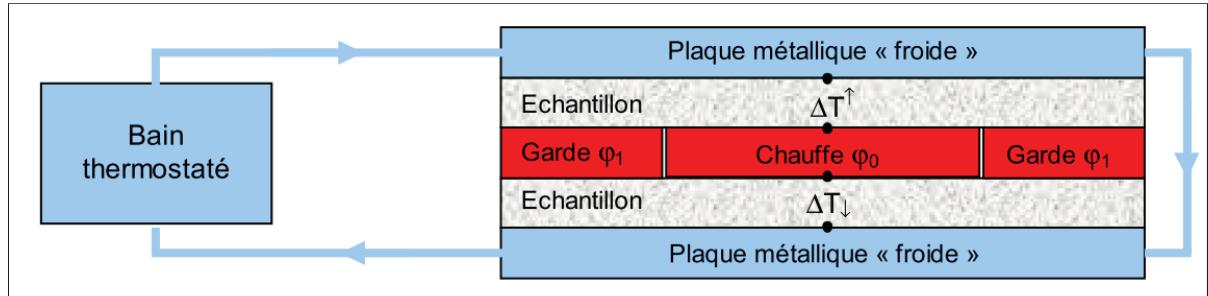


Figure 1.14 Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gradée
Tirée de Jannot (2011)

Les plaques métalliques extérieures en matériau très conducteur sont maintenues à température constante par le biais du bain thermostaté. Au centre, pris entre deux échantillons identiques d'épaisseur Δx du matériau dont on désire obtenir la conductivité thermique, se trouve une plaque chauffante de surface S qui délivre une puissance de chauffe ϕ_0 . Afin d'assurer un transfert unidirectionnel dans la zone centrale, la plaque chauffante est entourée par un anneau de garde auquel on fournit un flux ϕ_1 supérieur au flux ϕ_0 pour compenser les pertes latérales convectives. L'anneau et la plaque chauffante sont séparés par une fine couche d'air. La température est mesurée sur chaque surface des échantillons, soit 4 points de mesure, permettant ainsi d'obtenir les écarts de température ΔT_\downarrow et ΔT_\uparrow . La conductivité thermique est alors donnée par la relation 1.7 :

$$\lambda = \frac{\phi_0}{S} \frac{\Delta x}{\Delta T_\downarrow + \Delta T_\uparrow} \quad (1.7)$$

Pour un même matériau, des écarts allant jusqu'à 20% ont été observés entre différents travaux de recherche ayant eu recours à cette méthode (Jackson (1976)), mais de manière générale la méthode GHP est considérée comme étant relativement précise (Farouki (1981)). En effet, l'étude de Mitchell *et al.* (2010) a montré que les conductivités thermiques de matériaux iso-

lants mesurées avec cette méthode peuvent être données avec une incertitude relative inférieure à 3,5%.

En revanche, cette méthode est chronophage, car elle requiert que l'équilibre soit établi et qu'un grand écart de température soit appliqué. Un autre inconvénient de la méthode GHP résulte de l'influence de la gravité sur les flux thermiques. En effet, Woodside et Cliffe (1959) ont mené des essais sur du sable d'Ottawa et montré que la conductivité thermique était plus élevée dans le cas du flux thermique vertical dirigé vers le haut ΔT_\uparrow que celui dirigé vers le bas ΔT_\downarrow . Cette différence est d'autant plus importante que le gradient de température dans l'échantillon est grand.

1.5.1.2 Méthode à flux radial

La méthode à flux radial est une sorte de version cylindrique du GHP. La Figure 1.15 illustre le dispositif. Une source de chaleur est disposée au centre d'un spécimen cylindrique, dissipant un flux de chaleur radial à travers le matériau. Une gaine chauffante entoure l'échantillon permettant d'effectuer des mesures de conductivité thermique en fonction de la température. Des thermocouples sont placés le long de l'échantillon et sur ses faces internes et externes afin de mesurer le gradient de température d'une part et pour s'assurer que la température est constante le long de l'axe central d'autre part.

La conductivité thermique s'exprime en fonction du flux thermique imposé ϕ , des températures de surfaces (T_1 , T_2) et des paramètres géométriques R_1 et R_2 ; respectivement le rayon interne et externe de l'échantillon :

$$\lambda = \frac{\phi}{2\pi L(T_1 - T_2)} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (1.8)$$

Plusieurs types d'échantillons peuvent être caractérisés grâce à ce type d'instrument (Gauthier (2012)). Initialement les liquides et les gaz ont été étudiés, mais également des échantillons sous forme de fibre ou de particule. L'intérêt majeur de ce dispositif réside dans la caractérisation des matériaux utilisés pour l'isolation des conduites et tuyaux.

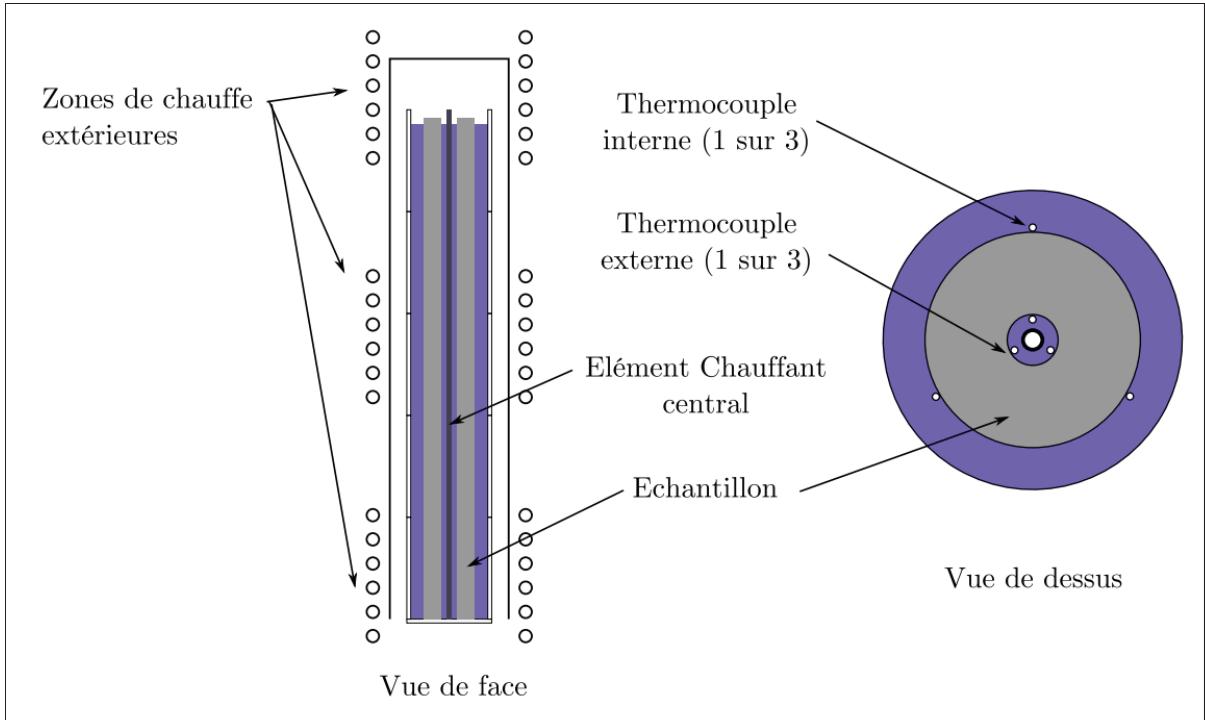


Figure 1.15 Schéma de principe de la méthode à flux radial
Tirée de Speyer (1994)

Le principal inconvénient rencontré lorsqu'on utilise cette méthode est comme pour la plupart des méthodes en régime permanent le temps d'attente relativement long avant d'atteindre un état d'équilibre. Ce temps peut se compter en heures voir en jours dans le cas de matériaux très isolants ou pour des échantillons d'épaisseur importante.

1.5.2 Méthodes en régime quasi-établi

Les méthodes en régime quasi-établi sont dépendantes du temps. Contrairement aux méthodes en régime permanent, les méthodes en régime quasi-établi permettent de mesurer les propriétés dynamiques, à savoir diffusivité thermique et conductivité thermique.

Comme nous le verrons dans la section 1.5.3, les méthodes en régime quasi-établi présentent des avantages par rapport aux autres méthodes qui facilitent le travail en laboratoire et la réalisation des essais. En principe, le système est à l'équilibre thermique au début de l'essai puis

on vient appliquer une perturbation thermique par le biais d'un flux de chaleur constant. Une équation caractéristique (issu de l'équation de la chaleur) décrit les variations de température en fonction du temps pour le système évoluant vers un nouvel état d'équilibre. Les caractéristiques thermiques sont alors déduites de l'évolution au cours du temps de la température.

1.5.2.1 Méthode de contact : la sonde thermique

La méthode de la sonde thermique fait aujourd'hui partie des méthodes incontournables pour la caractérisation thermo-physique des matériaux. C'est une méthode rapide et pratique pour la mesure en laboratoire et *in situ* de la conductivité thermique des sols. D'après De Vries et Peck (1958) cette méthode a été suggérée en premier par Schleiermacher en 1888 puis par Stalhane et Pyk en 1931. Cette méthode fait également l'objet d'un standard établi par l'ASTM depuis 2000 (ASTM International (2014)).

La méthode de la sonde thermique est basée sur le concept de la source linéique infinie énoncé par Lord Kelvin en 1882 (Ingersoll *et al.* (1945)). Ingersoll *et al.* (1945) ainsi que Carslaw & Jaeger (1986) utilisèrent ce principe pour prédire la température autour d'une source linéique infinie (Figure 1.16).

Le principe de cette méthode consiste donc à créer une perturbation thermique linéique dans le milieu et de mesurer la variation de température en fonction du temps. L'essai comprend deux phases qui servent à la détermination de la conductivité thermique. La première est une phase de chauffage qui est suivie d'une phase de repos durant laquelle la sonde cesse d'être excitée. La conductivité thermique λ est fonction du flux thermique q imposé le long de la sonde ainsi que de la variation de température dT en fonction du logarithme du temps $\ln t$ (relation 1.9) (De Vries & Peck (1958)).

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \left(\frac{dT}{d \ln t} \right)^{-1} \quad (1.9)$$

Les premières applications de cette méthode furent menées par Van der Held et Van Drunen en 1949 pour la mesure de la conductivité thermique de liquides, puis par Hooper et Lepper en

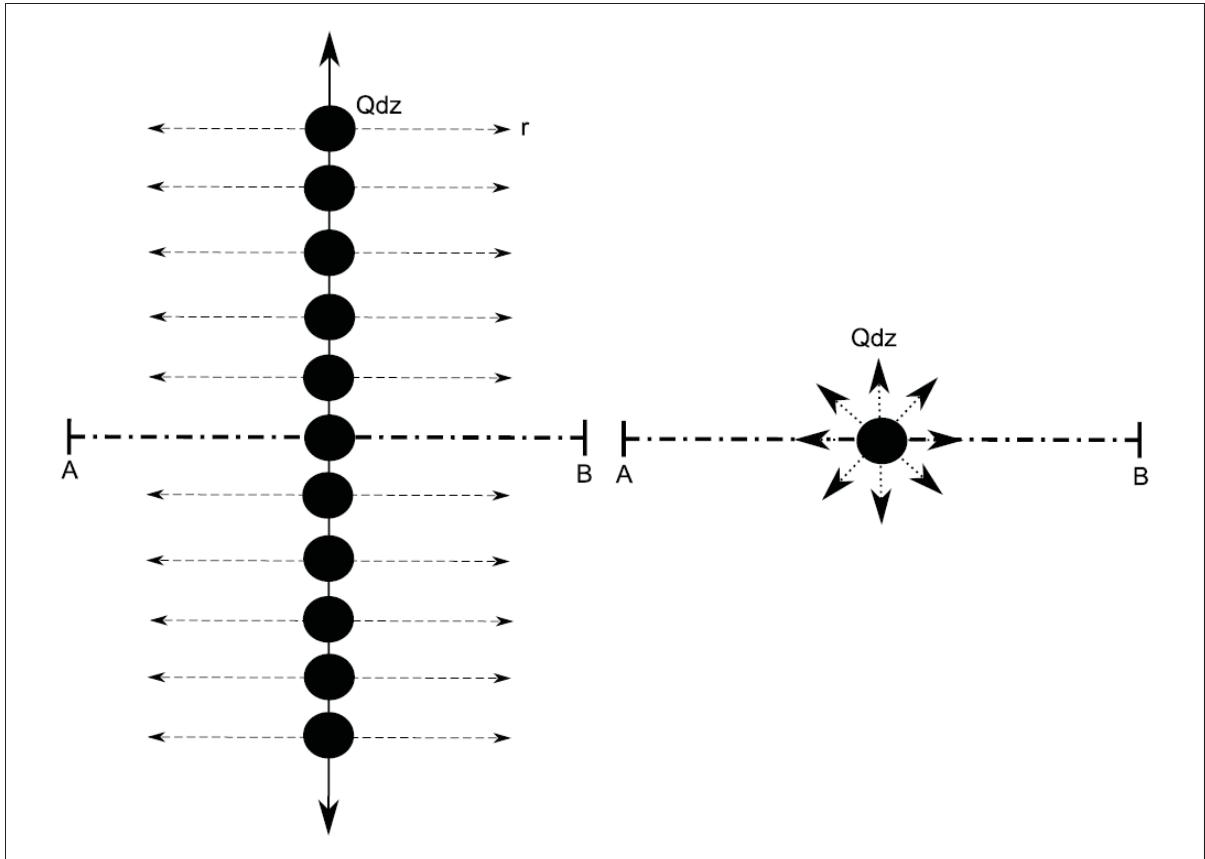


Figure 1.16 Géométrie du modèle ligne source infinie
Tirée de Giordanengo (2010))

1950 pour la mesure dans les sols. Ces derniers ont obtenu des résultats très satisfaisants sur des sols non saturés et ont également montré qu'il n'y a pas de modification significative de la distribution en eau de l'échantillon (confirmé par la suite par De Vries en 1952). Depuis ce temps, plusieurs travaux ont eu recours à cette méthode pour mesurer la conductivité thermique dans des sols (Mason et Kurtz 1952, Lachenbruch 1957, Van Rooyen et Winterkron 1959, Woodside et Messmer 1961, Penner 1970, McGaw 1974).

1.5.2.2 Mesure de la diffusivité thermique

La méthode qui suit est fondamentalement basée sur la solution de l'équation de la chaleur dans le cas d'un flux de chaleur transitoire et unidirectionnel (relation 1.10).

Dans l'hypothèse d'un flux de chaleur transitoire et unidirectionnel, l'équation de Fourier (relation 1.5) s'écrit alors :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(\rho c)}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.10)$$

sachant que λ est la conductivité thermique du milieu, ρ sa masse volumique, c sa capacité thermique, α sa diffusivité thermique et z la direction de propagation du flux de chaleur.

Après discrétisation du domaine d'étude, la relation 1.10 devient (Mrawira & Luca (2002)) :

$$\lambda \left(\frac{T_{m-1}^p - T_m^p}{\Delta z} \right) - \lambda \left(\frac{T_m^p - T_{m+1}^p}{\Delta z} \right) = \rho c \left(\frac{T_m^{p+1} - T_{m+1}^p}{\Delta t} \right) \quad (1.11)$$

avec Δz et m respectivement l'incrément et un nœud spatial, Δt et p respectivement l'incrément temporel et un instant.

La diffusivité thermique est alors donnée par la relation suivante :

$$\alpha = \left(\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{T_{m+1}^p + T_{m-1}^p - 2T_m^p} \right) \times \frac{(\Delta z)^2}{\Delta t} \quad (1.12)$$

L'hypothèse du flux de chaleur unidirectionnel peut être relativement bien établie en laboratoire grâce à des montages simples. Ces montages, reposant principalement sur une bonne isolation dans les deux autres directions, nécessitent l'application d'un gradient de température suffisamment grand le long de l'échantillon. Il existe par exemple des dérivées de ce ayant recours à des plaques chauffantes minces (avec un ratio épaisseur/largeur supérieur à 5) comme présenté par Tan *et al.* (1992) ou dans des situations où les conditions de milieu semi-infini peuvent être supposées, comme l'ont indiqué les travaux de Kavianipour & Beck (1977) ou de Dempsey & Thompson (1970a).

1.5.3 Choix des méthodes de mesures

Les méthodes en régime permanent peuvent être difficiles à mettre en place, car pour que la mesure de la conductivité thermique soit précise, il faut minimiser les pertes thermiques vers l'extérieur du spécimen. De plus, ces méthodes nécessitent que l'équilibre soit établi et qu'un grand gradient thermique soit imposé au système. De ce fait, des migrations d'eau peuvent avoir lieu dans des échantillons non saturés en cours d'essai (Paxton & Hutcheon (1952)). Les valeurs de conductivité alors obtenues seront plus faibles que les valeurs correspondant à une teneur en eau moyenne (De Vries (1963)). Ces méthodes sont tout de même les plus précises parmi les méthodes existantes.

Les méthodes en régime quasi-établi sont quant à elles considérées comme étant moins précises que les précédentes (Gauthier (2012)). Les écarts sont néanmoins faibles et ne concernent généralement que les matériaux très isolants. En revanche, Nagasaka & Nagashima (1981) ainsi que Xie & Cheng (2001) ont montré que la méthode de la sonde thermique permet de réduire les erreurs dues aux mouvements convectifs de fluide pouvant avoir lieu autour de la source de chaleur. De ce point de vue, la méthode de la sonde thermique est plus fiable que les méthodes en régime permanent tel que le GHP.

Le choix d'une méthode de mesures des propriétés thermiques dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau/précision est posé, d'autres paramètres peuvent aider à cibler la bonne méthode :

- le type de milieu : milieu granulaire, milieu semi-infini, matériaux isolants ;
- le type de régime thermique : permanent, transitoire ou quasi-établi ;
- la géométrie du milieu : 2D, 3D, axisymétrique ;
- les dimensions et les rapports de dimensions ;
- la simplicité de la méthode ;
- les tolérances (précision) de certains paramètres.

De plus, le choix d'une méthode dépend de la nature des propriétés que l'on souhaite caractériser. Certaines méthodes sont plus appropriées pour la mesure de la conductivité thermique (méthode en régime permanent) alors que d'autres sont spécifiques aux propriétés telles que la diffusivité thermique. Dans le cas de ces dernières, il sera nécessaire d'effectuer des mesures de conductivité thermique ou de capacité thermique pour en déduire respectivement la capacité thermique ou la conductivité thermique (Gauthier (2012)). Enfin, selon le type de conducteur thermique (isolants thermiques ou bons conducteurs) à l'étude, on privilégiera une méthode sur une autre. Ainsi, les isolants thermiques pourront être caractérisés par la méthode de la plaque chaude gardée, qui ne permettra pas, en revanche, de caractériser des bons conducteurs thermiques.

1.6 Synthèse de la revue de littérature

Le recyclage des matières résiduelles au Québec est un enjeu pris au sérieux par les différents organismes en charge de la gestion de ces déchets. Le développement de nouvelles applications au verre postconsommation (VPC) est en nette progression au Québec avec plusieurs projets pilotes déjà réalisés et d'autres en cours de réalisation ainsi que des travaux de recherches dans des laboratoires universitaires. Le Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux est devenu un acteur important dans la recherche de solutions innovantes pour la valorisation du VPC, avec en l'occurrence l'incorporation de VPC dans les enrobés bitumineux et les couches structurales des chaussées. Dans l'ensemble, les travaux entrepris par le passé sur le Glasphalt semblent montrer que les enrobés bitumineux incorporant des particules de VPC (jusqu'à 15%) présentent des propriétés mécaniques similaires aux enrobés conventionnels correspondants. En revanche, peu d'études recommandent son utilisation dans les couches de surface à cause des risques d'arrachement de particules de VPC, mais voient plus son utilité comme substitut dans les couches granulaires.

Les chaussées sont soumises, tout au long de leur vie, à des sollicitations mécaniques liées principalement au passage de charges lourdes et à des sollicitations climatiques (cycles de gel-dégel, pluie, gel, UV, etc.). De plus le contexte climatique québécois amplifie l'intensité de

certaines de ces sollicitations, notamment en condition hivernale avec des indices de gel avoisinant les $2000^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$ dans certaines régions de la province. En effet, dans la partie sur l'action du gel, nous avons parcouru les différents processus menant à la formation des lentilles de glace dans les chaussées et les détériorations qui y sont liées. Nous avons vu que la formation des lentilles de glace dépend notamment de la nature minéralogique du matériau dans lequel se forme la glace. La vitesse de dégonflement a également une incidence sur la déformation permanente de la surface après dégel. Plus la vitesse est faible, moins la déformation permanente est importante (Figure 1.9). Autrement dit, les travaux exposés dans la section 1.3 montrent qu'il existe une corrélation forte entre les propriétés thermiques de la chaussée et les dégradations observées lors du dégel printanier (Dysli & Pfister (1980)). Par conséquent, la diminution de la conductivité thermique apportée par l'incorporation du VPC dans la structure de chaussée doit être rigoureusement prise en compte lors du dimensionnement. En effet, comme nous l'avons vu, la vitesse de gonflement est fonction de la vitesse de propagation du gel ; soit de la conductivité thermique des couches de la chaussée (Figure 1.8).

Nombreux sont les paramètres pouvant modifier les propriétés thermiques des matériaux de construction. La section 1.4.3 en a mis en évidence trois : l'influence de la composition du sol, de la porosité et de l'eau et le travail de recherche présenté dans ce mémoire s'est penché sur l'influence de ces trois paramètres. À la lumière des différents critères présentés dans la section 1.5.3, la méthode choisie pour la mesure de la conductivité thermique est celle de la sonde thermique (section 1.5.2.1). Les hypothèses faites pour la résolution numérique du problème de la ligne source infinie sont difficiles à réunir tant la sonde thermique a des dimensions finies et des propriétés propres non négligeables. De plus, les spécimens à l'étude sont également de dimensions finies et le contact entre la sonde et le matériau est dans certains cas non-ideal (Hütter & Kömle (2012)). Ces limitations sont certes contraignantes et doivent être prises en compte dans la procédure expérimentale et lors de l'analyse des résultats, mais à défaut d'être extrêmement précis, cet instrument présente l'avantage d'être adaptable et facile à mettre en place (Defer *et al.* (1993)).

CHAPITRE 2

OBJECTIF ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Dans ce chapitre est présenté l'objectif principal de ce projet de recherche ainsi que le fondement du programme expérimental mis en place pour répondre à cet objectif.

2.1 Problématiques et objectif de l'étude

La revue de littérature a permis de mettre en évidence plusieurs problématiques. D'une part, des solutions innovantes doivent être trouvées pour valoriser le VPC et éviter qu'il ne se retrouve dans les centres d'enfouissement où il n'apporte pas de valeur ajoutée. D'autre part, le contexte climatique québécois impose d'importantes contraintes sur les structures routières, notamment en hiver, et qu'il faut prendre en compte lors de leur dimensionnement. Un nombre croissant de travaux de recherche sont consacrés à la faisabilité de l'incorporation de matériaux recyclés dans les structures de chaussées, et ce, au profit de matériaux vierges. L'incorporation de granulats de VPC dans les chaussées est à l'étude depuis les années 70, et les propriétés mécaniques et hydriques sont déjà bien documentées. En revanche l'aspect thermique est nettement moins mis en avant dans ces travaux (*voir* section 1.2).

Par ailleurs, soulignons le fait que les études sur l'incorporation du VPC dans les matériaux de chaussées sont majoritairement menées à l'échelle du matériau par des essais de laboratoire. Aucun document dans la littérature ne permet de statuer quant à la performance thermique du VPC dans le contexte de la structure de la chaussée à proprement parler. Pour ce faire, il convient de mesurer avec un niveau de certitude acceptable ces propriétés intrinsèques aux matériaux. C'est pourquoi un travail rigoureux et minutieux a été réalisé en vue de mettre au point des protocoles expérimentaux pour les matériaux granulaires, dans les laboratoires du LCMB.

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer, dans une perspective systémique de la chaussée, l'influence de l'incorporation de granulats de VPC dans des mélanges granulaires

pour les couches de fondation des chaussées. Pour atteindre cet objectif, le travail est subdivisé en deux grandes phases, soit : 1) une phase expérimentale visant à mesurer les propriétés thermiques de granulats de VPC et 2) une phase de modélisation numérique des échanges thermiques à l'échelle de la chaussée.

2.2 Méthodologie

La phase I du présent projet de recherche consiste en la caractérisation en laboratoire des propriétés thermiques (α et λ) de mélanges granulaires selon différents paramètres physiques (teneur en VPC, granulométrie et teneur en eau). La phase II vise à modéliser numériquement une structure conventionnelle de chaussée tout en y faisant intervenir les résultats de la phase I, afin d'évaluer l'impact qu'aurait l'incorporation de granulats de VPC sur son régime thermique, en particulier sur la propagation du front de gel dans le corps de chaussée.

2.2.1 Phase I : programme expérimental

Dans la section 1.4.3 furent présentés les facteurs influençant les propriétés thermiques des milieux poreux. Parmi ces facteurs figurent la teneur en eau, la nature minéralogique des matériaux et leur granulométrie. Ce sont ces 3 paramètres qui forment la base sur laquelle le programme expérimental est fondé. Dans un premier temps, la granulométrie de référence utilisée dans ce projet de recherche est présentée, et dans un second temps, les mélanges qui furent considérés afin de caractériser chacun des deux paramètres λ et α seront détaillés.

2.2.1.1 Granulométrie à l'étude

La granulométrie des différents mélanges a été établie sur la base du fuseau granulométrique du MG20 suivant les recommandations du MTMDET pour matériaux de fondation routière. Sur la Figure 2.1 sont représentées la courbe supérieure (CS) et inférieure (CI) correspondant respectivement à la limite supérieure (—) et inférieure (—) du fuseau des MG20 telles que

définies par le MTMDET. Le Tableau 2.1 donne les valeurs de masse retenus aux différents tamis organisés selon le diamètre de leurs ouvertures.

Tableau 2.1 Fuseau granulométrique : CS - Courbe Supérieure ; CI - Courbe Inférieure ; GE - Granulométrie à l'étude

	Tamis (mm)	Passant			Retenu GE (%)
		CS (%)	CI (%)	GE (%)	
A l'étude	31,5	100	100	100	0
	20	100	90	95	5
	14	93	68	80	15
	10	80	54	67	13
	5	60	35	43	24
	2,5	48	26	33	10
	1,25	38	19	23	10
	0,630	26	13,5	13	10
	0,315	17	9,0	9,0	4,0
	0,160	13	5,0	6,0	3,0
	0,080	7,0	2,0	3,0	3,0

Le VPC est fourni par le centre de tri *Tricentrис* basé à Lachute (Québec). La taille des plus gros granulats de VPC fournis est de 5 mm (*voir* section 3.1.1.2). De ce fait, seule la portion 0,08-5 mm du fuseau MG20 a été considérée dans ce projet. La granulométrie à l'étude (GE) représente donc la granulométrie du mélange de type MG 20 (—) qui a été à l'étude tandis que la courbe en pointillés bleus correspond à l'extension de la courbe GE dans les limites du fuseau du MTMDET.

2.2.1.2 Influence de la nature minéralogique des mélanges

La Figure 2.2 représente la courbe granulométrique à l'étude. En se basant sur cette courbe, trois mélanges ont été constitués afin d'évaluer l'influence de la nature minéralogique du mélange sur les propriétés thermiques du granulat avec VPC (λ et α). Ces trois mélanges corres-

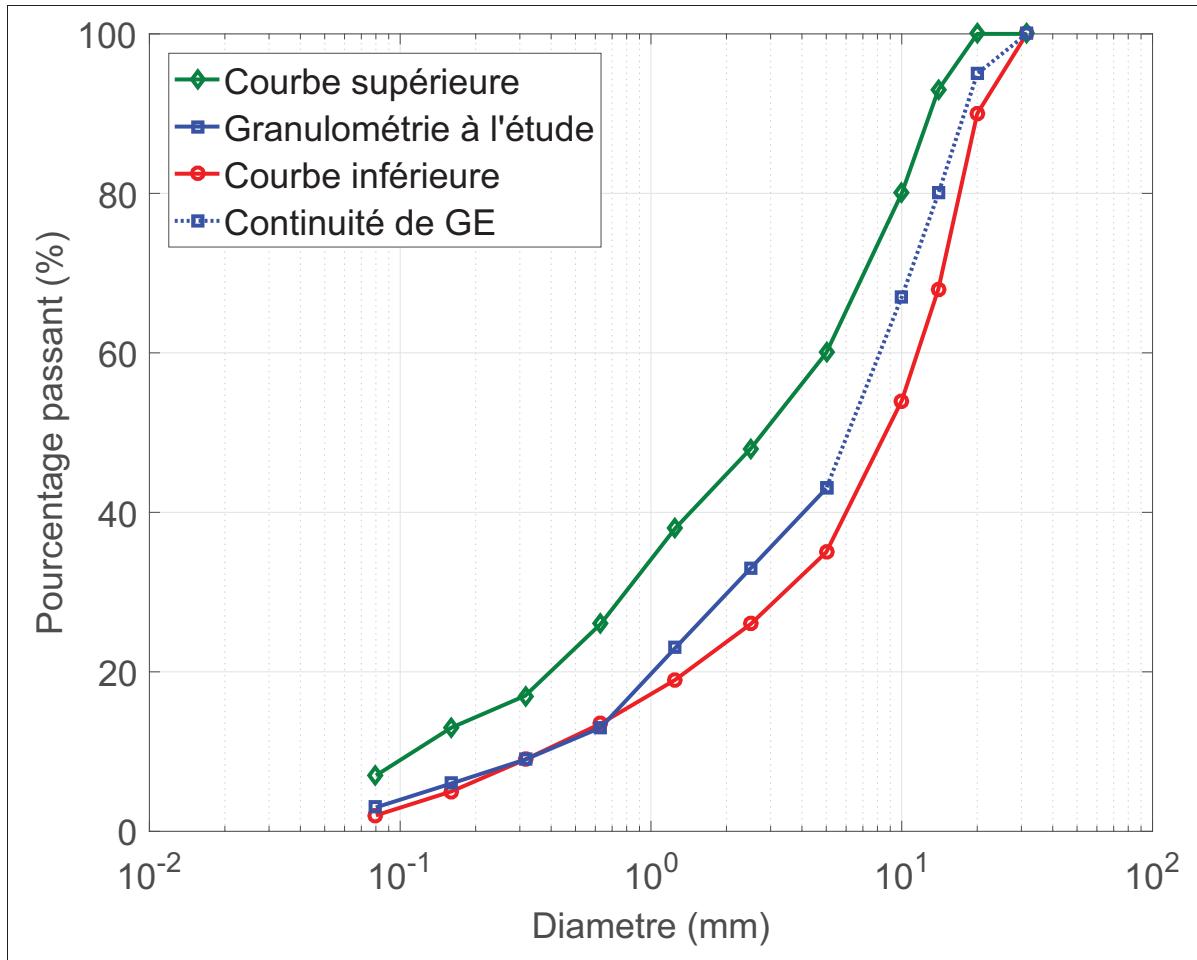


Figure 2.1 Courbes granulométriques : CS - Courbe Supérieure ; CI - Courbe Inférieure ; GE - Granulométrie à l'étude

pondent à trois proportions de VPC (réciproquement de pierre calcaire) dans un mélange de VPC et de pierre calcaire suivant la granulométrie du combiné correspondant à celle de la Figure 2.2. Le Tableau 2.2 donne la description des proportions des combinés étudiés. Le Tableau 2.3 indique les valeurs de la granulométrie à l'étude (GE) mais rapportée au tamis 5mm.

2.2.1.3 Influence de la granulométrie

Pour évaluer l'impact de la granulométrie sur α et λ , la courbe GE (Figure 2.2) a été subdivisée en 3 classes correspondant à 3 granulométries différentes. Le Tableau 2.4 donne la description

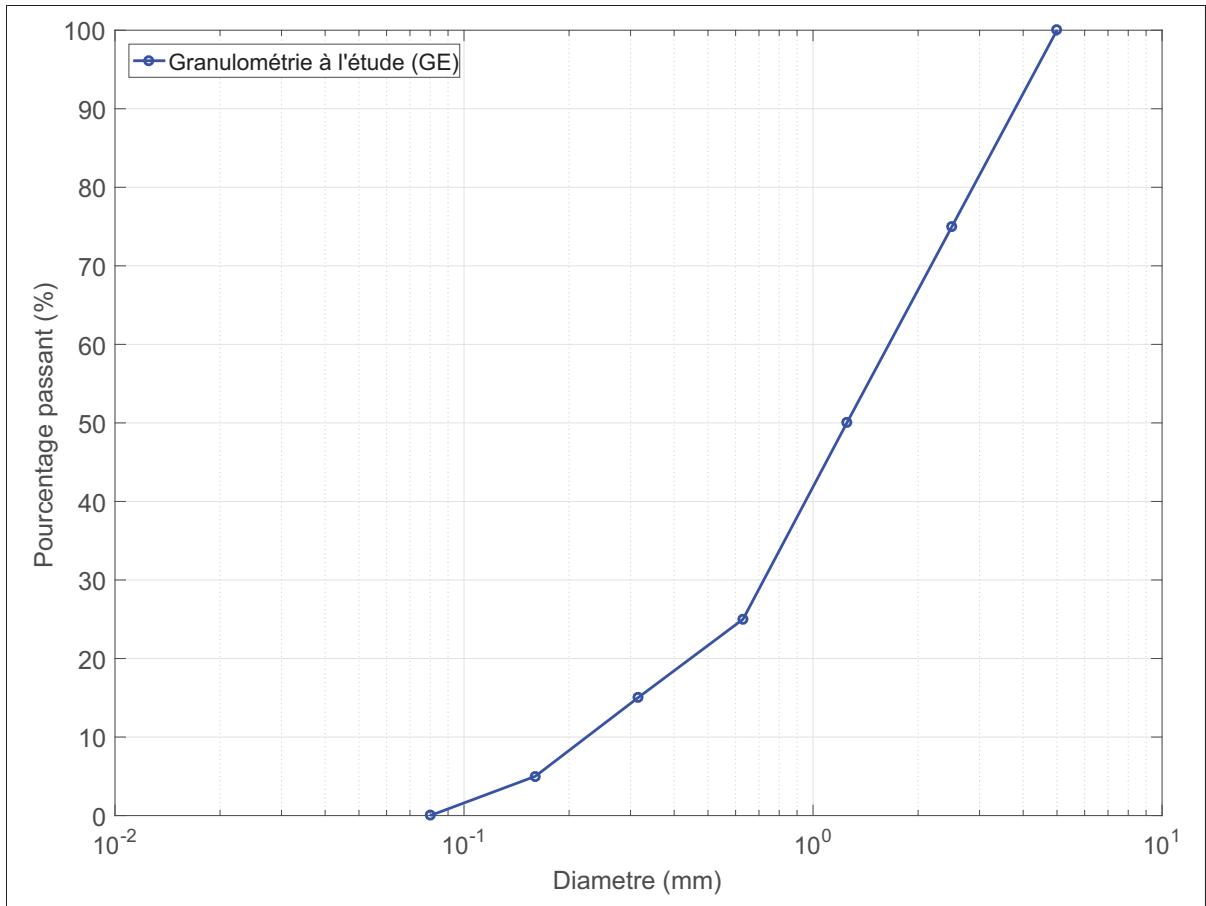


Figure 2.2 Courbe granulométrique des mélanges 75V/25P, 50V/50P, 25V/75P

Tableau 2.2 Mélanges considérés (exprimés en pourcentage massique)

Dénomination	Description
75V/25P	75% de granulats de VPC et 25% de pierre calcaire
50V/50P	50% de granulats de VPC et 50% de pierre calcaire
25V/75P	25% de granulats de VPC et 75% de pierre calcaire

de ces trois classes et la Figure 2.3 représente graphiquement la séparation entre ces 3 classes granulométriques. Cette subdivision a été appliquée au VPC d'une part puis à la pierre calcaire d'autre part ; la conductivité thermique et la diffusivité thermique de ces différents mélanges a alors été mesurées.

Tableau 2.3 Granulométrie des mélanges 75V/25P, 50V/50P, 25V/75P

Tamis (mm)	GE	
	Passant (%)	Retenu (%)
5	100	0
2.5	75	25
1.25	50	25
0.630	25	25
0.315	15	10
0.160	7.5	7.5
0.08	0	7.5

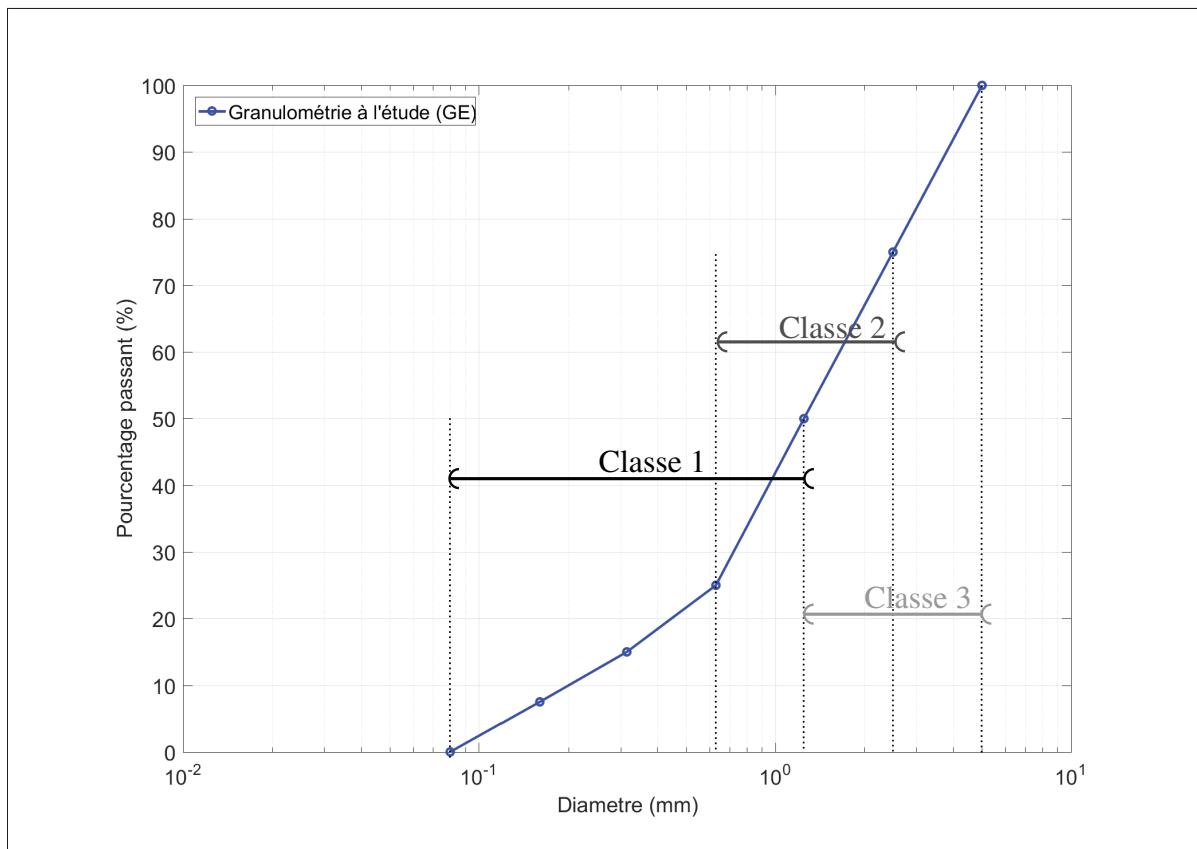


Figure 2.3 Subdivision de la courbe GE en 3 classes granulométriques

Tableau 2.4 Subdivision granulométrique des mélanges de VPC et de pierre calcaire

Classes	Description
Classe 1 : 0,08-1,25	passant 1.25 mm, retenu 0.08 mm
Classe 2 : 0,630-2,5	passant 2.5 mm, retenu 0.630 mm
Classe 3 : 1,25-5	passant 5 mm, retenu 1.25 mm

2.2.1.4 Influence de la teneur en eau (w_c)

L'eau a une influence considérable sur les propriétés thermiques d'un mélange granulaire. Les propriétés thermiques (λ et α) des mélanges présentés dans les sections 2.2.1.2 et 2.2.1.4 ont donc été mesurées pour différentes teneurs en eau cibles $w_c(\%)$. Le Tableau 2.5 donne les valeurs de teneurs en eau considérées pour chacun des essais.

Tableau 2.5 Teneurs en eau considérées lors des essais de conductivité et de diffusivité thermique

Essais	Teneurs en eau cibles $w_c(\%)$
Conductivité thermique (λ)	0, 4, 8, 16, 24
Diffusivité thermique (α)	0, 8, 16

Une étude menée par Bernard (2014) s'est intéressé à l'aptitude au compactage du VPC en effectuant des essais Proctor modifiés à différentes teneurs en eau. La teneur en eau maximale atteinte est d'environ 16%. Dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons décidé lors des essais de conductivité thermique d'examiner également la valeur $w_c = 24\%$. En ce qui concerne les essais de diffusivité thermique, le nombre de teneurs en eau cibles (w_c) a été revu à la baisse, car la création du montage et la calibration de l'essai pris plus de temps que prévu et il a fallu retirer les valeurs 4% et 24%.

2.2.1.5 Dispositifs expérimentaux

Avant d'entamer les mesures de conductivité et de diffusivité thermiques sur les combinés granulaires ciblés, les outils expérimentaux ont dû être installés au LCMB. Ces montages ont donc nécessité une période de calibration et d'essais préliminaires visant à établir une procédure expérimentale adéquate vis-à-vis des matériaux à l'étude. Les détails concernant ces essais seront exposés dans le Chapitre 3.

2.2.2 Phase II : modélisation numérique

L'intérêt des simulations numériques est qu'elles permettent d'observer des phénomènes dont on espère qu'ils apporteront des informations utiles. Dans le cas de ce projet de recherche, le recours aux simulations numériques vise à obtenir un aperçu du régime thermique d'une chaussée lorsque certains paramètres structuraux et thermiques sont modifiés.

2.2.2.1 Outils de modélisation

FLAC (*Fast Lagrangian analysis of Continua*) est un code de calcul en différences finies développé par la société américaine ITASCA *Consulting Group*. Il permet de simuler le comportement mécanique des structures en sols, en roches ou autres matériaux. Les matériaux sont représentés par des éléments ou des zones bidimensionnels qui forment le maillage ajusté par l'utilisateur pour avoir la forme de l'objet à modéliser.

Le programme FLAC dispose également de modules externes qui permettent de faire intervenir dans la modélisation des phénomènes hydriques, tels que des écoulements à deux phases, ou bien des phénomènes thermiques, tels que le transport de chaleur par conduction ou convection. C'est ce dernier module qui a été utilisé pour simuler l'évolution de la température d'une structure de chaussée soumise à une excitation thermique extérieure (*i.e.* variation de la température à la surface).

2.2.2.2 Étude paramétrique

L'étape des simulations numériques consiste à représenter une structure conventionnelle de chaussée (couche de surface, fondation supérieure et inférieure et sous-fondation) et d'y apporter des changements de propriétés thermiques et de configuration. Notamment, un des aspects étudiés est l'insertion d'une couche de matériau contenant du VPC au sein de la structure de chaussée en vue de moduler son régime thermique. Une liste exhaustive de ces paramètres est donnée dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 Détails des paramètres de la couche qui seront modifiés lors des simulations numériques

Paramètre	Informations complémentaires
Propriétés thermiques	Conductivité thermique et diffusivité thermique
Propriétés physiques	Épaisseur et profondeur relative de la couche en question
Température de l'air	Température constante et fonction sinusoïdale du temps

L'analyse porte essentiellement sur l'évolution du front de gel en fonction du temps et de la profondeur. En comparant notamment les profondeurs atteintes par le front de gel, il est possible d'évaluer l'impact de l'incorporation d'une couche de VPC sur le régime thermique de la structure de chaussée.

2.3 Plan de travail

La Figure 2.4 représente une synthèse du plan de travail sous forme d'organigramme. Les deux phases du travail y sont représentées ainsi que les facteurs évalués durant chacune de ces phases.

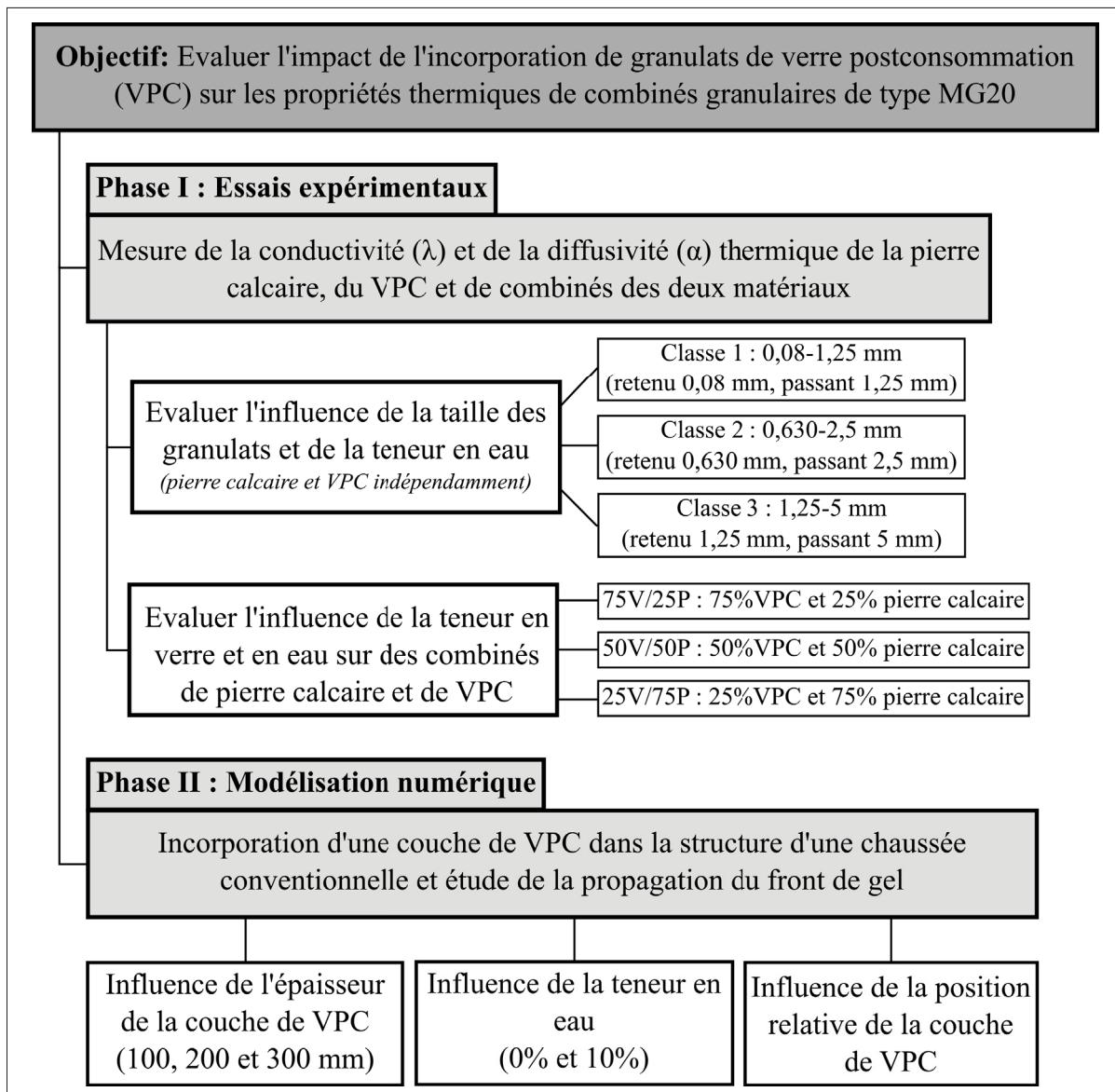


Figure 2.4 Organigramme du programme expérimental

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Tel que présenté lors de la description du programme de recherche, des essais de conductivité et diffusivité thermiques ont été effectués sur différents combinés granulaires. Le présent chapitre a pour but de présenter les méthodes d'essais introduites au LCMB et qui ont servi à la caractérisation thermique de ces combinés.

3.1 Mélanges à l'étude

3.1.1 Source de granulats

3.1.1.1 Granulats de pierre calcaire

Les granulats de pierre utilisés proviennent de la carrière située dans la municipalité de Saint-Philippe. Ils sont extraits par l'entreprise Construction DJL qui fournit plusieurs classes granulaires. Ce sont les granulats de la classe nommés "0/5 non lavé" qui ont été utilisés et dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques physiques du matériau 0/5 non lavé

Granulométrie		Caractéristiques	
Tamis (mm)	% passant		
10	100	Classe granulaire	0-5 non lavé
5	97	Nature minéralogique	Calcaire
2,5	66	Densité brute (d_{gb})	2.718
1,25	44	Absorption en eau (%)	0.65
0,630	31	Micro-Deval (MD) (%)	14.5
0,315	25	Indice de friabilité (%)	29
0,160	20	Catégorie de granulat	1
0.08	15	(selon BNQ 2560-114)	

3.1.1.2 Granulats de VPC

Tricentris est en mesure de distribuer plusieurs classes de VPC ; chacune de ces classes correspondant à une certaine granulométrie. Le système de classification de ces classes est basé sur la valeur des diamètres de tamis dans le système impérial. Les classes utilisées sont notées : 4/8, 10/16, 16/30 et 30/90. La granulométrie de chacune de ces classes est donnée par le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur les classes de VPC mixte fournis par Tricentris

Tamis (mm)	Passant (%)			
	4/8	10/16	16/30	30/90
5	100	100	100	100
2,5	39	100	100	100
1,25	0,5	15	98	100
0,630	0,4	0,4	14	100
0,315	0,3	0,2	0,3	55
0,160	0,1	0,1	0,1	41
0,08	0,1	0,1	0,1	40

Les mélanges à l'étude dans ce projet de recherche sont élaborés à l'aide d'une courbe granulométrique établie au préalable (*voir* section 2.2.1.1). En d'autres termes, une fois reçu, le VPC est tamisé afin de séparer les différents diamètres ; les refus récupérés servent alors à l'élaboration des mélanges. Des photos du VPC fourni par Tricentris sont données sur la Figure 3.1

3.1.2 Préparation des mélanges

Le VPC reçu de chez Tricentris et la pierre calcaire "0/5 non lavé" ont tout d'abord été tamisés selon les diamètres normalisés en accord avec la norme *Analyse granulométrique par tamisage CAN/BNQ 2560-40*. Une fois les refus récupérés, les mélanges sont alors préparés en fonc-

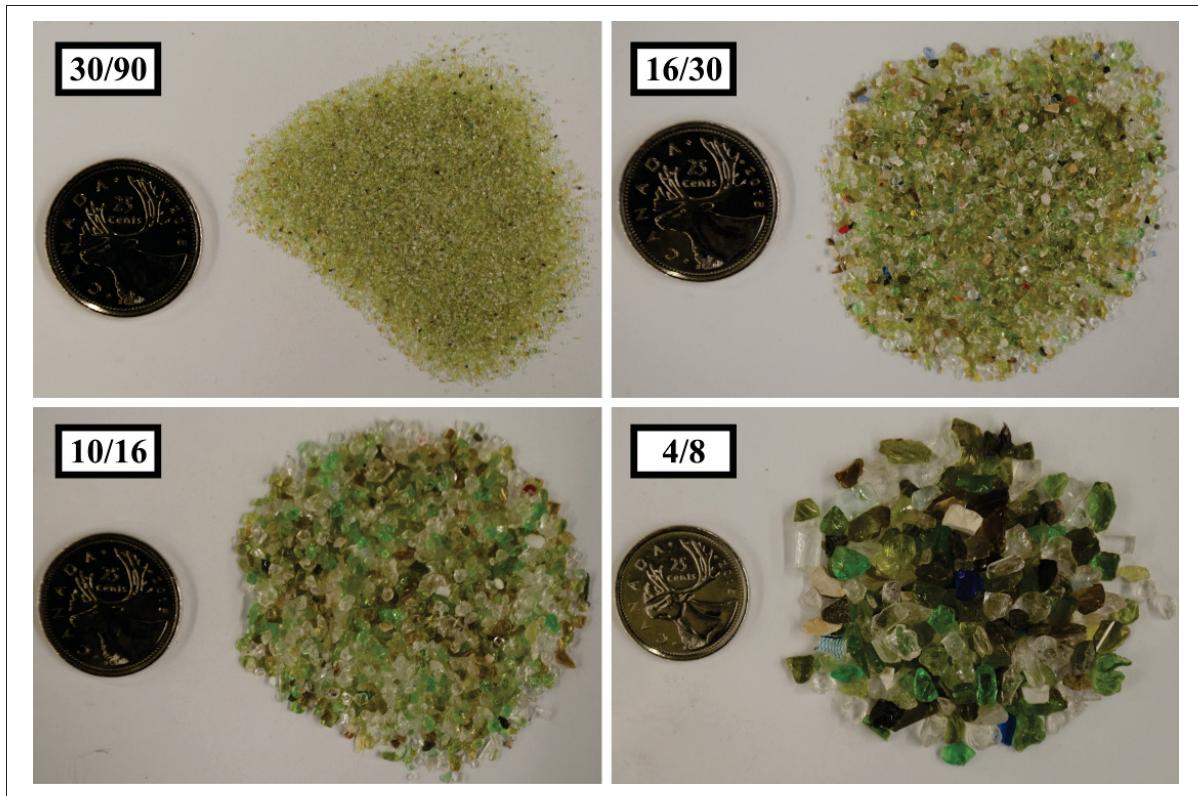


Figure 3.1 Photos des différents échantillons de VPC fournis par Tricentris

tion des proportions massiques voulues. L'Annexe I donne un exemple de préparation de ces mélanges.

3.1.3 Préparation de l'eau

Comme cela a été mentionné dans la section 1.4.3.2, lorsqu'un gradient thermique est appliqué dans un sol humide, des mouvements de convection vont naître et provoquer des migrations d'eau pouvant perturber la mesure de la conductivité thermique (ASTM International (2014)).

Afin d'éviter ces erreurs, un produit gélifiant naturel (agar-agar) a été utilisé. Cette solution au problème de convection est suggérée par le standard ASTM D5334 et elle est grandement utilisée lorsqu'il s'agit d'effectuer des mesures de propriétés thermiques dans un matériau humide au moyen d'une sonde thermique (Hanson & Neuhaeuser (2004), Kömle *et al.* (2013),

Dang (2013), Low *et al.* (2014)). De plus, pour des proportions d'agar-agar inférieures à 2% de la masse d'eau, le gélifiant n'a aucune influence sur les propriétés thermiques du matériaux (Zhang *et al.* (2011)).

L'Annexe II donne la procédure détaillée pour la préparation du mélange eau et agar-agar. En somme, l'agar-agar est dissous dans de l'eau chaude et une fois que la température du mélange eau/agar-agar est d'environ 30°C, il est incorporé au mélange granulaire. L'ensemble est alors laissé au repos le temps que sa température atteigne la température ambiante.

3.2 Mesure de la conductivité thermique

C'est donc la méthode de la sonde thermique qui a été choisie pour la mesure de la conductivité thermique (section 1.5.3). La présente section comprend la procédure suivie lors des essais réalisés ainsi qu'une section consacrée à l'analyse des données.

3.2.1 Procédure

Cette partie présente la procédure suivie pour mesurer, en laboratoire, la conductivité thermique λ de mélanges contenant des granulats naturels et de VPC. Cette procédure s'inspire, dans ses grandes lignes, du standard ASTM D5334-14 (ASTM International (2014)) et a été ajustée de manière à tenir compte des exigences du MTMDET en terme de compaction des matériaux de fondation ainsi que de l'hétérogénéité des milieux poreux que sont les mélanges analysés. La théorie sur laquelle est basée cet essai est donnée en Annexe III.

3.2.1.1 Équipements

Tous les essais de conductivité thermique ont été réalisés en suivant la même procédure et en se servant des mêmes outils. Le Tableau 3.3 dresse une liste complète du matériel.

Comme la grande majorité des sondes thermiques utilisées pour la mesure de la conductivité thermique, la sonde TR-1 est constituée d'un tube en métal inoxydable de très faible résistance

thermique, dans lequel sont placées la résistance linéique et la thermistance. La résistance parcourt toute la longueur du tube en métal et est entourée d'un époxy très conducteur qui a été mis en place sous vide. La thermistance est quant à elle placée à mi-longueur le long du tube.

Tableau 3.3 Appareillage pour l'essai de conductivité thermique

Item	Description
Sonde TR-1 ¹	Précision : $\pm 10\%$; Longueur : 100 mm ; Diamètre : 2,4 mm
CR1000 ²	Système d'acquisition
CE4 ²	Module de courant d'excitation : 50 mA $\pm 0,25$ mA
Tamis	0,08 μ m, 0,160 mm, 0,315 mm, 0,630 mm, 1,25 mm, 2,5 mm, 5 mm
Balances	Précision : $\pm 0,01$ g (masse < 100 g) et $\pm 0,1$ g (masse > 100 g)
Thermomètre	Précision : $\pm 0,1^\circ$ C
Moule Proctor	Volume : 948,3 cm ³
Marteau	Masse : 4,55 kg ; hauteur de chute : 458 mm
Étuve	Ventillation forcée ; Température : 110°C $\pm 5^\circ$ C
Outils de malaxage	Récipients, cuillères, spatules, ...
Plaque chauffante	

¹ East30sensors ; ² Cambpbell Scientific

3.2.1.2 Compactage

Le compactage des mélanges s'est fait dans un moule cylindrique en suivant la norme CAN/BNQ 2501-255-M-86 (méthode A, Proctor modifié).

3.2.1.3 Hétérogénéité, dimensions finies, et paramètres d'essai

L'existence d'une hétérogénéité dans les mélanges granulat/VPC (grosseur des particules, nature des granulats, pureté du VPC,...) a nécessité l'adaptation de la procédure du standard ASTM D5334 de manière à atténuer les effets dus à cette hétérogénéité. Strambu (2012) a proposé quelques solutions pour améliorer la précision de la méthode. Pour les matériaux de construction susceptibles de présenter une certaine hétérogénéité, il est nécessaire de réaliser

au moins 5 mesures à différentes positions dans le milieu afin de minimiser les perturbations du flux thermique autour de la sonde.

De plus, les dimensions finies du spécimen, si elles ne sont pas proprement choisies, risquent de biaiser les mesures (De Vries & Peck (1958)). En d'autres termes, pendant la phase de chauffage, la quantité de chaleur qui atteint la paroi du contenant doit être négligeable devant celle générée à la source. De Vries & Peck (1958) ont ainsi proposé un critère sur le rayon minimum de matériau autour de la source tel que l'influence des parois puisse être négligée. Ce critère s'exprime en fonction de la diffusivité thermique α du matériau, du temps de chauffage τ_h et de la distance R_1 entre la source et la paroi du contenant (considérée comme un rayon d'*influence* minimal) :

$$\exp\left(-\frac{R_1^2}{4\alpha\tau_h}\right) \ll 1 \quad (3.1)$$

La Figure 3.2 présente le choix fait sur l'emplacement des 5 points de mesure. On y voit les lignes du flux thermique représentées par des cercles concentriques ayant pour centre un point de mesure.

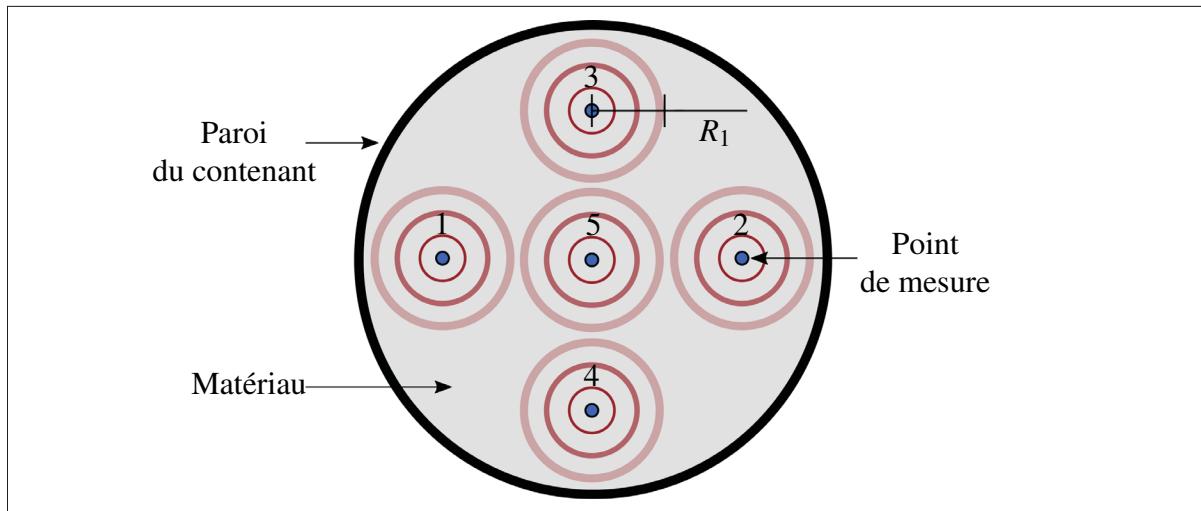


Figure 3.2 Représentation schématique du spécimen (vue de dessus)
Le rayon d'influence R_1 doit satisfaire la relation (3.1)

Concernant les matériaux utilisés lors de ce projet, la diffusivité thermique a été estimée du même ordre de grandeur que les matériaux de construction standards ; soit $\alpha \simeq 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ (Pilate (2006)). Pour satisfaire la condition (3.1), le rayon minimum d'influence R_1 doit être supérieure à 15 mm à condition que $\tau_h \leq 80\text{s}$. Dans notre cas, les points de mesures ont été placés à $20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ des parois et $\tau_h = 50\text{s}$. Pour ce qui est de la hauteur du contenant, le standard ASTM D5334 indique qu'elle doit être supérieure à 1,2 fois celle de la sonde (ASTM International (2014)). Ici, la longueur L de la sonde est de 100 mm et celle du contenant est de 120 mm.

3.2.1.4 Mesure et acquisition

Une fois le mélange compacté dans le moule proctor, l'essai peut commencer.

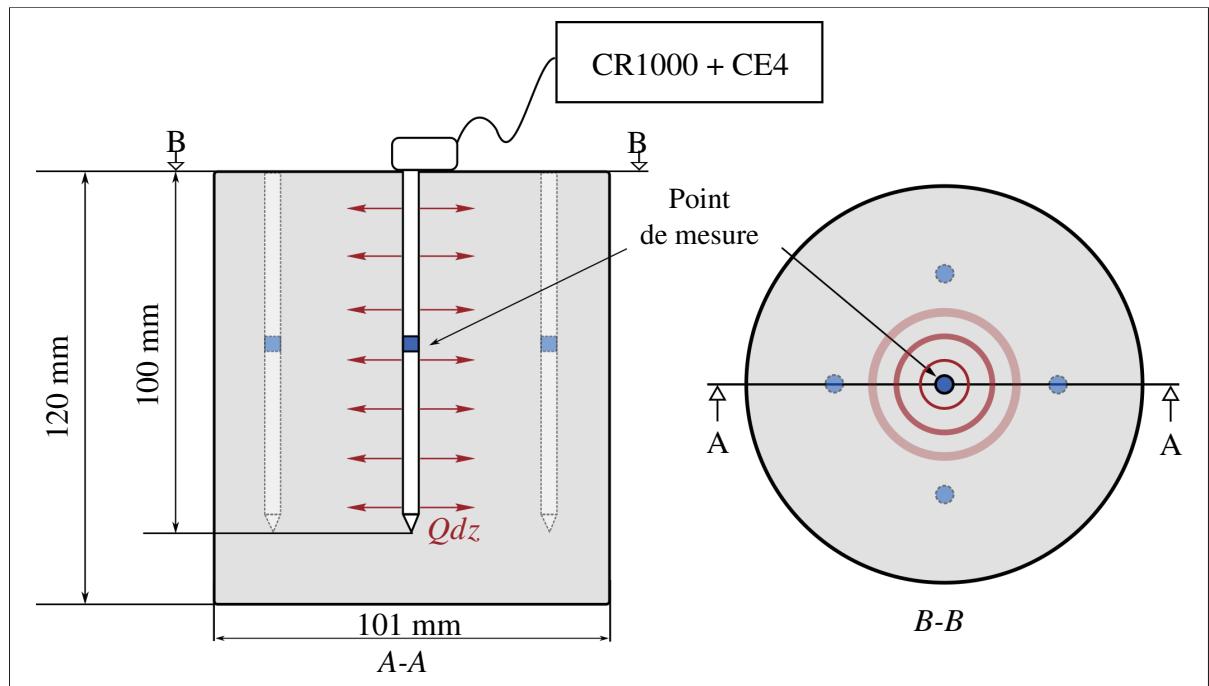


Figure 3.3 Représentation schématique de la méthode de mesure de la conductivité thermique. À gauche une vue de face du spécimen (A-A) ; à droite une vue de dessus (B-B)

La sonde est d'abord connectée au module d'excitation CE4 qui alimente la résistance chauffante, et au système d'acquisition CR1000 pour la collecte des données (*Voir Annexe IV pour le montage*). Ces deux appareils sont manufacturés par la compagnie Campbell Scientific.

La sonde est alors insérée dans l'un des 5 points de mesures (Figure 3.3). Le standard ASTM D5334 spécifie que la méthode d'insertion de la sonde dépend de la nature du matériau dans lequel elle est introduite. Deux méthodes d'insertion sont proposées. La première est manuelle et consiste simplement à enfoncer la sonde en appliquant une légère pression pour l'aider à pénétrer dans le milieu. La deuxième méthode repose sur le forage d'un trou de diamètre égal à celui de la sonde. Il faut alors veiller à avoir un bon contact entre la sonde et le milieu. Dans notre cas, la sonde a pu être enfoncée à la main, tout en veillant à ce qu'elle le soit dans son entièreté.

Le système d'acquisition communique avec la sonde au moyen d'un programme de contrôle qui contient les paramètres de l'essai ; les plus importants étant :

- temps de chauffage : $\tau_h = 50s$;
- intensité du courant fourni par le module CE4 : $I = 50mA$;
- résistance de la sonde : $R_{sonde} = 68,2\Omega$;
- longeur de la sonde : $L = 0,1m$;
- temps d'attente entre chaque mesure : $t_i = 3000s$.

Le programme est écrit en langage CRBasic et le logiciel Loggernet sert d'interface entre le CR1000 et l'utilisateur. Une fois que la connexion entre la sonde et le CR1000 est établie, le programme de contrôle est envoyé au CR1000 qui se charge de collecter les valeurs de températures à toutes les secondes. Le CR1000 se charge également de communiquer avec le CE4 pour lui permettre de savoir quand alimenter la sonde et quand arrêter. Dès que toutes les mesures nécessaires ont été faites, les températures sont enregistrées dans un fichier de sortie qui servira au calcul de la conductivité thermique.

3.2.2 Calibration

Une phase de calibration a été nécessaire afin d'évaluer la précision de la sonde thermique d'une part, et de définir un facteur de correction servant à corriger les mesures faites par la suite sur les mélanges à l'étude d'autre part. Le facteur de correction C_λ est défini par le standard ASTM D5334 comme étant le rapport entre la conductivité thermique $\lambda_{materiau}$ du matériau connu et celle mesurée à l'aide de la sonde, notée $\lambda_{mesuree}$, tel que :

$$C_\lambda = \frac{\lambda_{materiau}}{\lambda_{mesuree}} \quad (3.2)$$

Il existe un certain nombre de matériaux utilisé pour la calibration de cet outil parmi lesquels figure le sable d'Ottawa et l'eau (ASTM International (2014)). Ces matériaux ont des conductivités thermiques bien documentées ; le Tableau 3.4 en donne les valeurs dans les conditions de mesure données par le document de référence.

Tableau 3.4 Conductivité thermique des matériaux utilisés lors de la phase de calibration

Matériau	λ ($W/(m \cdot K)$)	Condition	Référence
Eau	0,604	$T = 25^\circ C$	Vargaftik (1975)
Sable d'Ottawa	0,254	$\rho = 1,65 g/cm^3$	Tarnawski <i>et al.</i> (2009)

En ce qui concerne le facteur de correction, il est établi sur la base des résultats obtenus sur le sable d'Ottawa sec, car il s'agit d'un matériau granulaire dont la conductivité thermique est de l'ordre de celles des matériaux granulaires utilisés dans le domaine de la construction (Pilate (2006)). D'autres travaux de recherche ont également eu recours à ce même matériau pour leur phase de calibration. Citons les travaux de Hanson & Neuhaeuser (2004), Tarnawski *et al.* (2009), Tarnawski *et al.* (2011) et Dang (2013).

Quelques informations supplémentaires sur les caractéristiques physiques du sable d'Ottawa utilisé sont données dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Caractéristiques physiques du sable d’Ottawa utilisé pour la phase de calibration de la sonde TR-1

Granulométrie		Caractéristiques	
Tamis (mm)	% passant		
1,180	100	Minéral	Quartz
0,600	98	Fournisseur	U.S. Silica
0,425	70	Dureté (<i>échelle de Mohs</i>)	7
0,300	25	Forme des granulats	Rond
0,150	2,0	Densité des particules sèches	2.65

3.2.3 Analyse des données

La courbe de la Figure 3.4 correspond au résultat idéal d’un essai de conductivité thermique.

La détermination du coefficient λ se fait en considérant les valeurs de température pendant la phase quasi stationnaire (*quasi steady state portion*).

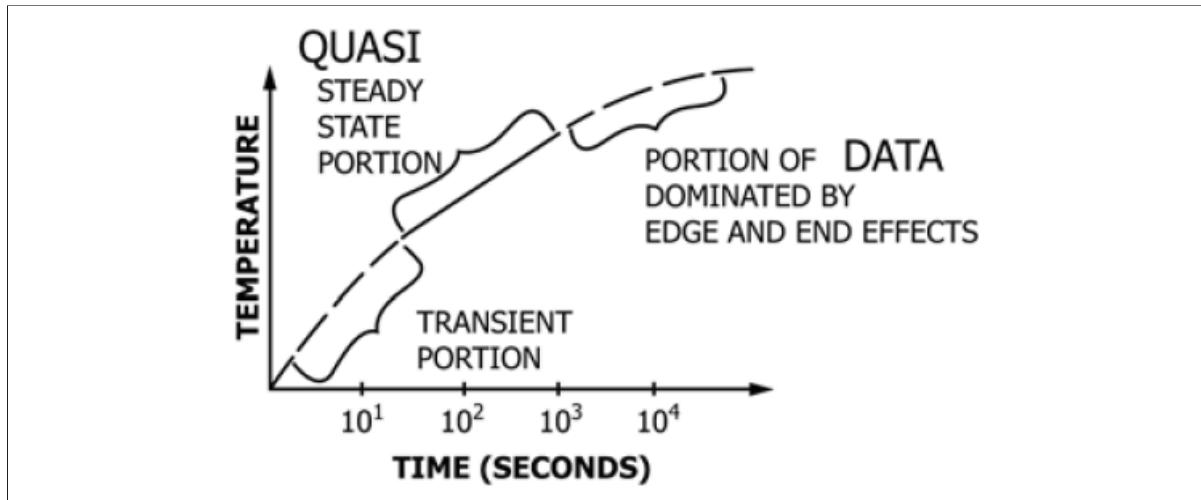


Figure 3.4 Évolution typique de la température au court du temps
Tirée de ASTM International (2014)

D'après le standard ASTM D5334, pour les sondes de diamètre inférieur à 2,54mm, la phase transitoire de l'essai ne doit pas être prise en compte dans le traitement des résultats. En effet la sonde possède un volume négligeable, mais non nul et lorsque la source de chaleur est générée au centre de la sonde, elle doit traverser le matériau qui constitue la sonde avant d'atteindre le mélange (Hütter & Kömle (2012)). La partie non linéaire du début correspond donc au chauffage de la sonde et doit être retirée de l'analyse. Dans notre cas, la compagnie East30sensors qui a fourni la sonde TR-1 considère que cette phase transitoire correspond à 30% du temps de chauffage τ_h .

Pour la phase de chauffage, on obtient alors une série de points dans le plan $(\ln(t), T)$ que l'on peut interpoler par une droite dont la pente sera notée S_h . Le même principe est appliqué à la phase de repos, dans le plan $(\ln[t/(t - \tau_h)], T)$, avec une droite de pente S_c . La Figure 3.5 reprend deux résultats expérimentaux obtenus lors d'un essai de conductivité thermique réalisé sur du sable d'Ottawa. Les coefficients S_h et S_c y sont représentés ainsi que la phase transitoire qui est omise dans le calcul de la conductivité thermique.

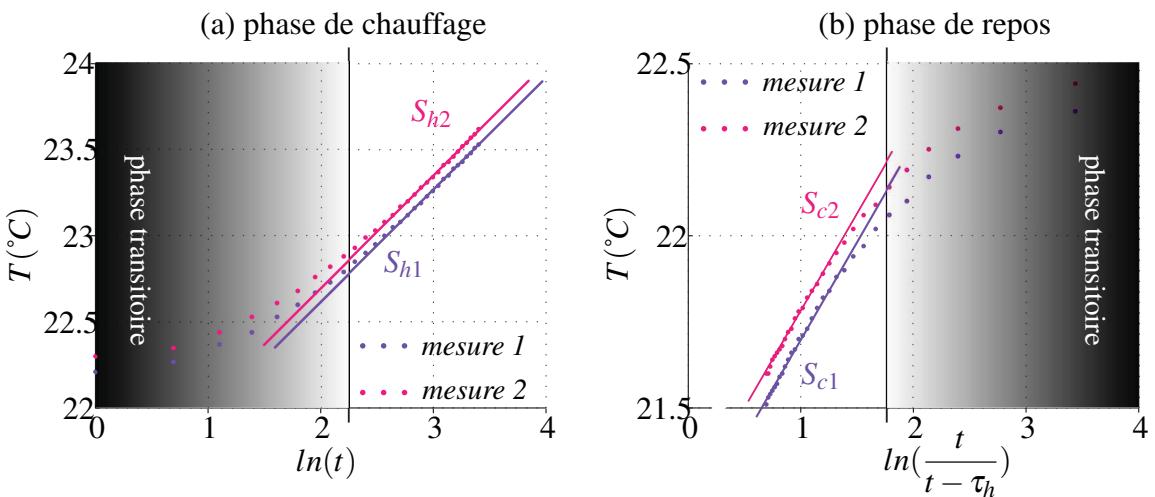


Figure 3.5 Mesures effectuées avec du sable d'Ottawa : (a) résultats obtenus pendant la phase de chauffage, (b) résultats obtenus pendant la phase de repos

D'après le standard ASTM D5334, on peut obtenir deux valeurs de conductivité thermique selon si on prend en compte la phase de chauffage uniquement ($S = S_h$) ou que l'on décide

d'inclure les résultats des deux phases ($S = 0.5 \cdot (S_h + S_c)$). Selon ce même standard, le fait de considérer les deux phases de l'essai permet de réduire les erreurs induites par les conditions extérieures telles que les fluctuations de la température ambiante. Ainsi, dans le cas où $S = 0.5 \cdot (S_h + S_c)$, la valeur de conductivité thermique sera plus précise que dans le cas où $S = S_h$.

La conductivité thermique du milieu est alors donnée par la relation 3.3. La sonde a nécessité une phase de calibration qu'il faut également prendre en compte dans le calcul de la conductivité thermique. C'est pourquoi la relation 3.3 intègre également le facteur de correction C_λ .

$$\lambda = \frac{q}{4\pi S} \cdot C_\lambda \quad (3.3)$$

avec :

$$q = \frac{RI^2}{L}$$

et :

- q = puissance linéaire fournie au milieu (W/m),
- R = résistance de la partie chauffante (Ω),
- I = courant constant parcourant la résistance (A),
- L = longueur de la partie chauffante (m),
- λ = conductivité thermique ($W/(m.K)$),
- C_λ = coefficient de calibration pour l'essai de conductivité thermique,
- S = S_h ou la moyenne de S_h et S_c .

3.3 Mesure de la diffusivité thermique

Pour mesurer la diffusivité thermique de béton bitumineux, Mrawira & Luca (2002) ont exploité la solution obtenue par la résolution numérique de l'équation de la chaleur dans le cas d'un flux de chaleur transitoire et unidimensionnel. Le dispositif expérimental qu'ils ont alors proposé consiste en une boîte dans laquelle est placée une éprouvette cylindrique de béton bitumineux et dont les parois latérales sont mises en contact avec un bon isolant thermique (Figure 3.6). Ainsi, en appliquant un flux thermique à la surface supérieure du cylindre de béton bitu-

mineux et en mesurant l'évolution de la température en trois positions différentes le long de l'axe principal du cylindre, ils ont été en mesure d'en déduire la diffusivité thermique.

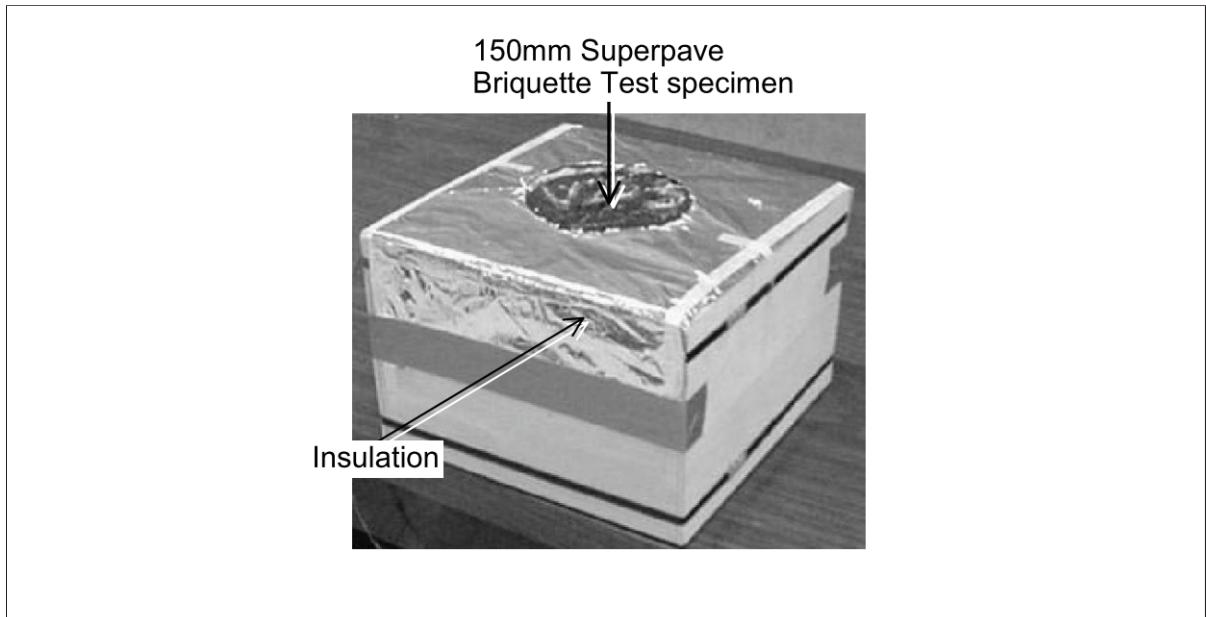


Figure 3.6 Configuration proposée par Mrawira & Luca (2002) pour la mesure de la diffusivité thermique sur éprouvettes de béton bitumineux

Dans un premier temps seront présentés les aspects théoriques de la méthode utilisée par Mrawira & Luca, puis une section sera consacrée au dispositif expérimental ainsi qu'à la procédure suivie pour la réalisation des essais de diffusivité thermique menés dans le cadre du présent projet de recherche.

3.3.1 Théorie

3.3.1.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements en séries de Taylor. Elle est due aux travaux de plusieurs mathématiciens du XVII^e siècle (Euler, Taylor, Leibniz,...) (Goncalves (2005)). Cette tech-

nique permet d'approximer la valeur d'une fonction en un point voisin en espace ou en temps (Recktenwald (2011)). Ainsi il est possible d'obtenir une approximation des dérivées partielles du premier et second ordre que l'on trouve dans l'équation de la chaleur (relation (3.6)).

Soit une fonction $\Psi(x)$ définie dans le domaine d'étude. Si on se place à une position X donnée, et si on suppose connaître $\Psi(X)$ ainsi que $\Psi(X - \delta x)$ et $\Psi(X + \delta x)$, δx étant une variation infinitésimale autour de la position X , alors :

$$\frac{\partial \Psi(X)}{\partial x} = \frac{\Psi(X + \delta x) - \Psi(X)}{\delta x} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi(X)}{\partial x^2} = \frac{\Psi(X + \delta x) - 2\Psi(X) + \Psi(X - \delta x)}{\delta x^2} \quad (3.5)$$

3.3.1.2 Résolution numérique de l'équation de la chaleur unidimensionnelle

L'équation de la chaleur dans le cas unidimensionnel s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

avec $T = T(x, t)$ la température à un instant t et une position x , et α la diffusivité thermique du milieu. La relation 3.6 est écrite dans le cas d'un milieu semi-infini d'épaisseur L (Figure 3.7).

Les conditions initiales (à $t = 0$) et aux frontières (pour $x = 0$ et $x = L$) sont telles que :

$$T(0, t) = T_0, \quad T(L, t) = T_L, \quad T(x, 0) = f_0(x). \quad (3.7)$$

avec $f_0(x)$ la répartition de température relative initiale telle que $f_0(x) = T - T(x, 0)$.

L'équation 3.6 est une équation dite aux dérivées partielles et dont la résolution numérique nécessite la discrétisation du domaine d'étude considéré, en temps comme en espace. On suppose pour cela que l'intervalle de temps est découpé suivant une grille avec un nombre fini de points et d'intervalles (Figure 3.7). Le calcul de la solution se fait uniquement en ces instants-là. Si on note Δt l'intervalle de temps (supposé constant) de la grille de discrétisation temporelle, et

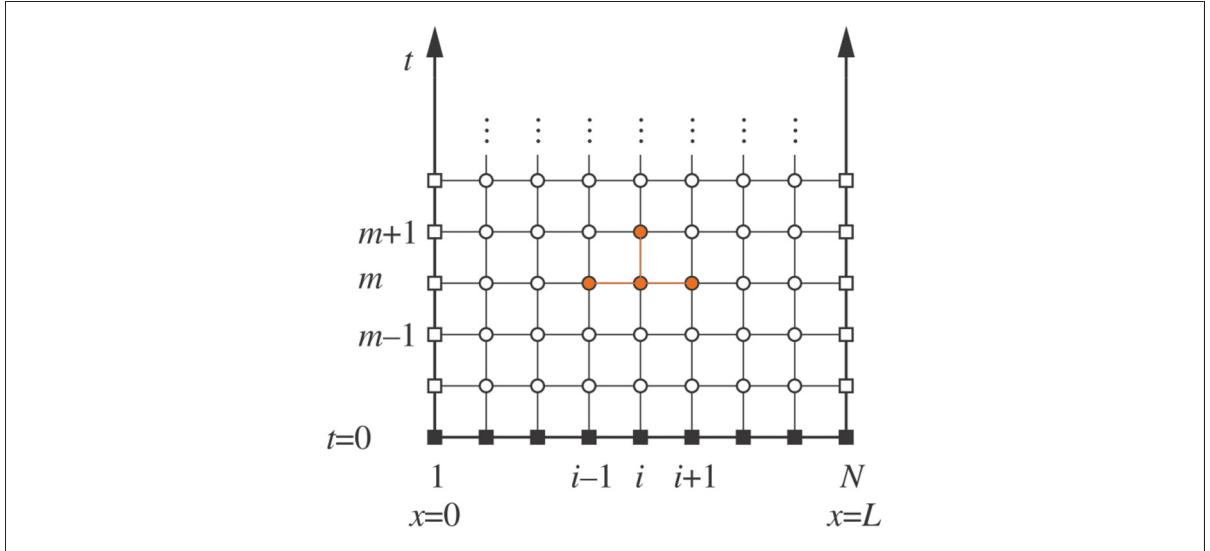


Figure 3.7 Maillage du domaine semi-infini utilisé pour le calcul de la solution de l'équation de la chaleur unidimensionnelle
Tirée de Recktenwald (2011)

Δx le pas d'espace (supposé constant) de la grille de discréétisation spatiale, alors le calcul de la solution se fera aux points $x = i\Delta x$ et $t = m\Delta t$ avec $i = 1, 2, \dots, N$ et $m = 1, 2, \dots, M$; N et M étant respectivement le nombre total de nœuds d'espace et de temps.

En remplaçant δx par le pas de temps Δt dans la relation 3.4, et par le pas d'espace Δx dans la relation 3.5, alors l'équation 3.6 devient :

$$\frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = \alpha \frac{T(x + \Delta x, t) - 2T(x, t) + T(x - \Delta x, t)}{\Delta x^2} \quad (3.8)$$

En se rapportant à la Figure 3.7, si on pose :

$$\begin{aligned} T(x, t) &= T_i^m & T(x, t + \Delta t) &= T_i^{m+1} \\ T(x - \Delta x, t) &= T_{i-1}^m & T(x + \Delta x, t) &= T_{i+1}^m \end{aligned}$$

alors la diffusivité est donnée par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{T_{i-1}^m + T_{i+1}^m - 2T_i^m} \cdot \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad (3.9)$$

3.3.2 Procédure

Dans la section précédente a été présenté le raisonnement théorique permettant d'obtenir la diffusivité thermique d'un matériau en connaissant la température en trois points du milieu, et ce, selon une configuration et des conditions bien spécifiques. La présente partie décrit le dispositif expérimental qui a été réalisé afin de mesurer α ainsi que la procédure suivie lors de la conduite des essais.

3.3.2.1 Dispositif expérimental

La Figure 3.8 représente le dispositif qui a été mis en place pour la mesure de la diffusivité thermique.

Le contenant dans lequel a été compacté le mélange (*voir* section 3.3.2.2) est isolé latéralement à l'aide d'anneaux de polystyrène extrudé (XPS). Le contact entre le polystyrène et le contenant est assuré à l'aide de colliers de serrage. Les différents anneaux sont également maintenus verticalement grâce à 2 étaux. La lampe chauffante est placée à une distance de 30 mm de la surface supérieure du matériau et les 3 thermocouples sont introduits dans le matériau par le biais d'un orifice créé dans le fond du contenant. Pour préserver une distance constante entre les 3 thermocouples et de manière à les garder droits lors du compactage, ils ont été liés entre eux par une membrane semi-rigide (Figure 3.9).

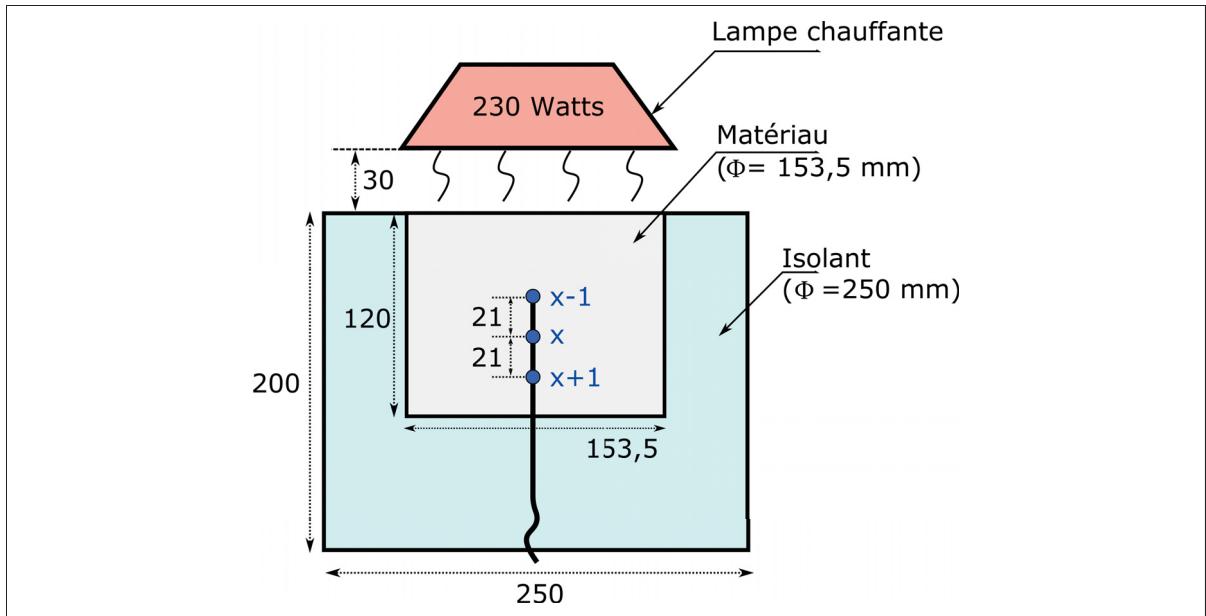


Figure 3.8 Représentation schématique de la méthode de mesure de la diffusivité thermique (les dimensions sont en millimètres)

3.3.2.2 Compactage

A la différence avec les spécimens de béton bitumineux de Mrawira & Luca (2002), les mélanges à l'étude n'ont pas pu être mis en contact direct avec l'isolant thermique, car ayant une faible cohésion. Ils ont donc dû être compactés dans un contenant afin de les confiner.

D'autre part, le moule Proctor utilisé lors des essais de conductivité thermique n'a pas pu être utilisé pour l'essai de diffusivité. En effet, nous avons vu que la condition du flux de chaleur unidirectionnel est importante pour la réalisation de cet essai. Or le moule Proctor est en métal et le métal étant bon conducteur thermique, le risque fut de perturber la propagation du flux de chaleur dans le matériau. C'est pourquoi il a fallu trouver un moyen de compacter les mélanges dans un contenant dont les parois auront une influence négligeable sur la propagation du flux de chaleur. Parmi les différents contenants testés lors de la phase de calibration, celui qui a été retenu est un cylindre de PVC dont les parois ont une faible épaisseur (2mm). La hauteur du cylindre est la même que celle du cylindre Proctor tandis que le diamètre du cylindre en PVC est de 153.5 mm soit 52.5 mm de plus que le cylindre Proctor.

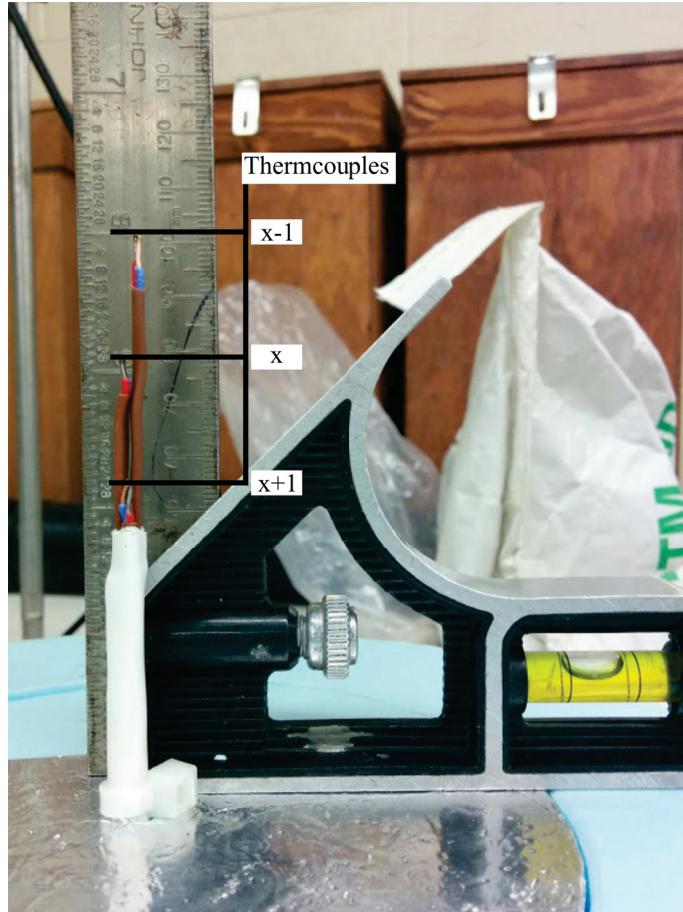


Figure 3.9 Photo des trois thermocouples

Pour ce qui est du compactage, la méthode choisie pour le compactage est celle du marteau à masse tombante avec 25 coups donnés sur chacune des 5 couches de matériaux. Un moule en béton a été conçu pour confiner le cylindre en PVC durant le compactage et la densité ciblée est celle obtenue lors des essais de conductivité thermique (Figure 3.10). En effet, pour chacun des essais de diffusivité thermique, la masse de matériau à préparer pour le compactage est calculée en fonction de la masse volumique ρ_d^λ obtenue lors de l'essai de conductivité thermique à la teneur en eau équivalente. Une fois qu'un essai de diffusivité thermique est terminé, le mélange compacté est pesé et la masse volumique sèche réelle est calculée. L'essai est retenu si la masse volumique sèche réelle ρ_d^α calculée correspond à celle obtenue lors de l'essai de conductivité thermique à plus ou moins 5% d'écart. Ce critère se traduit par la relation 3.10, définissant au

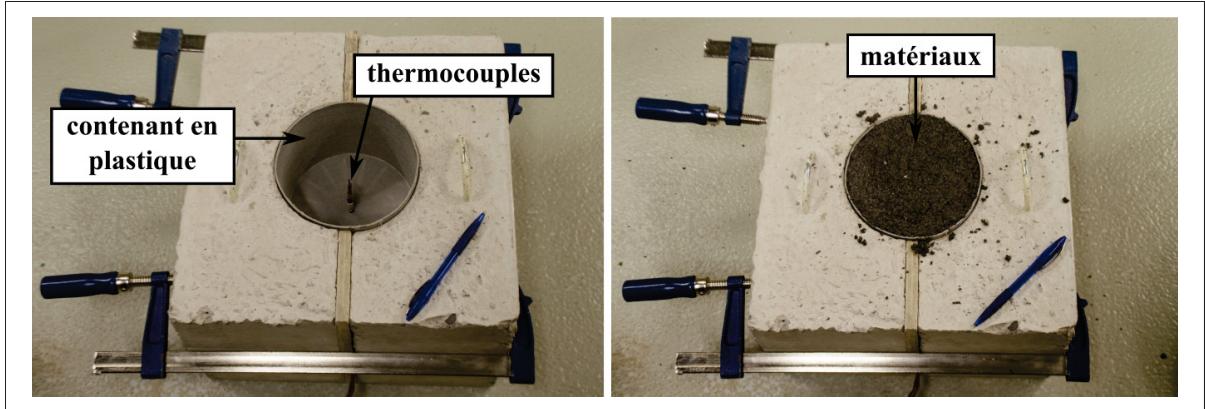


Figure 3.10 Photos du moule en béton servant à compacter les matériaux dans le contenant en plastique

passage le facteur χ .

$$\chi = \frac{\rho_d^\alpha}{\rho_d^\lambda} = 100\% \pm 5\% \quad (3.10)$$

3.3.3 Calibration

La phase de calibration a eu pour but de déterminer la bonne configuration et les bons matériaux à utiliser pour la mise au point du montage. Les essais de calibration ont été menés sur du sable d’Ottawa dont la diffusivité thermique est de $2,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à une densité de $1,650 \text{ g/cm}^3$ (Ukrainczyk (2009)).

Les résultats obtenus ont permis d’évaluer et de corriger plusieurs paramètres concernant le montage, les plus importants étant :

- l’espace entre les thermocouples ;
- la position des thermocouples le long de l’axe principal du cylindre ;
- l’espacement entre la lampe chauffante et la surface supérieure ;
- la nature du contenant (bois, PVC).

L'erreur relative $\delta\alpha_r$, définie par la relation 3.11, permet d'apprécier la précision de la mesure.

$$\delta\alpha_r = \left| \frac{\alpha_m - \alpha_c}{\alpha_c} \right| \quad (3.11)$$

La phase de calibration a également permis de déterminer la bonne démarche à suivre pour l'analyse des résultats. En effet, cet essai est nouveau au sein du LCMB et ne dispose pas de standard. Les essais de calibration ont donc été d'un grand secours pour connaître la bonne démarche à suivre pour l'analyse des résultats.

3.3.4 Analyse des résultats

3.3.4.1 Acquisition

Les 3 thermocouples présents au sein du matériau sont connectés à une boîte d'acquisition, elle-même branchée à l'ordinateur (Figure 3.11). LabView est le logiciel utilisé pour contrôler les thermocouples et collecter les valeurs de température au cours du temps. Une fois le mélange en place, les parois du contenant isolées thermiquement, la lampe en place et les thermocouples connectés, l'essai peut démarrer.

Un exemple de l'évolution de la température en fonction du temps est donné par la Figure 3.14. Ces données sont issues d'un essai de calibration effectué sur du sable d'Ottawa.

3.3.4.2 Calcul d' α

Comme cela a été décrit dans la section 3.3.1, la discréttisation de l'espace est donnée par l'espacement entre les thermocouples. De ce fait, d'après la Figure 3.8 nous avons :

$$\Delta x = 21 \cdot 10^{-3} m \quad (3.12)$$

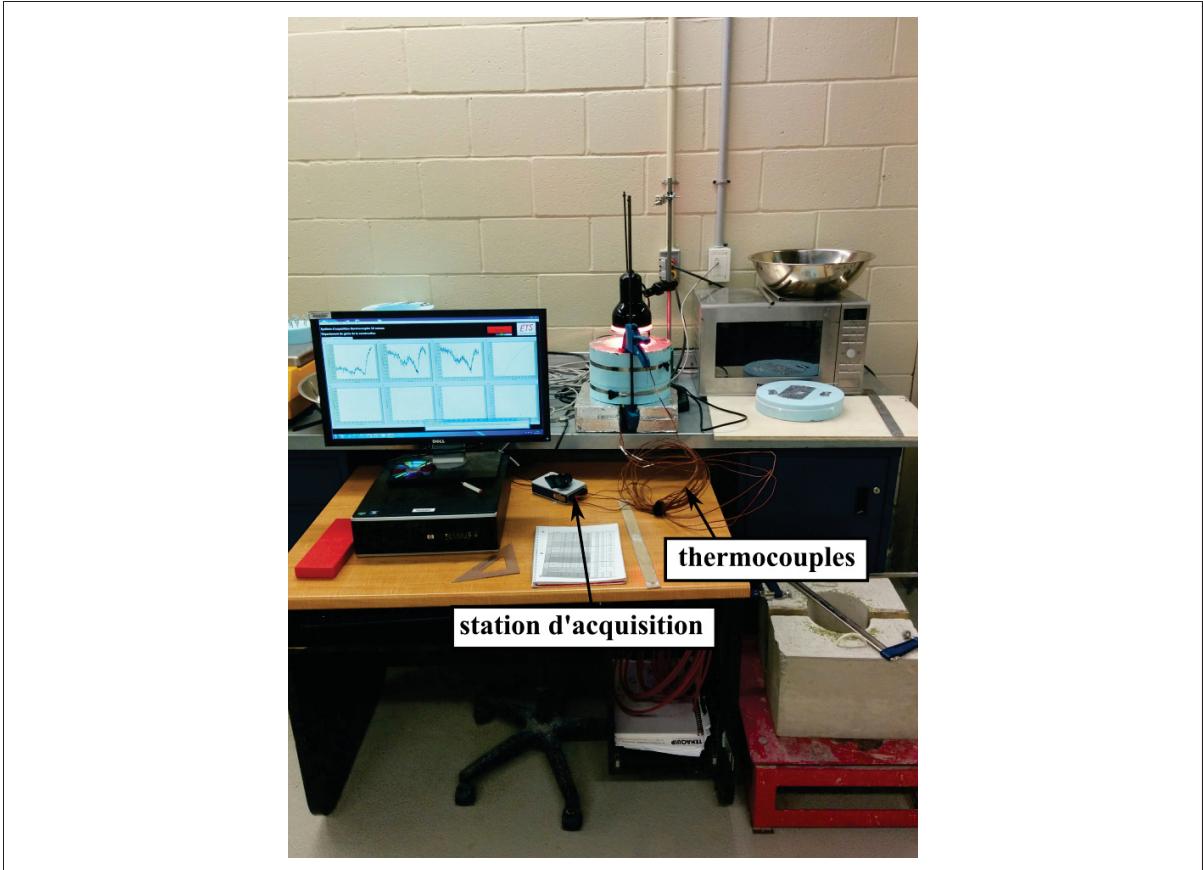


Figure 3.11 Photo du montage complet de l'essai diffusivité thermique

Le choix du pas de temps doit se faire en accord avec une condition de stabilité propre à la méthode choisie pour la résolution du problème posé. La stabilité est la propriété qui assure que la différence entre la solution numérique obtenue et la solution exacte des équations discrétisées est bornée (Goncalves (2005)). Pour des problèmes d'évolution temporelle, certains schémas sont stables à condition que le pas de temps soit inférieure à une certaine valeur critique fonction du pas d'espace. Dans notre cas elle s'écrit :

$$\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < 0,5 \quad (3.13)$$

La condition ci-dessus est vérifiée dans tous les essais effectués dans le cadre de ce projet de recherche. Le choix du pas de temps s'est donc fait en considérant l'évolution de l'erreur

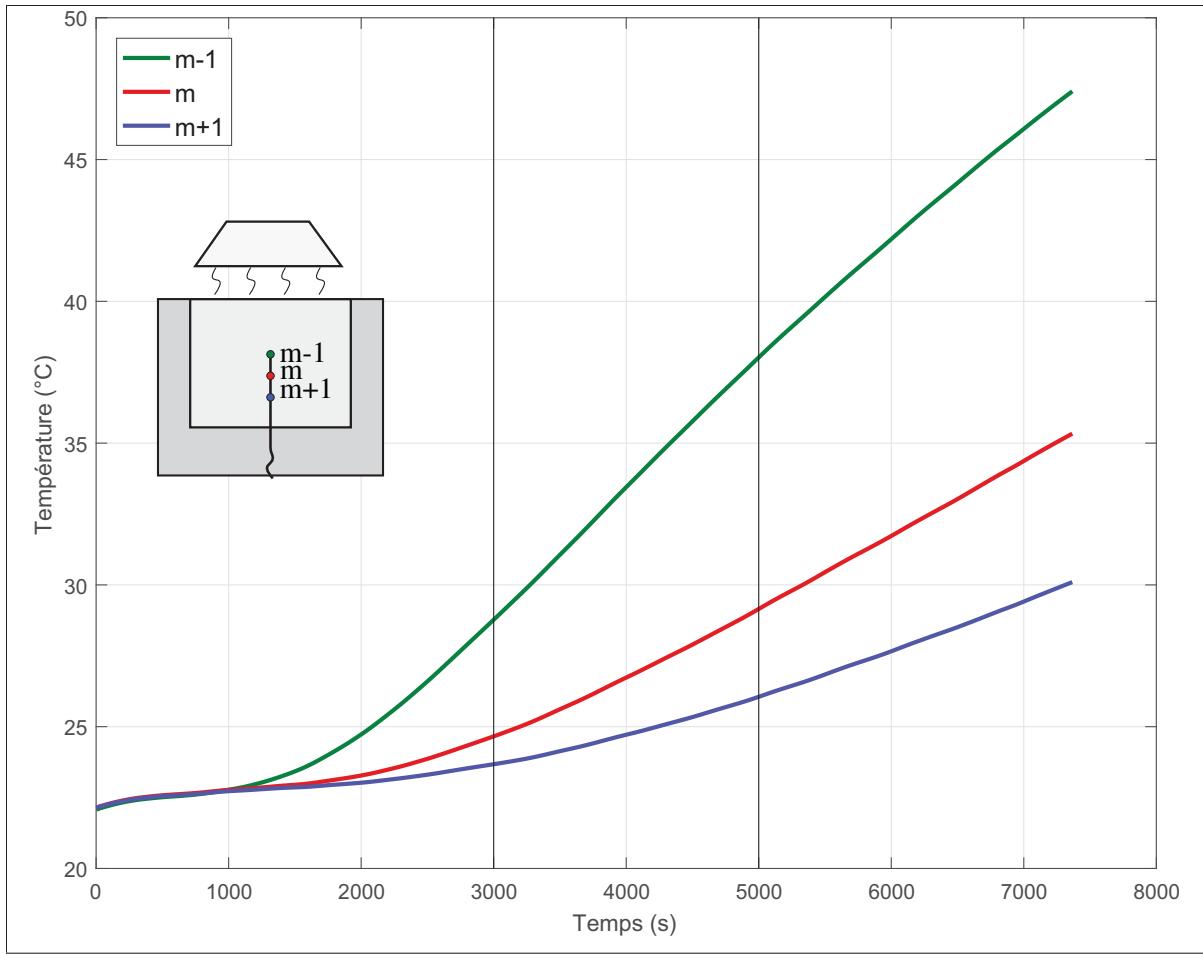


Figure 3.12 Variation de la température à trois profondeurs différentes en fonction du temps

relative des résultats d'essais de calibration en fonction du pas de temps et la valeur choisie est :

$$\Delta t = 100s \quad (3.14)$$

Étant donné que le calcul de la diffusivité thermique nécessite qu'il y ait une variation de la température aux trois points de mesure, il est naturel de ne considérer les valeurs de température qu'au-delà d'un certain temps. Sur la Figure 3.12, les deux segments verticaux délimitent la tranche temporelle qui est utilisée dans le calcul de la diffusivité. Cette portion de la courbe débute à $t_d = 3000s$ et se termine à $t_f = 5000s$.

Plaçons nous à $t=3000s$, nous avons alors que :

$$T(x, t) = T(m, 3000) = 24,66^\circ C$$

$$T(x, t + \Delta t) = T(m, 3100) = 24,83^\circ C$$

$$T(x - \Delta x, 3000) = T(m - 1, 3000) = 23,68^\circ C$$

$$T(x + \Delta x, 3000) = T(m + 1, 3000) = 28,77^\circ C$$

La relation 3.8 devient alors :

$$\frac{24,83 - 24,66}{100} = \alpha \frac{28,77 - 2 \cdot 24,66 + 23,68}{(21 \cdot 10^{-3})^2}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{24,83 - 24,66}{28,77 - 2 \cdot 24,66 + 23,68} \cdot \frac{(21 \cdot 10^{-3})^2}{100} \\ &= 2,40 \cdot 10^{-7} m^2/s \end{aligned}$$

En gardant le même pas de temps, le calcul précédent peut être répété en se plaçant à différentes positions le long de l'axe des temps. Dans notre cas, un calcul est effectué toutes les 100 secondes (notons ce temps de translation t_{dt}). En d'autres termes :

- à $t = 3000s$, $\alpha = 2,40 \cdot 10^{-7} m^2/s$;
- à $t = 3100s$, $\alpha = 2,35 \cdot 10^{-7} m^2/s$;
- à $t = 3200s$, $\alpha = 2,39 \cdot 10^{-7} m^2/s$;
- ...
- à $t = 5000s$, $\alpha = 2,04 \cdot 10^{-7} m^2/s$.

Ces différents résultats sont représentés sur la Figure 3.13 où figurent également la valeur cible de $2,33 \cdot 10^{-7} m^2/s$ ainsi que la moyenne arithmétique et une moyenne glissante des valeurs obtenues. Cette figure donne donc les valeurs de diffusivité thermique calculées dans l'intervalle de temps choisi précédemment ($[t_d; t_f]$) avec un espace entre chaque mesure qui vaut $t_{dt} = 100s$.

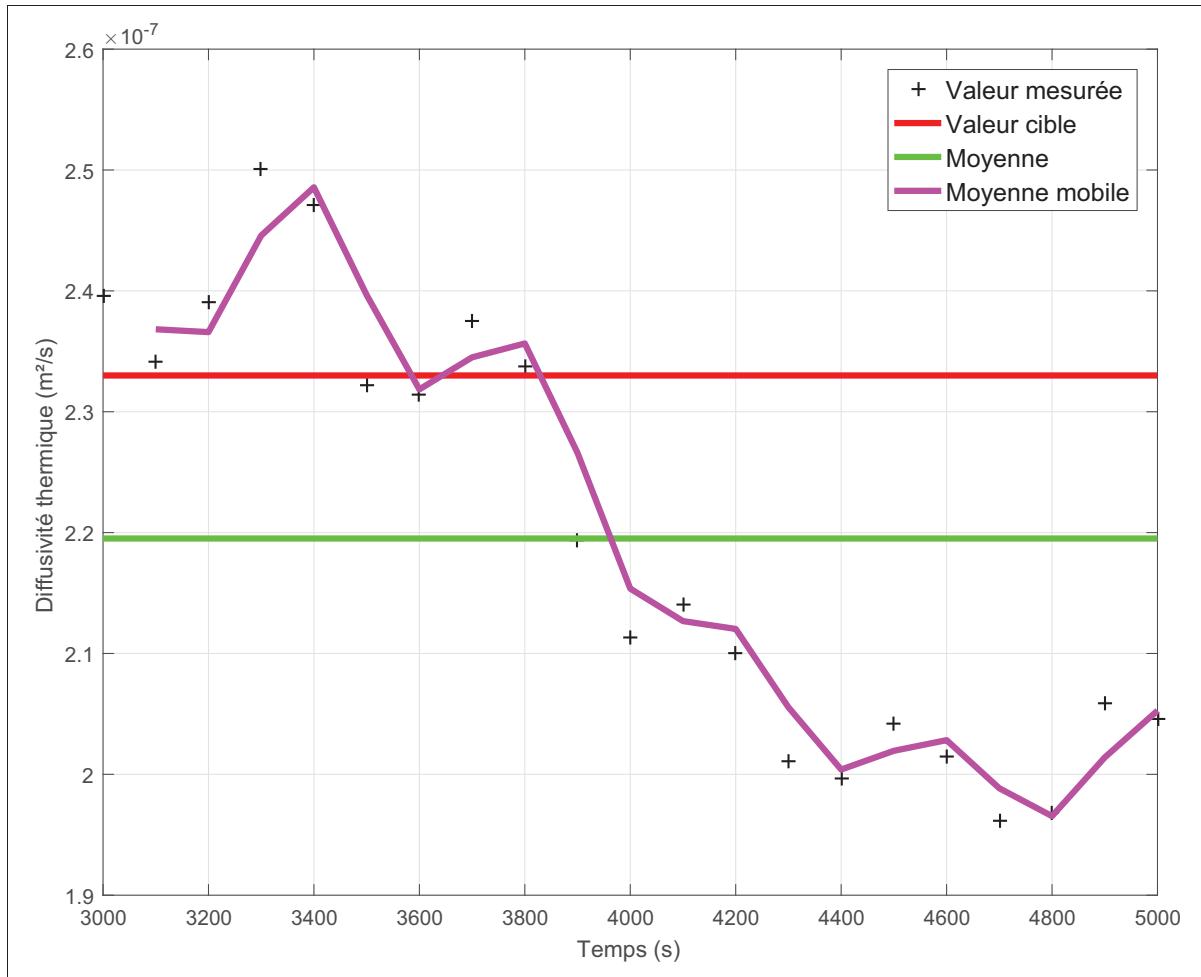


Figure 3.13 Variation de la diffusivité thermique en fonction du temps

En résumé, les paramètres choisis dans l'exemple de calcul ci-dessus sont : $\Delta x = 21 \cdot 10^{-3} m$; $t_d = 3000 s$; $t_f = 5000 s$; $\Delta t = 100 s$; $t_{dt} = 100 s$.

La valeur moyenne de diffusivité thermique obtenue est de $2,20 \cdot 10^{-7} m^2/s$, soit une erreur relative $\delta \alpha_r$ de 5,8% (relation 3.11).

La Figure 3.14 représente la valeur moyenne de diffusivité thermique obtenue suite aux calculs présentés ci-dessus ainsi que l'erreur relative associée.

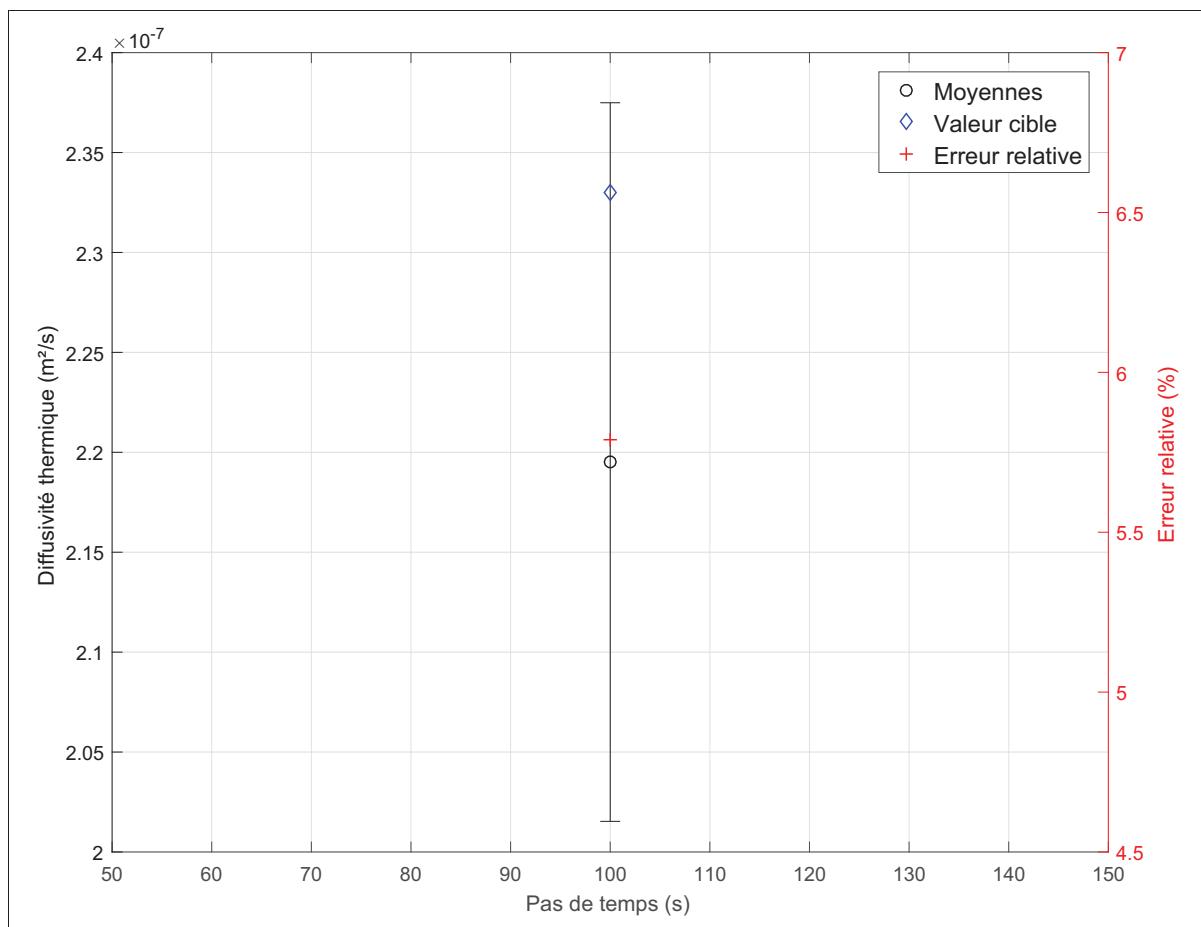


Figure 3.14 Valeur moyenne de la diffusivité thermique obtenue avec les paramètres donnés ci-dessus

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats obtenus lors des essais de conductivité et de diffusivité thermiques sont présentés dans ce chapitre. Pour chacun de ces paramètres, les résultats de la phase de calibration seront introduits dans un premier temps. Suivront ensuite les résultats relatifs à l'influence de la granulométrie puis ceux correspondant à l'influence de la nature minéralogique des granulats. Pour chacun de ces paramètres, l'influence de la teneur en eau a également été examinée et les résultats figureront dans chacune de ces sections. Enfin, une synthèse des résultats est proposée à la fin de chacune des sections sur les essais de conductivité et diffusivité thermiques.

4.1 Essais préliminaires : densité des particules sèches des mélanges

Des essais préliminaires aux essais thermiques ont été menés afin de déterminer la densité des particules sèches (d_s) de chacun des mélanges à l'étude. Il s'agit d'un paramètre important, permettant notamment d'accéder à d'autres paramètres géotechniques tels que le degré de saturation ou la porosité. La procédure suivie est celle fournie par le standard ASTM D854-14.

Les résultats des essais effectués sont donnés dans les Tableaux 4.1, 4.2 et 4.3. Pour chaque mélange, 3 essais furent réalisés et une valeur moyenne (\bar{d}_s) a été calculée.

Les résultats obtenus pour la pierre calcaire et le VPC indiquent une nette différence de densité entre les deux matériaux étudiés avec une plus faible densité dans le cas du VPC. Cette différence se répercute sur la densité des combinés avec une diminution de la densité lorsque la teneur en verre augmente. D'autre part, \bar{d}_s est d'autant plus grand que la taille des granulats est faible, et ce, aussi bien pour le VPC que pour la pierre calcaire.

Tableau 4.1 Densité des particules sèches pour les 3 classes de VPC à 20°C

Verre				
Classe	\bar{d}_s	s	Pycnomètre	d_s
1,25-5	2,453	0,103	#1	2,476
			#2	2,340
			#3	2,543
0,630-2,5	2,519	0,018	#1	2,538
			#2	2,515
			#3	2,505
0,08-1,25	2,523	0,007	#1	2,530
			#2	2,517
			#3	2,523

Tableau 4.2 Densité des particules sèches pour les 3 classes de pierre calcaire à 20°C

Pierre calcaire				
Classe	\bar{d}_s	s	Pycnomètre	d_s
1,25-5	2,765	0,012	#1	2,755
			#2	2,778
			#3	2,763
0,630-2,5	2,771	0,004	#1	2,773
			#2	2,773
			#3	2,766
0,08-1,25	2,774	0,004	#1	2,770
			#2	2,778
			#3	2,773

Tableau 4.3 Densité des particules sèches pour les différents combinés à 20°C

Mélanges mixtes				
Combiné	\bar{d}_s	s	Pycnomètre	d_s
75V/25P ⁽¹⁾	2,578	0,005	#1	2,584
			#2	2,574
			#3	2,576
50V/50P ⁽¹⁾	2,615	0,006	#1	2,619
			#2	2,609
			#3	2,617
25V/75P ⁽¹⁾	2,708	0,018	#1	2,691
			#2	2,726
			#3	2,706

⁽¹⁾ proportions massiques

4.2 Résultats des essais de conductivité thermique

4.2.1 Phase de calibration

Afin d'évaluer la précision des mesures obtenues à l'aide de la sonde TR-1, des essais de calibration sur du sable d'Ottawa ont été menés. La valeur de conductivité thermique visée est rappelée dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Conductivité thermique du sable d'Ottawa

Matériau	λ (W/(m.K))	ρ (g/cm ³)	n	Référence
Sable d'Ottawa	0,254	1,65	0,4	Tarnawski <i>et al.</i> (2009)

Le sable d'Ottawa étant le matériau choisi comme référence pour définir le facteur de correction, il a été placé dans les mêmes conditions que celles des mélanges à l'étude. De ce fait, le sable d'Ottawa fut placé dans le moule proctor qui a servi pour les essais subséquents et de sorte à obtenir la masse volumique cible ($\rho_{cible} = 1,65$ g/cm³).

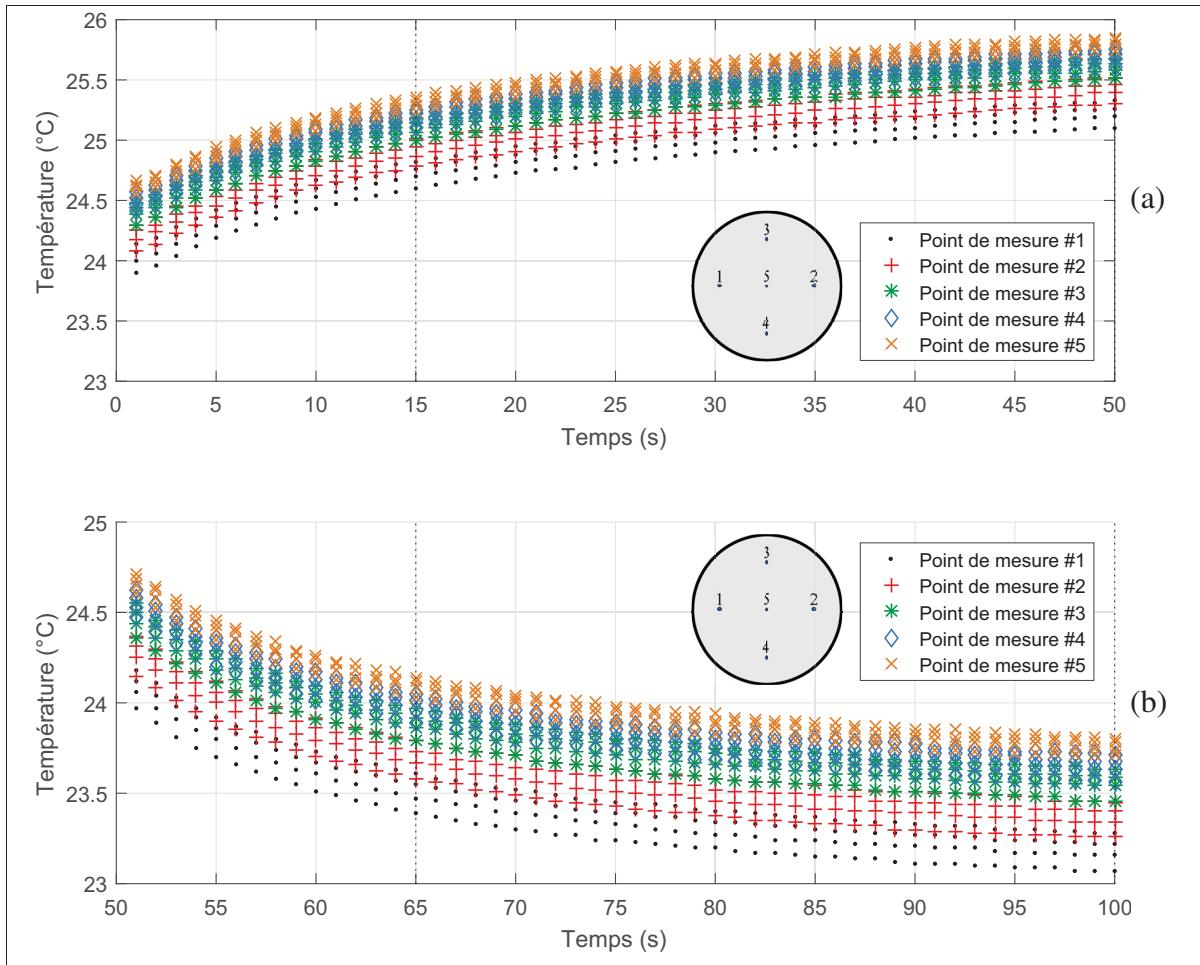


Figure 4.1 Évolution de la température en fonction du temps : (a) phase de chauffage (heating) (b) phase de repos (cooling)

A la suite d'une mesure, les données brutes obtenues en sortie sont des valeurs de température enregistrées à une seconde d'intervalle et pendant les 100 secondes que dure la mesure. Rapelons rapidement la méthode de calcul de la conductivité thermique : une mesure comprend une phase de chauffage (heating phase : h) d'une durée $\tau_h = 50s$ et une phase de repos (cooling phase : c) d'une durée identique ($\tau_c = 50s$). La Figure 4.1 représente les résultats d'un essai comprenant les 20 différentes mesures effectuées aux 5 points de mesure à mi-hauteur, suivant la configuration présentée à la Figure 3.2 (4 mesures par point). Les deux phases se succèdent dans le temps, mais sont ici représentées sur des graphiques différents. La partie de la courbe qui entre dans la calcul de λ est comprise entre les deux lignes verticales pointillées (.....).

La Figure 4.2 donne la variation de température dans les plans $(T, \ln(t))$ et $(T, \ln(t)/(t - \tau_h))$ pour respectivement la phase de chauffage (Figure 4.2 (a) et (c)) et la phase de repos (Figure 4.2 (b) et (d)). Les Figures 4.2 (c) et (d) en particulier représentent la partie quasi-stationnaire de chacune des phases, dont la pente correspond respectivement à S_h et S_c (h : heating ; c : cooling).

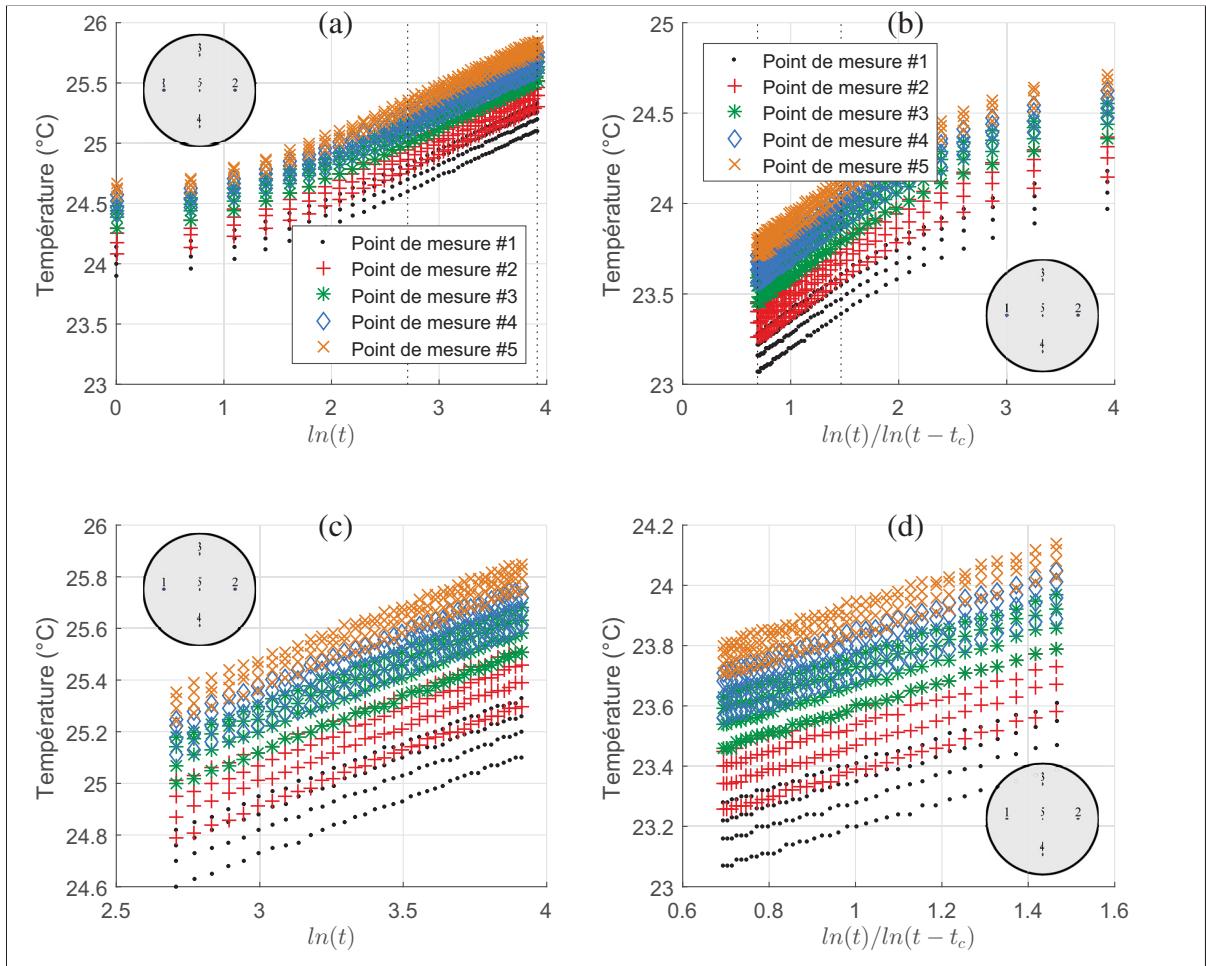


Figure 4.2 Exemple de résultats d'un essai de conductivité thermique : les 20 courbes sur chacun des graphiques représentent les 20 mesures effectués (5 points de mesure et 4 mesures par point de mesure). (a) et (c) phase de chauffage, (b) et (d) phase de repos

Selon si on considère uniquement la phase de chauffage dans le calcul de la conductivité thermique ou si on prend en compte également la phase de repos, il est possible d'obtenir deux

valeurs distinctes de λ , notées respectivement λ_h et λ_{hc} telles que :

$$\lambda_h = \frac{q}{4\pi S_h} \quad \lambda_{hc} = \frac{q}{2\pi(S_h + S_c)} \quad (4.1)$$

La Figure 4.3 donnent un exemple des valeurs de λ_h et λ_{hc} obtenues lors d'un essai de conductivité thermique sur le sable d'Ottawa ; la valeur cible y est également représenté. Les conductivités thermiques moyennes obtenues durant cet essai sont :

$$\overline{\lambda_h} = 0,287 \quad W/(m.K) \quad \overline{\lambda_{hc}} = 0,210 \quad W/(m.K) \quad (4.2)$$

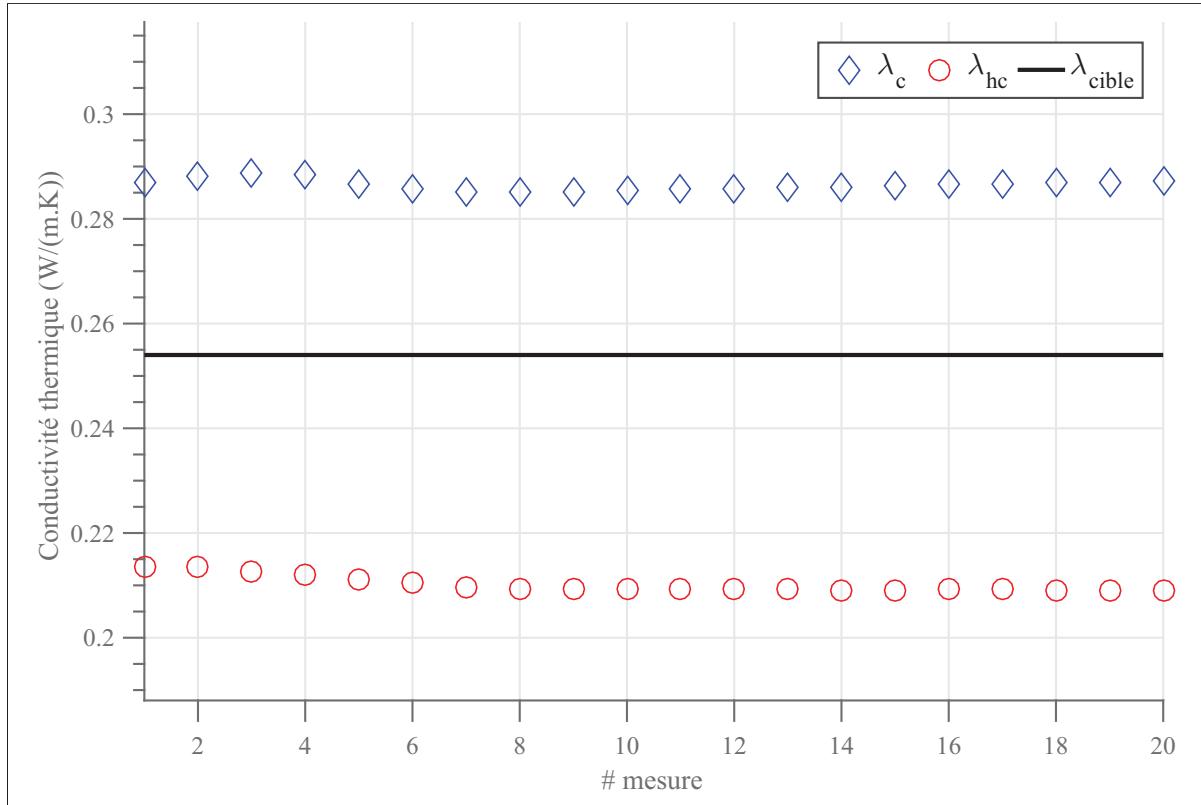


Figure 4.3 Résultats des essais de conductivité thermique obtenus pour chacune des 20 mesures de l'essai # 4

Ce sont au total 5 essais différents qui ont été réalisés sur le sable d’Ottawa, donnant lieu à 5 couples de conductivité thermique moyenne ($\bar{\lambda}_h$, $\bar{\lambda}_{hc}$). Ces valeurs sont représentées sur la Figure 4.4 avec également les valeurs moyennes du facteur de correction associé à chacune des deux méthodes de calcul.

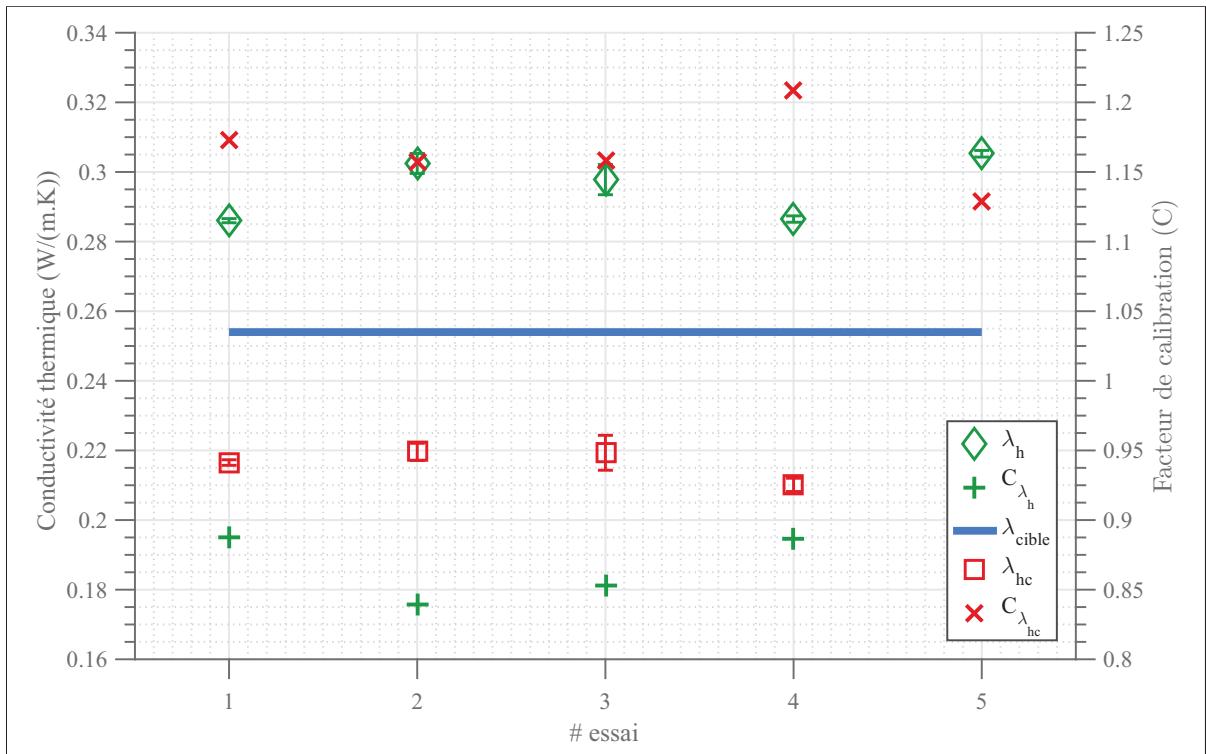


Figure 4.4 Résultats des essais de conductivité thermique sur le sable d’Ottawa

Le Tableau 4.5 donne un récapitulatif des résultats obtenus lors de ces essais de calibration avec $\bar{\lambda}_h$, s , C_{λ_h} respectivement la conductivité thermique, l’écart type et le facteur de correction associé à la première méthode ($S = S_c$). $\bar{\lambda}_{hc}$, s , $C_{\lambda_{hc}}$ sont les équivalents pour la deuxième méthode de calcul ($S = (S_h + S_c)/2$). C’est la moyenne des facteurs de calibration qui est retenue pour le calcul des conductivités thermiques des mélanges à l’étude :

$$C_{\lambda_h} = \frac{0.254}{0.296} = 0,858 \quad C_{\lambda_{hc}} = \frac{0.254}{0.218} = 1,165 \quad (4.3)$$

Tableau 4.5 Récapitulatif des conductivités thermiques moyennes obtenues lors des 5 essais (#1 à #5) de conductivité thermique sur le sable d’Ottawa ($\lambda_{cible} = 0,254 \text{ W/(m.K)}$)

# Essai	$\overline{\lambda}_h$ s		C_{λ_h}	$\overline{\lambda}_{hc}$ s		$C_{\lambda_{hc}}$
	W/(m.K)	-		W/(m.K)	-	
# 1	0,286	0,001	0,888	0,217	0,001	1,173
# 2	0,302	0,003	0,840	0,220	0,003	1,157
# 3	0,298	0,004	0,853	0,219	0,005	1,158
# 4	0,287	0,001	0,887	0,210	0,002	1,209
# 5	0,305	0,001	0,832	0,223	0,002	1,129
Moyennes	0,296	0,002	0,859	0,218	0,003	1,165

Lors des essais de conductivité thermique sur les matériaux à l’étude dans ce projet de recherche, la valeur mesurée ($\lambda_h^{mesuree}$ ou $\lambda_{hc}^{mesuree}$) sera alors multiplié par le facteur de correction correspondant, afin d’obtenir une valeur dite corrigée (Équation 4.4).

$$\lambda_h^{corr} = \lambda_h^{mesuree} \cdot C_{\lambda_h} \quad \lambda_{hc}^{corr} = \lambda_{hc}^{mesuree} \cdot C_{\lambda_{hc}} \quad (4.4)$$

4.2.2 Influence de la taille des granulats

L’influence de la granulométrie a été évaluée au travers des essais effectués sur les 3 classes granulométriques. Les résultats des essais sont présentés dans cette partie avec une section par matériaux (VPC et pierre calcaire). Les 3 classes granulométriques sont définies dans le Tableau 4.6.

Pour rappel, la procédure suivie lors de la réalisation des essais de conductivité thermique est la suivante :

- le matériaux est préparé à la teneur en eau ciblée ;
- après compactage dans le moule Proctor, 20 mesures de conductivité thermique sont effectuées ; soit 4 mesures à 5 emplacements différents dans le matériaux ;

- la moyenne des 20 valeurs obtenues est alors calculée ($\bar{\lambda}_h$; $\bar{\lambda}_{hc}$) puis corrigée à l'aide du facteur de correction correspondant ($\bar{\lambda}_h^{corr}$; $\bar{\lambda}_{hc}^{corr}$).

Tableau 4.6 Subdivision granulométrique à l'étude

# Classes	Description
# 1 : 0,08-1,25	retenu 0,08 mm, passant 1,25 mm
# 2 : 0,630-2,5	retenu 0,630 mm, passant 2,5 mm
# 3 : 1,25-5	retenu 1,25 mm, passant 5 mm

4.2.2.1 Résultats sur la pierre calcaire

Les résultats obtenus lors des essais effectués sur les 3 classes granulométriques de pierre calcaire sont donnés dans le Tableau 4.7. Ce tableau précise également, pour chaque essai, la masse volumique sèche ρ_d , la teneur en eau volumique θ , la porosité n ainsi que le degré de saturation S_r obtenus ; les relations associées aux trois derniers paramètres sont les suivantes :

$$\theta (\%) = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad ; \quad n (\%) = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad ; \quad S_r (\%) = \frac{w}{e} \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

avec w la teneur en eau massique, ρ_w la masse volumique de l'eau, e l'indice des vides, et ρ_s la masse volumique des particules solides.

Ces résultats sont également représentés graphiquement sur la Figure 4.5 avec l'évolution de la conductivité thermique donnée en fonction de la teneur en eau volumique (θ).

A l'état sec ($\theta = 0\%$), la conductivité thermique de la classe 1 semble être plus élevée que celle des classes 2 et 3 qui sont quant à elles relativement proches l'une de l'autre avec néanmoins une valeur légèrement plus élevée pour la classe 2 comparée à la classe 3.

Comme cela a été indiqué dans la section 1.4.3.2, l'augmentation de la teneur en eau dans un milieu poreux entraîne une augmentation de la conductivité thermique. C'est en effet ce qui est observé pour les 3 classes de pierre calcaire. Autant l'impact de la taille des granulats est

Tableau 4.7 Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de pierre calcaire

Pierre calcaire	ρ_d	θ	n	S_r	λ_h^{corr}	s	λ_{hc}^{corr}	s
	g/cm ³	%			W/(m.K)			
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,94	0,0	30,1	0,0	0,265	0,003	0,251	0,003
	1,86	9,3	33,1	28,1	1,202	0,024	1,251	0,031
	1,86	17,7	32,8	53,9	1,508	0,052	1,519	0,015
	1,81	29,0	34,7	83,4	1,513	0,047	1,540	0,018
	1,68	35,2	39,5	89,1	1,439	0,020	1,504	0,050
	1,50	42,4	46,1	92,0	1,359	0,015	1,281	0,010
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,71	0,0	38,3	0,0	0,166	0,001	0,156	0,001
	1,65	15,5	40,6	38,1	1,158	0,017	1,217	0,010
	1,67	24,2	39,8	60,8	1,438	0,038	1,546	0,053
	1,70	33,1	38,7	85,6	1,546	0,022	1,317	0,048
	1,63	37,6	41,0	91,6	1,328	0,020	1,301	0,006
1,25-5 mm (classe #3)	1,70	0,0	38,5	0,0	0,140	0,004	0,131	0,003
	1,68	12,9	39,2	33,0	0,726	0,035	0,697	0,030
	1,70	26,6	38,4	69,3	1,067	0,052	1,058	0,033
	1,70	33,6	38,6	86,2	1,315	0,034	1,305	0,019
	1,59	38,7	42,4	91,3	1,244	0,010	1,216	0,013

relativement faible pour $\theta = 0\%$, autant elle se fait plus marquée dès que l'eau est introduite dans le milieu. Cette distinction se fait ressentir d'ailleurs très tôt avec une séparation nettement visible entre les trois différentes classes (Figure 4.5). La conductivité thermique est ainsi plus élevée dans le cas de la classe 1 et tend à diminuer à mesure que la taille des granulats augmente. Tandis que la conductivité thermique de la classe 3 continue de grimper à mesure que la teneur en eau volumique augmente, celle de la classe 1 et 2 atteint "rapidement" une valeur maximale. De plus, notons que la conductivité thermique des 3 classes semble atteindre un palier au bout d'une certaine teneur en eau volumique qui correspond à un degré de saturation proche de 100%. Nous remarquons en effet que ce palier est plus ou moins le même pour les 3 classes et se situe autour de 1,4 – 1,5 W/(m.K) et est atteint pour un degré de saturation d'environ 80% ($\theta \simeq 30\%$). Au-delà de $S_r = 80\%$, la conductivité thermique se stabilise et semble

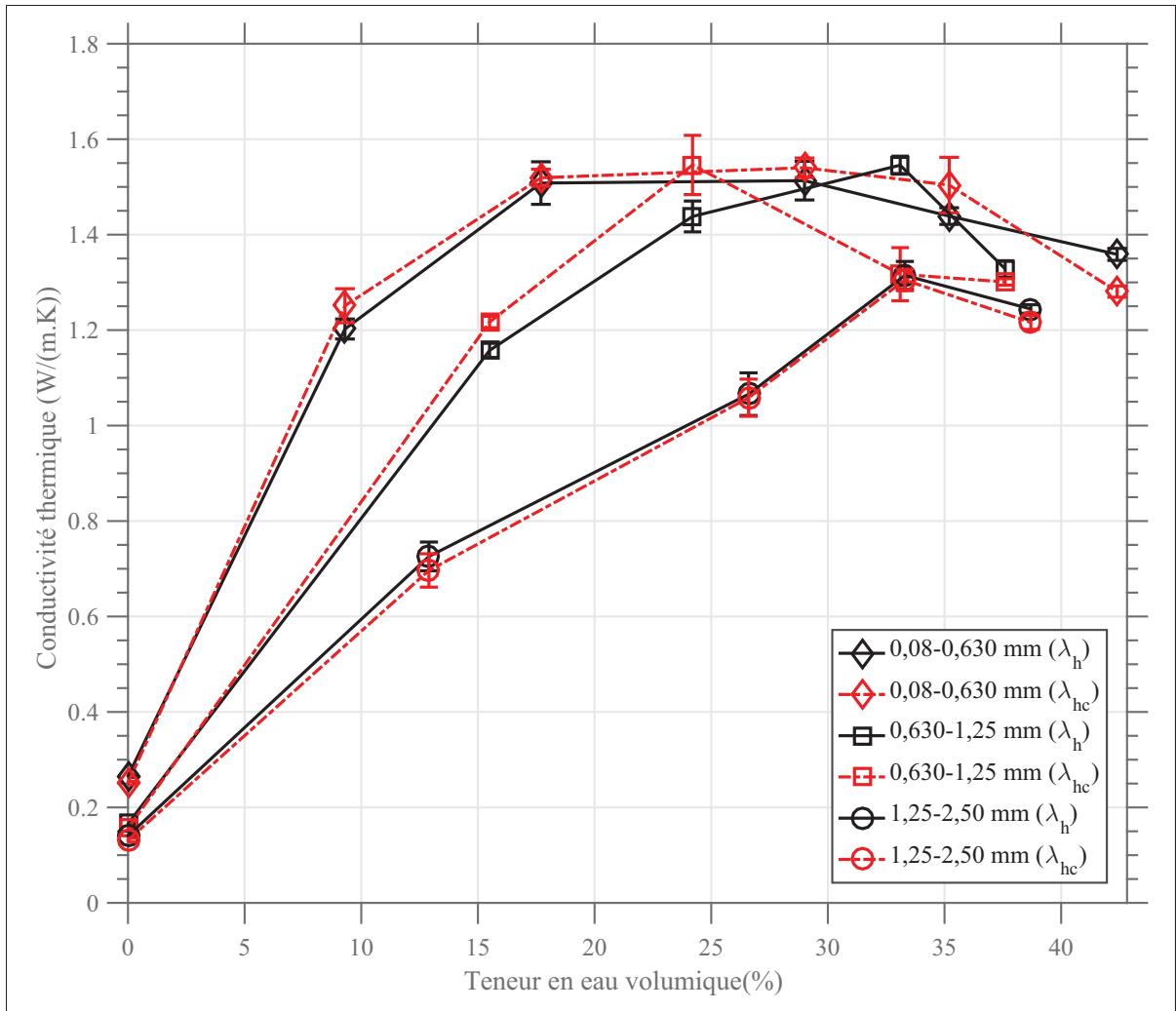


Figure 4.5 Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 différentes classes granulométriques de pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique

même chuter lorsque le degré de saturation s'approche de 100 %. Cette chute de la conductivité thermique est corrélée à la diminution de la masse volumique sèche ρ_d et à l'augmentation de la porosité.

4.2.2.2 Résultats sur le VPC

Le Tableau 4.8 regroupe les valeurs de conductivité thermique mesurées sur les 3 classes granulométriques de VPC ; la mesure de teneur en eau volumique ainsi que les calculs de ρ_d , n

Tableau 4.8 Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de VPC

VPC	ρ_d	θ	n	S_r	λ_h^{corr}	s	λ_{hc}^{corr}	s
	g/cm ³	%			W/(m.K)			
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,80	0,0	28,7	0,0	0,245	0,003	0,242	0,001
	1,73	14,3	31,6	45,4	0,598	0,013	0,583	0,010
	1,73	25,1	31,5	79,6	0,691	0,010	0,706	0,008
	1,61	31,3	36,3	86,2	0,793	0,009	0,811	0,005
	1,41	40,4	44,3	91,2	0,778	0,004	0,799	0,003
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,49	0,0	40,9	0,0	0,152	0,002	0,150	0,001
	1,50	11,9	40,4	29,4	0,418	0,007	0,434	0,003
	1,46	24,5	42,2	57,9	0,574	0,004	0,584	0,003
	1,50	34,8	40,4	86,3	0,703	0,004	0,706	0,004
	1,43	38,7	43,1	89,8	0,729	0,011	0,766	0,004
1,25-5 mm (classe #3)	1,52	0,0	38,0	0,0	0,135	0,005	0,129	0,004
	1,52	11,6	37,9	30,6	0,352	0,013	0,348	0,012
	1,54	23,9	37,2	64,3	0,512	0,004	0,515	0,004
	1,56	32,8	36,3	90,3	0,722	0,006	0,717	0,006
	1,43	38,7	41,6	93,1	0,683	0,015	0,675	0,013

et S_r sont également indiqués dans ce tableau. Sur la Figure 4.6 sont tracées les valeurs de conductivité thermique en fonction de θ .

À l'état sec, les classes 2 et 3 montrent des conductivités thermiques proches, tandis que celle de la classe 1 (0,08-1,25 mm) est légèrement plus élevée. Ce comportement est similaire à celui de la pierre calcaire et une interprétation est formulée dans la section de synthèse (*voir* section 6.1). À mesure que θ augmente, la conductivité thermique augmente et les écarts entre les différentes classes restent relativement les mêmes. Les conductivités thermiques de la classe 1 sont ainsi plus élevées que celles de la classe 2 qui quant à elles sont plus grandes que celles obtenues pour la classe 3 avec tout de même un moindre écart entre ces deux dernières. La conductivité thermique la plus élevée est obtenue dans le cas de la classe 1 (0,08-1,25 mm) : $[\lambda_h^{corr} = 0,793; \lambda_{hc}^{corr} = 0,811] \text{W/(m.K)}$ obtenues à $\theta = 31,3\%$. Notons enfin que les valeurs

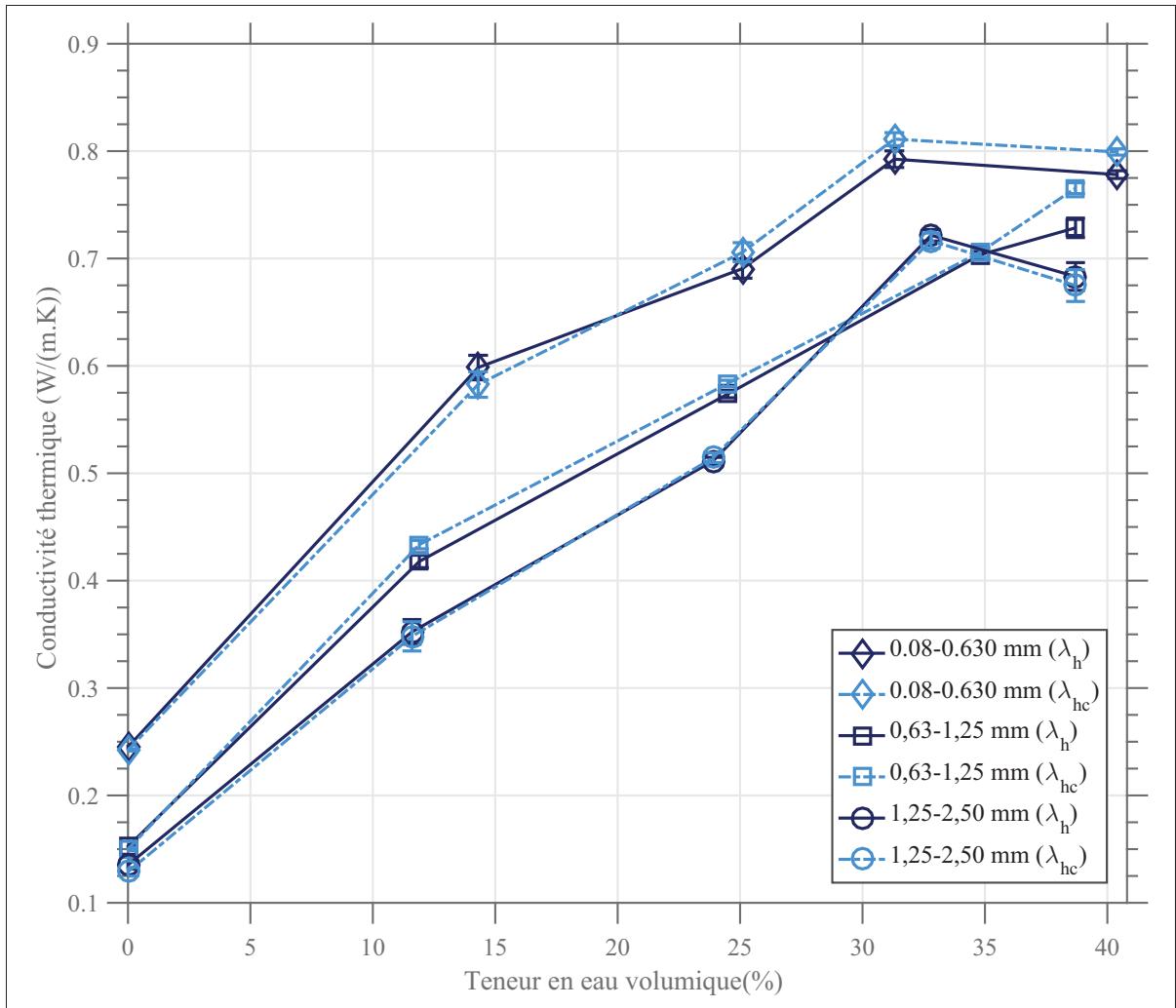


Figure 4.6 Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 différentes classes granulométriques de VPC en fonction de la teneur en eau volumique

obtenues pour la classe 3 à $\theta = 32,8\%$ ($[\overline{\lambda_h^{corr}} = 0,722; \overline{\lambda_{hc}^{corr}} = 0,717]$ W/(m.K)) semblent être une valeur aberrante au vu de la tendance générale des courbes (Figure 4.6). Cet essai devrait donc être retiré de l'analyse ou refait par précaution.

4.2.3 Influence de la nature minéralogique

L'étude de l'impact de l'ajout de VPC dans un mélange granulaire s'est fait au travers de 3 mélanges contenant différents pourcentages de VPC par rapport à de la pierre calcaire. Ces mélanges sont rappelés dans le Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Mélanges considérés (exprimés en pourcentage massique)

Dénomination	Description
75V/25P	75% de granulats de VPC et 25% de pierre calcaire
50V/50P	50% de granulats de VPC et 50% de pierre calcaire
25V/75P	25% de granulats de VPC et 75% de pierre calcaire

Tableau 4.10 Résultats des essais de conductivité thermique menés sur les différents combinés choisis

Pierre calcaire	ρ_d	θ	n	S_r	$\bar{\lambda}_h^{corr}$	s	$\bar{\lambda}_{hc}^{corr}$	s
	g/cm ³		%			W/(m.K)		
25V/75P	1,93	0,0	28,7	0,0	0,258	0,006	0,248	0,005
	1,92	8,8	29,0	30,4	0,980	0,026	1,022	0,026
	1,94	16,5	28,2	58,6	1,371	0,026	1,237	0,036
	1,87	27,4	31,1	88,2	1,336	0,083	1,138	0,006
	1,63	35,9	39,8	90,2	1,173	0,026	1,234	0,014
50V/50P	1,91	0,0	27,0	0,0	0,229	0,007	0,209	0,005
	1,80	9,7	31,1	31,3	0,599	0,018	0,614	0,015
	1,91	15,9	26,9	59,0	0,865	0,043	0,867	0,034
	1,81	26,0	29,6	87,6	0,958	0,034	0,951	0,015
	1,66	32,3	36,6	88,2	0,931	0,007	0,938	0,014
75V/25P	1,89	0,0	26,7	0,0	0,215	0,004	0,203	0,004
	1,85	8,1	28,3	28,8	0,377	0,010	0,401	0,009
	1,88	13,9	27,0	51,5	0,540	0,056	0,519	0,047
	1,81	25,7	29,7	86,7	0,897	0,009	0,836	0,010
	1,63	35,9	36,7	97,7	0,954	0,015	0,938	0,006

Le Tableau 4.10 donne le résultats des mesures de la conductivité thermique menées sur les 3 différents combinés et la Figure 4.7 représente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique.

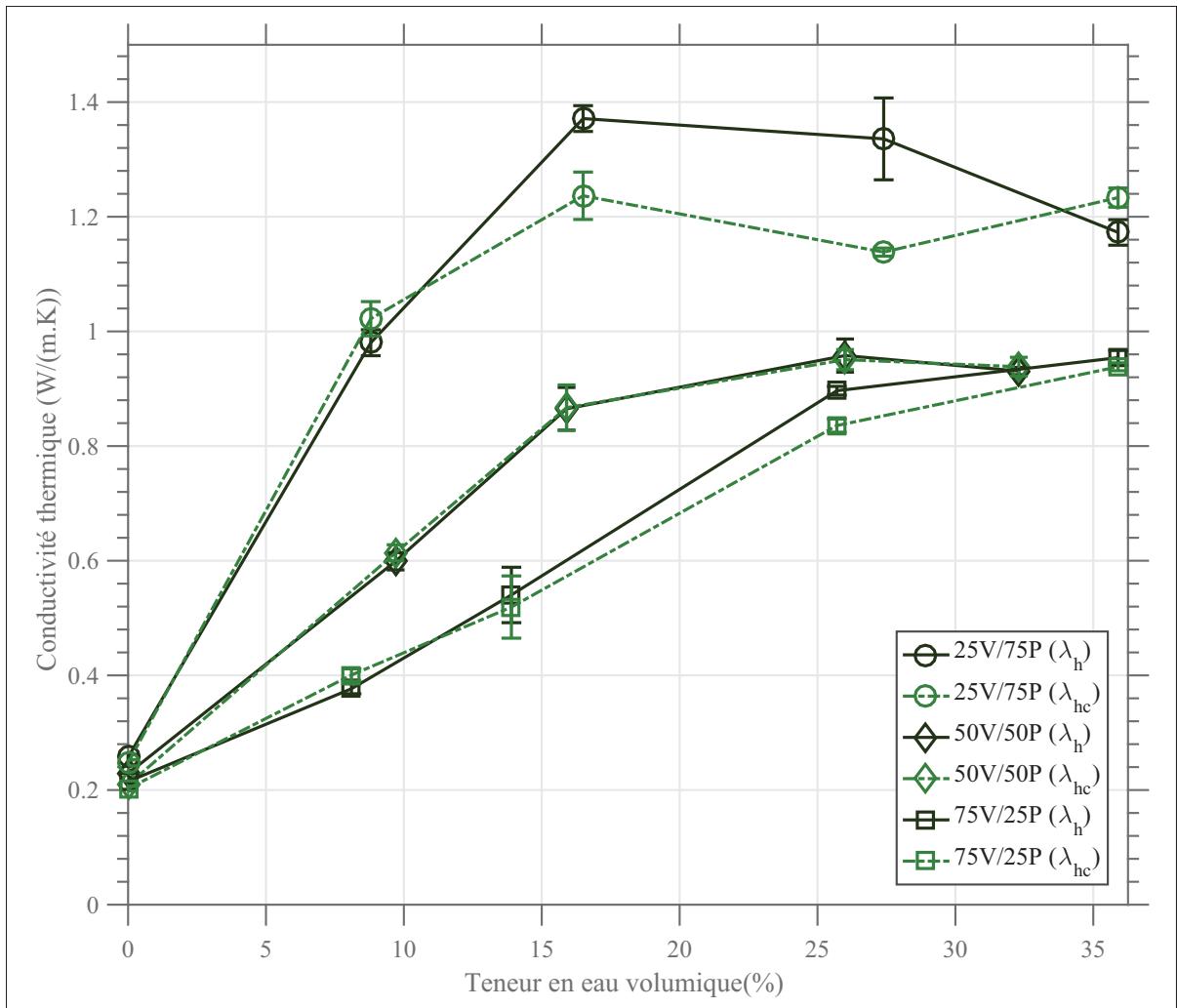


Figure 4.7 Résultats des essais de conductivité thermique sur les 3 combinés en fonction de la teneur en eau volumique

À l'état sec ($\theta = 0\%$), les conductivités thermiques des 3 combinés sont relativement proches. L'augmentation de la teneur en eau entraîne la hausse de la conductivité thermique des 3 combinés avec un taux d'accroissement différent en fonction des proportions de VPC et de pierre calcaire. En effet, la conductivité thermique du combiné comprenant le plus de pierre (25V/75P)

augmente rapidement avec l'augmentation de la teneur en eau et atteint une valeur palier de l'ordre de $1,2 - 1,3 \text{ W/(m.K)}$ à partir de $\theta \simeq 16\%$. Comparé avec le combiné 25V/75P, la conductivité thermique des mélanges 50V/50P et 75V/25P augmente moins rapidement avec néanmoins une conductivité thermique plus élevée pour le mélange 50V/50P par rapport au mélange 75V/25P pour les valeurs intermédiaires de θ . En revanche, la conductivité thermique de ces deux derniers mélanges semble converger vers une valeur commune d'environ 0,95 W/(m.K) . La valeur maximale de conductivité thermique est de $[\bar{\lambda}_h^{corr} = 1,371; \bar{\lambda}_{hc}^{corr} = 1,237] \text{ W/(m.K)}$ et elle est obtenue par le mélange 25V/75P à $\theta = 27,4\%$.

4.3 Résultats des essais de diffusivité thermique

4.3.1 Phase de calibration

Le principe de la méthode a été présenté dans la section 3.3. S'agissant d'un essai ne disposant pas de standard ou de norme, une phase préliminaire de calibration a été nécessaire afin de déterminer la bonne configuration et la bonne démarche à suivre pour la réalisation de cet essai. La diffusivité thermique du sable d'Ottawa étant bien documenté, il a été utilisé pour la calibration du dispositif (Tableau 4.11).

Tableau 4.11 Diffusivité thermique du sable d'Ottawa

Matériaux	$\alpha_{cible} (\text{m}^2/\text{s})$	Condition	Référence
Sable d'Ottawa	$2,33 \cdot 10^{-7}$	$\rho = 1,65 \text{ g/cm}^3$	Ukrainczyk (2009)

De nombreux essais ont dans un premier temps été nécessaires afin d'ajuster les différents paramètres de l'essai tels que la position relative des 3 thermocouples ou l'emplacement de la lampe chauffante (*voir* section 3.3.3). Pour les besoins de la calibration, 5 essais indépendants, mais néanmoins réalisés dans les mêmes conditions, ont été effectués. Pour chaque essai, plusieurs valeurs de diffusivité thermique. Le Tableau 4.12 donne les valeurs moyennes de diffusivité thermique ($\bar{\alpha}$) obtenues pour les 5 essais effectués.

Tableau 4.12 Récapitulatif des résultats obtenus lors des 5 essais de diffusivité thermique sur le sable d’Ottawa ($\alpha_{cible} = 2,33 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

# Essai	$\bar{\alpha}$	s	$\delta\alpha_r^{(1)}$
	$\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	%	
# 1	2,20	0,18	5,8
# 2	2,22	0,18	5,8
# 3	2,42	0,17	3,8
# 4	2,47	0,15	6,1
# 5	2,39	0,22	2,3
Moyennes	2,34	0,18	4,5

⁽¹⁾ Erreur relative : $\delta\alpha_r = 100 \cdot (|\bar{\alpha} - \alpha_{cible}|) / \alpha_{cible}$

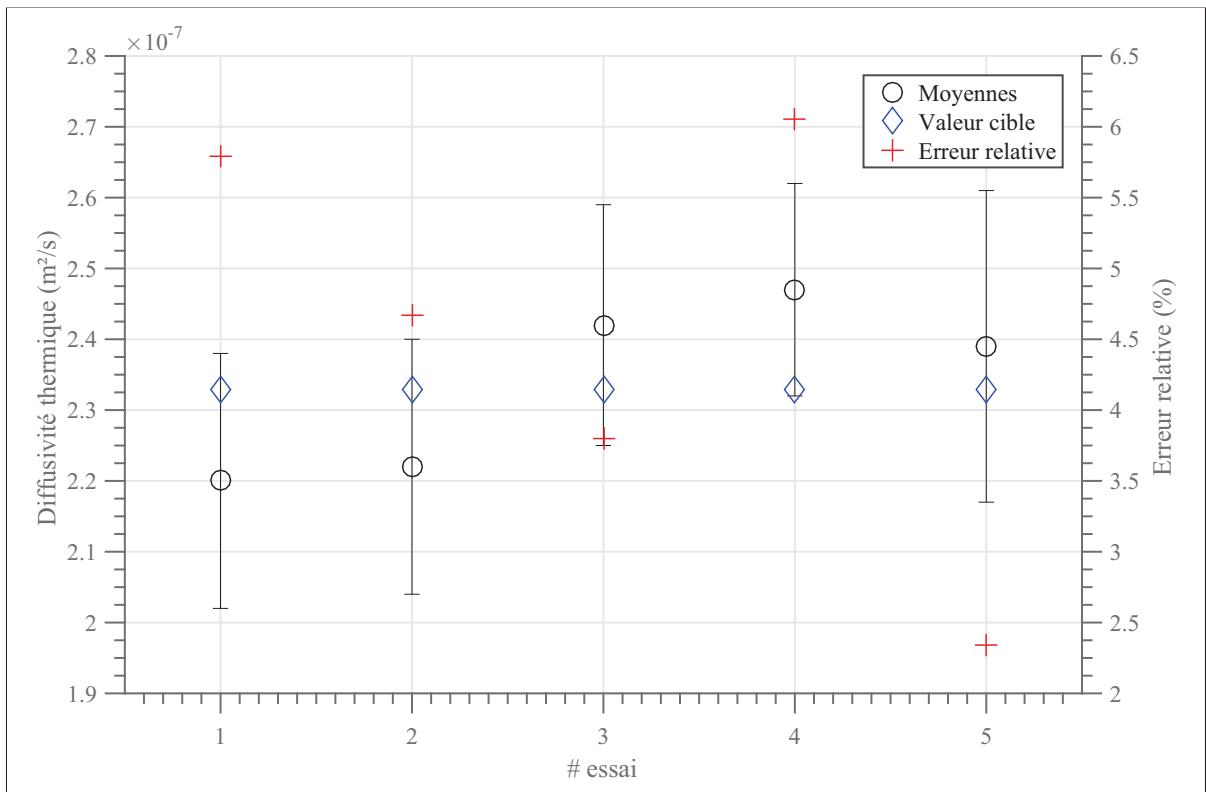


Figure 4.8 Résultats des essais de diffusivité thermique sur le sable d’Ottawa

Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions et le calcul de la diffusivité thermique s'est fait en suivant la procédure présentée dans la section 3.3.4.2. La Figure 4.8 représente

graphiquement les résultats du tableau précédent. La précision des mesures est dans l'ensemble assez bonne avec une erreur relative moyenne de 4,5% par rapport à la valeur cible. Suite à ces essais, cette version du montage a été jugée apte à l'utilisation avec les mélanges à l'étude.

4.3.2 Influence de la taille des granulats

4.3.2.1 Résultats sur la pierre calcaire

Le Tableau 4.13 regroupe les résultats de diffusivité thermique obtenus sur les trois classes granulométriques de pierre calcaire. Ce Tableau indique également les masses volumiques sèches ρ_d^λ obtenues lors des essais de conductivité thermique ainsi que celles obtenues lors des essais de diffusivité thermique (ρ_d^α) ; le rapport des deux masses volumiques définit le facteur χ (*voir* section 3.3.2.2).

Tableau 4.13 Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de pierre calcaire

Pierre calcaire	ρ_d^α	ρ_d^λ	χ	θ	n	S_r	$\bar{\alpha}$	s
	g/cm ³			%			x10 ⁻⁷ m ² /s	
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,87	1,94	96	0,0	32,6	0,0	2,09	0,14
	1,81	1,86	97	13,8	34,7	39,7	4,88	0,16
	1,81	1,81	100	24,2	34,8	69,5	4,81	0,97
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,65	1,71	97	0,0	40,5	0,0	2,28	0,25
	1,63	1,65	99	12,4	41,2	30,1	5,13	0,16
	1,62	1,67	97	23,6	41,7	56,6	4,21	0,36
1,25-5 mm (classe #3)	1,68	1,70	99	0,0	39,2	0,0	2,29	0,27
	1,67	1,68	99	13,2	39,7	33,2	4,83	0,14
	1,68	1,70	99	23,3	39,4	59,1	5,18	0,28

Comme cela fut indiqué dans la section 3.3.2.2, les masses volumiques ciblées sont celles qui furent obtenues à la suite des essais de conductivité thermique. Le choix de la valeur de masse

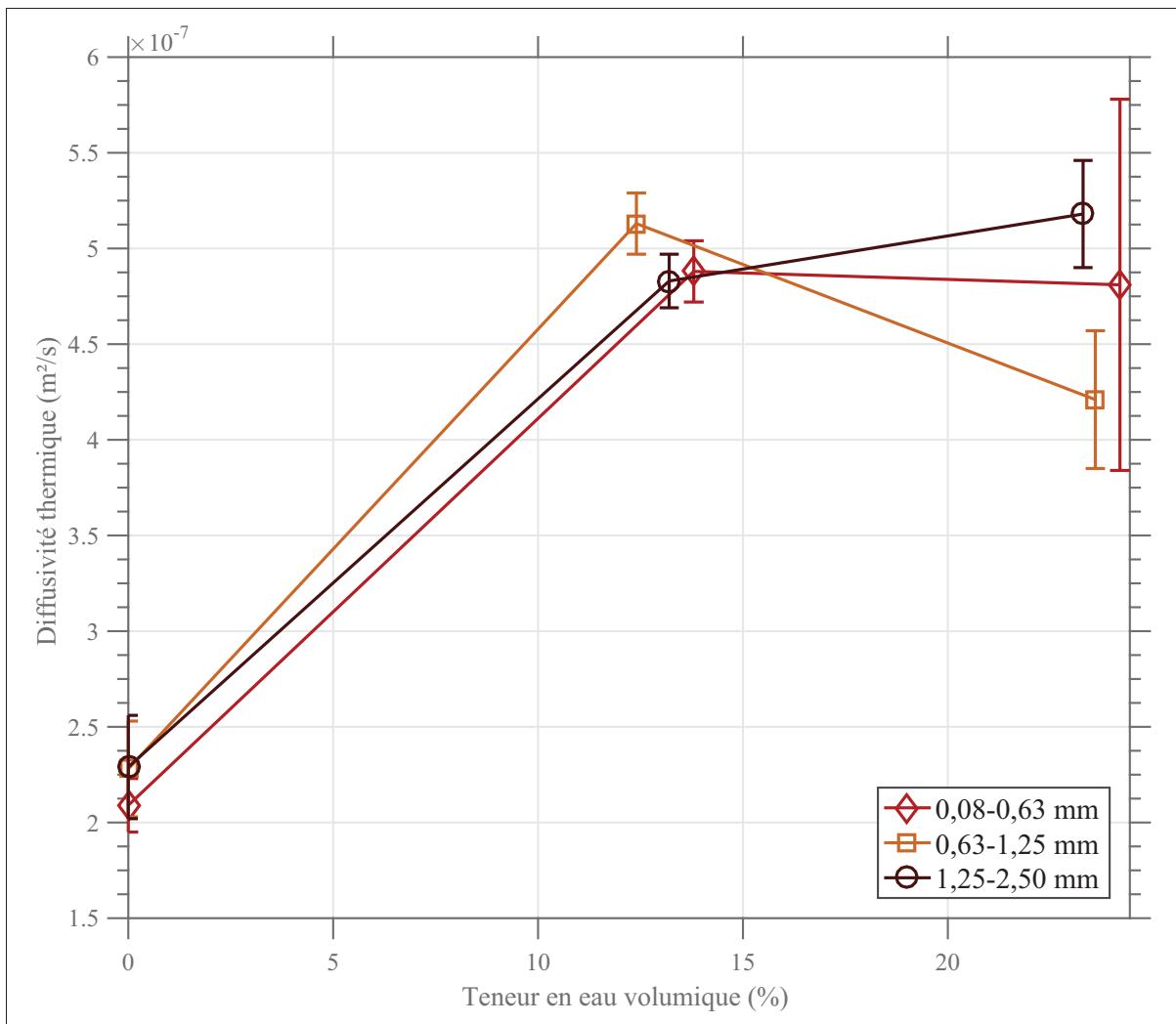


Figure 4.9 Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 classes granulométriques de pierre calcaire en fonction de la teneur en eau volumique

volumique cible (ρ_d^λ) s'est fait au regard de la teneur en eau volumique la plus proche de celle mesurée à la suite de l'essai de diffusivité thermique correspondant.

La Figure 4.9 représente l'évolution de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique pour les 3 classes granulométriques de pierre calcaire. Les résultats indiquent qu'à $\theta = 0\%$, la diffusivité thermique des 3 classes est proche. L'augmentation de la teneur en eau fait croître rapidement la diffusivité thermique, mais aucun écart ne se creuse entre les diffé-

rentes classes. Les valeurs semblent atteindre un palier autour de $5,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ correspondant à une teneur en eau volumique d'environ 13%.

4.3.2.2 Résultats sur le VPC

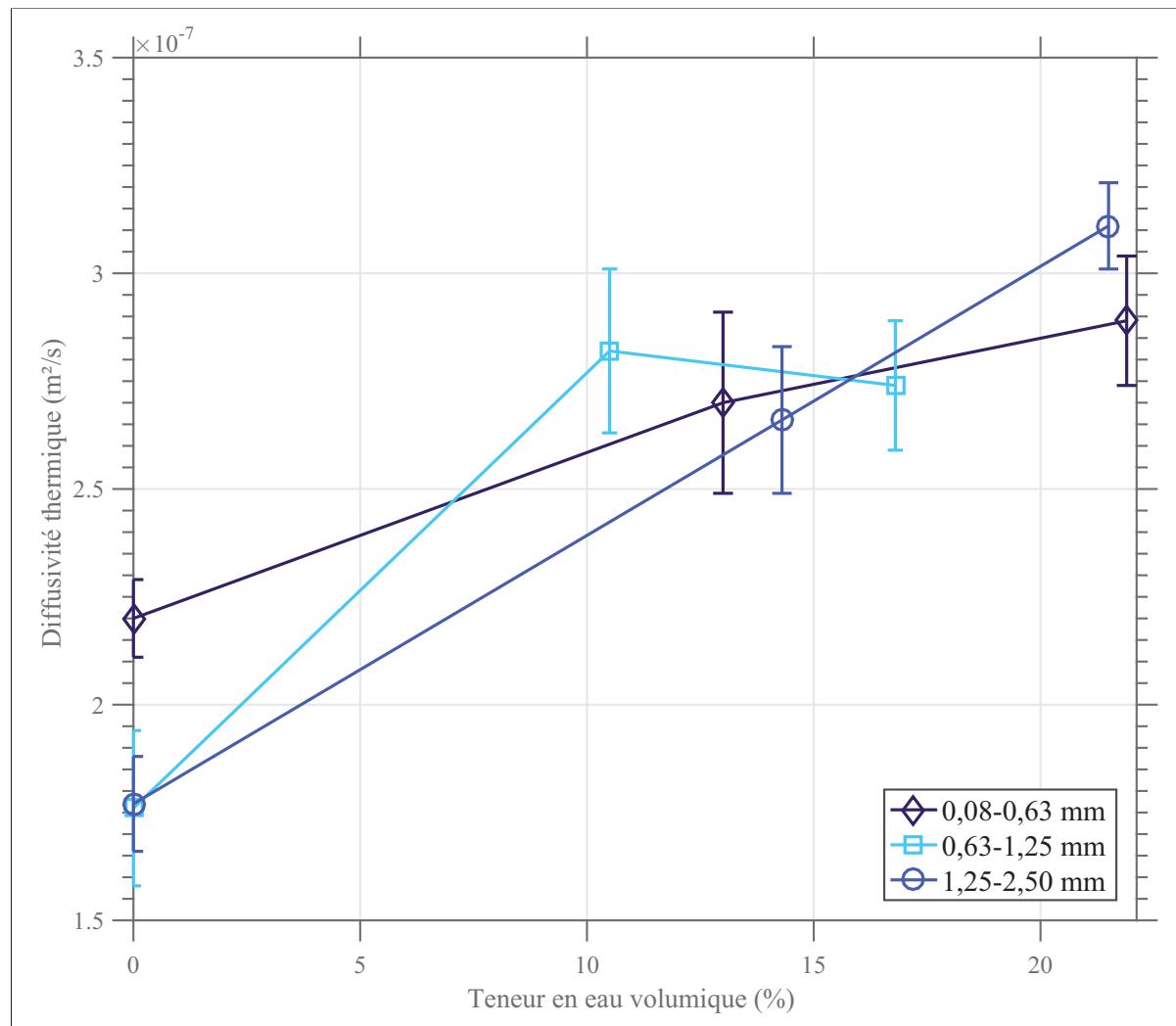


Figure 4.10 Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 classes granulométriques de VPC en fonction de la teneur en eau volumique

Le Tableau 4.14 donne les résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les 3 classes granulométriques de VPC. Les valeurs de diffusivité thermique sont tracées en fonction de θ sur la Figure 4.10.

Dans le cas du VPC, la classe 1 (0,08-1,25 mm) semble avoir une diffusivité thermique légèrement plus élevée que les deux autres classes à $\theta = 0\%$. En revanche, lorsque la teneur en eau croît, la diffusivité thermique des 3 classes converge vers des valeurs comprises entre $2,5 \times 10^{-7}$ m²/s et $3,0 \times 10^{-7}$ m²/s.

Tableau 4.14 Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différentes classes granulométriques de VPC

VPC	ρ_d^α	ρ_d^λ	χ	θ	n	S_r	$\bar{\alpha}$	s
	g/cm ³			%			$\times 10^{-7}$ m ² /s	
0,08-1,25 mm (classe #1)	1,74	1,80	97	0,0	31,1	0,0	2,20	0,09
	1,64	1,73	95	13,0	35,0	37,0	2,70	0,21
	1,68	1,73	97	21,9	33,4	65,5	2,89	0,15
0,630-2,5 mm (classe #2)	1,42	1,49	95	0,0	43,6	0,0	1,76	0,18
	1,44	1,49	97	10,5	42,7	24,7	2,82	0,19
	1,41	1,46	97	16,8	44,0	38,1	2,74	0,15
1,25-5 mm (classe #3)	1,50	1,52	99	0,0	38,8	0,0	1,77	0,11
	1,51	1,52	99	14,3	38,6	37,1	2,66	0,17
	1,54	1,54	100	21,5	37,3	57,6	3,11	0,10

4.3.3 Influence de la nature minéralogique

Le Tableau 4.15 donne les résultats des essais de diffusivité thermique effectués sur les 3 combinés de VPC et de pierre calcaire. Ces résultats sont également représentés sur le graphique de la Figure 4.11.

Les résultats indiquent qu'à teneur en eau nulle, la diffusivité thermique des mélanges 25V/75P et 50V/50P est plus élevée que celle du combiné avec la plus forte proportion de VPC (75V/25P).

Tableau 4.15 Résultats des essais de diffusivité thermique menés sur les différents combinés de VPC et pierre calcaire

Combinés	ρ_d^α	ρ_d^λ	χ	θ	n	S_r	$\bar{\alpha}$	s
	g/cm ³			%			x10 ⁻⁷ m ² /s	
50V/50P	1,91	1,91	100	0,0	27,0	0,0	2,20	0,13
	1,86	1,91	97	13,2	28,9	45,6	3,37	0,26
	1,79	1,84	97	25,4	31,7	80,0	5,03	0,59
25V/75P	1,90	1,93	98	0,0	29,8	0,0	2,32	0,17
	1,89	1,94	98	13,8	30,1	45,8	5,17	0,29
	1,82	1,87	97	24,0	32,8	73,2	5,11	0,30
75V/25P	1,89	1,89	100	0,0	26,7	0,0	3,16	0,40
	1,84	1,88	98	14,3	28,8	49,8	3,42	0,13
	1,74	1,81	96	21,9	32,5	67,5	3,72	0,09

Par contre, lorsque la teneur en eau volumique croît, la diffusivité thermique du mélange 25V/75P augmente rapidement pour atteindre une valeur maximale de $5,17 \times 10^{-7}$ m²/s à $\theta = 13,8\%$. À teneur en eau équivalente, la diffusivité thermique des mélanges 50V/50P et 75V/25P n'est que de $3,37 \times 10^{-7}$ m²/s et $3,42 \times 10^{-7}$ m²/s respectivement. Par la suite, la diffusivité thermique du combiné contenant la plus grande proportion de pierre calcaire se stabilise autour de $5,10 \times 10^{-7}$ m²/s tandis que celle du combiné 50V/50P continue de croître vers cette même valeur. L'augmentation de la diffusivité thermique du combiné 75V/25P est moins importante que celle des autres classes avec une valeur de départ ($\theta = 0\%$) de $3,16 \times 10^{-7}$ m²/s et une valeur maximale de $3,72 \times 10^{-7}$ m²/s à $\theta = 21,9\%$.

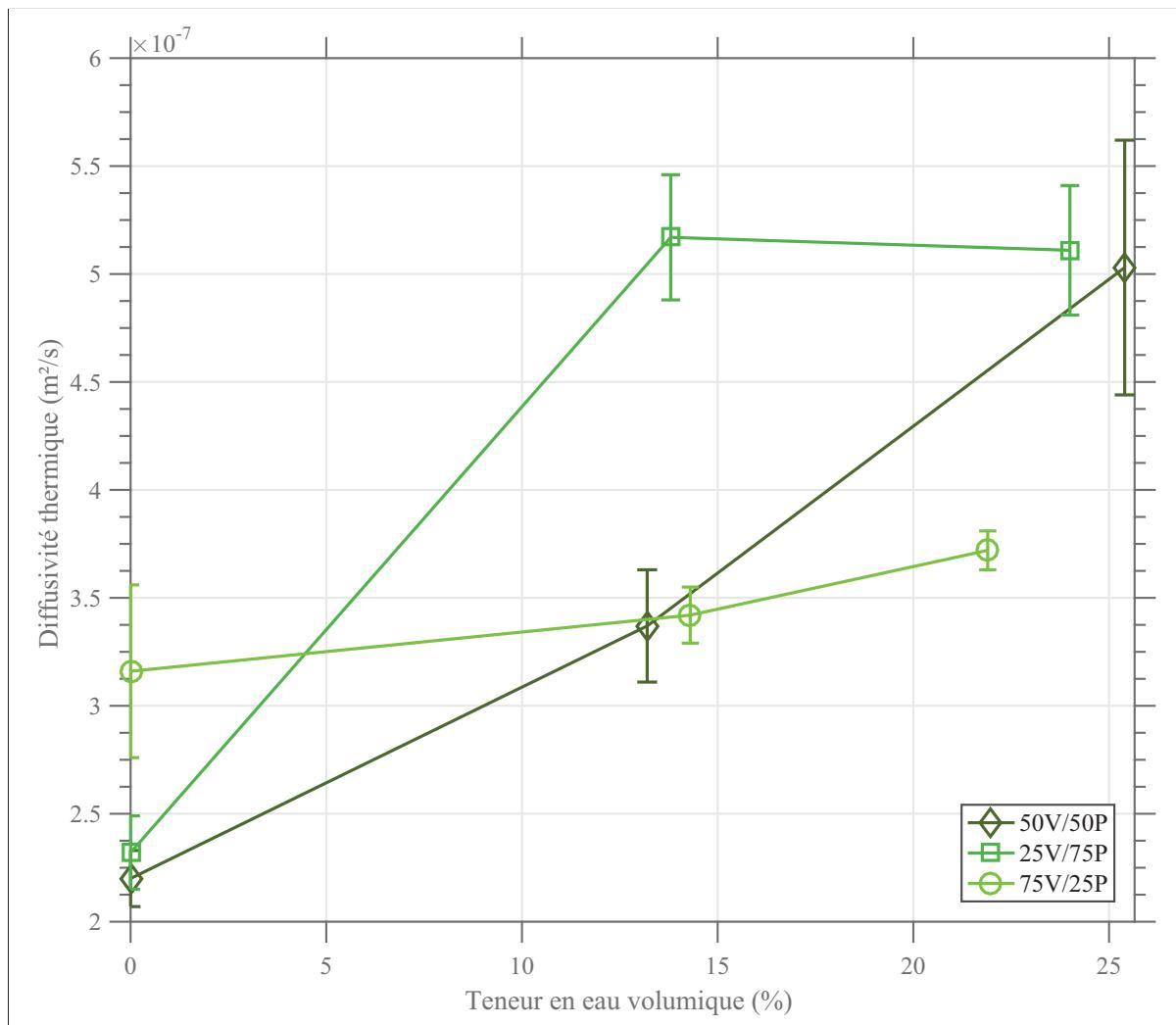


Figure 4.11 Résultats des essais de diffusivité thermique sur les 3 combinés en fonction de la teneur en eau volumique

CHAPITRE 5

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE PAR SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Lors de la deuxième phase du projet de recherche, l'attention fut portée sur l'impact de l'incorporation d'une couche de VPC dans la structure de chaussée, sur son régime thermique. Les différents cas de figure présentés ci-dessous sont comparés entre eux au travers de quelques caractéristiques (vitesse et profondeur de pénétration du front de gel (isotherme 0°C), facteur d'amortissement, épaisseur et position de la couche de VPC, ...).

5.1 Validation sur un cas simple

Afin de s'assurer de la bonne prise en main du module thermique FLAC, une première modélisation a été effectuée sur un problème dont la solution analytique est connue.

Nous supposons que le corps de chaussée est homogène, semi-infini, de conductivité thermique 2,5 W/(m·K), de capacité thermique 2350 J/(kg·K) et de masse volumique 1000 kg/m³. La Figure 5.1 présente la structure de chaussée ainsi que les profondeurs considérées dans cet exemple. La condition limite imposée en profondeur, à la limite inférieure du sol, est un flux nul (gradient géothermique négligé) et la température initiale en tout point du milieu est de 0°C. La chaussée est soumise uniquement à un échange convectif avec une température de l'air fonction sinusoïdale du temps, de période $\tau=24h$ et d'amplitude $T_0 = 20°C$.

5.1.1 Caractéristiques de l'échange convectif

Cet échange convectif est régi par la loi de Newton suivante (Mammeri *et al.* (2015)) :

$$\varphi_{con} = h(T_s - T_{air}) \quad (5.1)$$

où T_s (°C) et T_{air} (°C) sont respectivement la température de surface et de l'air. Le paramètre h est le coefficient d'échange convectif qui est relié au nombre de Reynolds (Re), de Prandtl (Pr),

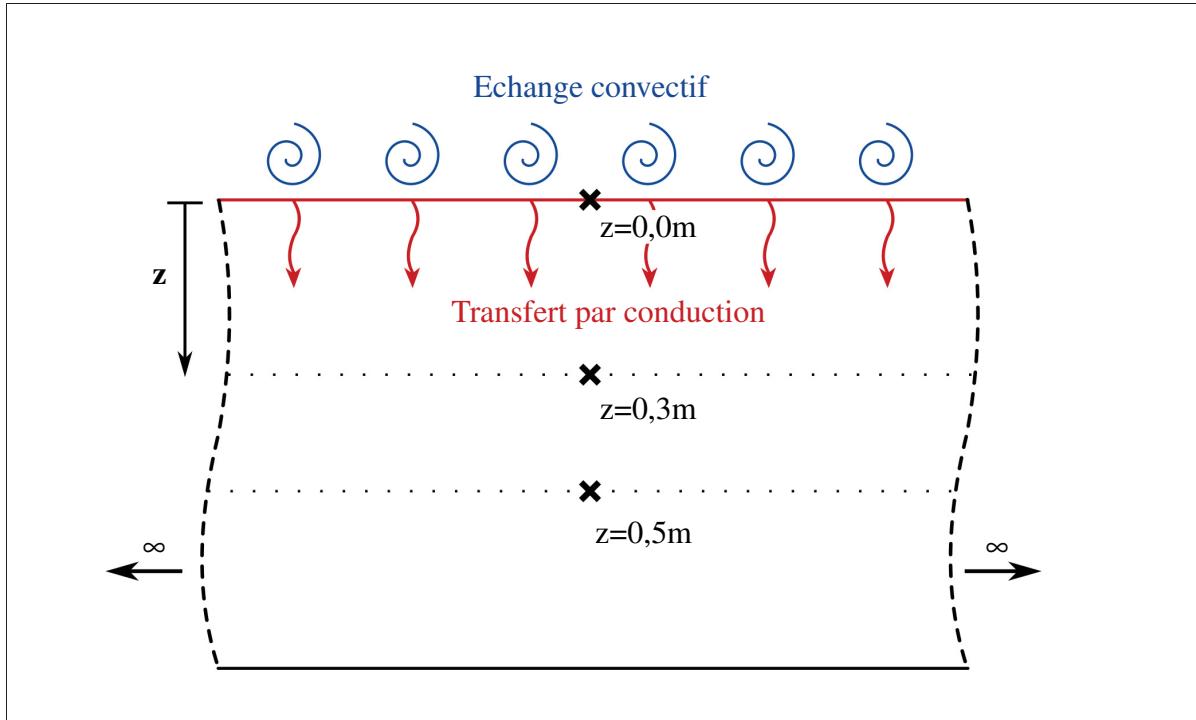


Figure 5.1 Représentation schématique du domaine semi-infini considéré pour la résolution du problème

à la conductivité thermique de l'air (K_{air}) et à la longueur caractéristique du problème (L_c) par la relation 5.2 (Qin & Hiller (2011)).

$$h = 5.6 + 0,332 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \frac{K_{air}}{L_c} \quad (5.2)$$

Le nombre de Reynolds dépend de la viscosité cinématique de l'air η et de la vitesse de l'air V_{air} . La viscosité cinématique de l'air est prise égale à $16,01 \cdot 10^{-6}$ m²/s (Mammeri *et al.* (2015)). La chaussée étant supposée semi-infini, $L_c=0,15$ m. Considérant la très grande variabilité de la vitesse de l'air, la valeur moyenne annuelle mesurée à la station météo de Saint-Hubert (QC) a été choisie pour le calcul de Re , soit $V_{air}=4,4$ m/s (~ 16 km/h) (Hui (2014)). La conductivité thermique de l'air vaut 0,027 W/(m·K) et le nombre de Prandlt de l'air est de 0,7 (Mammeri *et al.* (2015)). Par conséquent, la valeur du coefficient d'échange convectif est de 16,53 W/(m²·K).

5.1.2 Solution analytique et résultats de la simulation numérique

La solution analytique au problème présenté ci-dessus est donnée par la relation 5.3 (Yezou (1988)).

$$\theta(z, t) = \frac{T_0 \cdot e^{-Az} \cos(\omega t - Az - \beta)}{\sqrt{(1+AB)^2 + (AB)^2}} \quad (5.3)$$

où

$$A = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad ; \quad B = \frac{\lambda}{h} \quad ; \quad \beta = \text{Arctg}\left(\frac{AB}{1+AB}\right)$$

et $\omega = 2\pi/\tau$ représente la pulsation en (rad/s) et β le déphasage entre le maximum de la température à la surface et le maximum de température de l'air en (rad).

L'étude porte sur trois cycles successifs et la Figure 5.2 représente la variation de température aux trois profondeurs définies précédemment ($z=0$; $0,30$ et $0,50$ m) obtenues par l'approche analytique et par la solution numérique.

Les effets de déphasage et d'amortissement, augmentant en fonction de la profondeur, apparaissent clairement. L'influence des conditions initiales arbitraires devient négligeable dès le troisième cycle. Nous remarquons que les résultats du modèle sont très proches des valeurs analytiques. Les écarts relatifs moyens (relation 5.4) obtenus sont de $-0,07\%$, $-1,36\%$ et $-4,76\%$ pour respectivement $z=0$ m, $z=0,30$ m et $z=0,50$ m.

$$\text{écart relatif} = \frac{\text{valeur FLAC} - \text{valeur analytique}}{|\text{valeur analytique}|} \quad (5.4)$$

5.2 Présentation des cas d'étude

Les cas à l'étude peuvent être séparés en deux grands groupes qui se différencient par la condition imposée à la température de l'air (T_{air}). Dans le premier cas, T_{air} a été supposée constante pendant le temps de la simulation et dans le second cas, la température de l'air oscille entre une valeur positive et une valeur négative. Au sein de chacun de ces groupes, d'autres paramètres

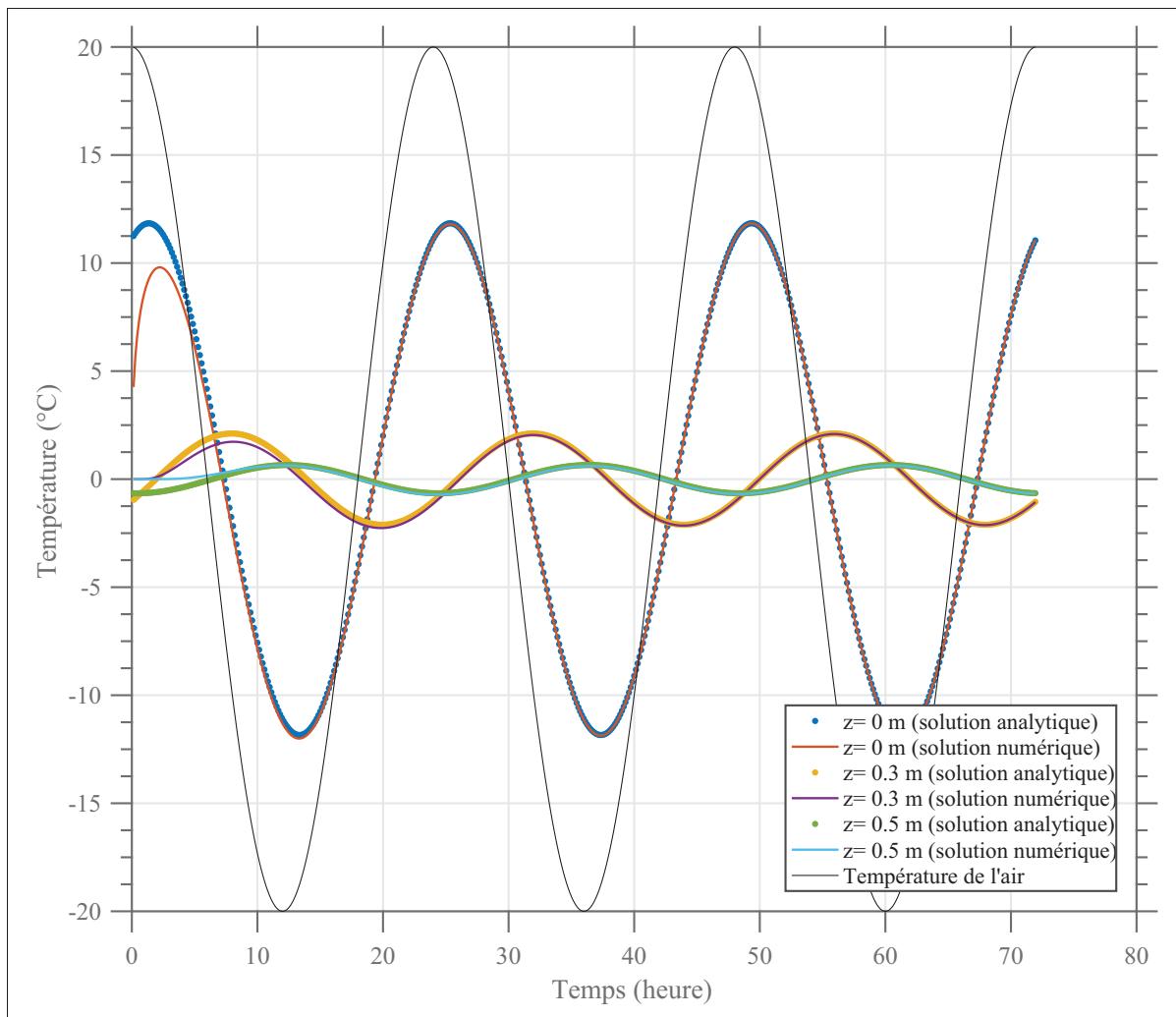


Figure 5.2 Comparaison des résultats de la simulation numérique avec ceux donnés par la solution numériques

s'ajoutent tels que la configuration des couches de la structure de chaussée et leurs propriétés thermiques ainsi que les conditions aux limites.

5.2.1 Configurations considérées

Au total, ce sont 7 "géométries" qui furent analysées dont une configuration de référence (cas 1) et 6 configurations dans lesquels une couche de VPC, d'épaisseur variable (100 mm, 200 mm

et 300 mm), est placée à différentes profondeurs. Le Tableau 5.1 donne la liste des différents cas d'étude envisagés.

Tableau 5.1 Configurations géométriques des structures de chaussées étudiées

Épaisseur (mm)	Cas d'étude							
	1	2	3	4	5	6	7	
75	Enrobé bitumineux							
500	100	MG20	VPC	VPC	VPC	MG20	MG20	
	100							
	100		MG20					
	100			MG20				
	100				MG20	VPC	VPC	
500	MG112 sable							
2000	Argile							

La structure de chaussée de référence (cas 1) est constituée d'une couche de 75 mm d'enrobé bitumineux (EB), d'une couche de 500 mm de matériaux granulaires de type MG20, d'une couche de 500 mm de sable MG112 et d'une couche de 2000 mm d'argile ; l'épaisseur totale du massif de sol modélisé, incluant la structure de la chaussée, est de 3075 mm. La couche de VPC est placée à l'interface entre le revêtement et la couche de MG20 dans les cas 2, 3 et 4 avec des épaisseurs respectives de 100 mm, 200 mm et 300 mm puis dans les cas 5, 6 et 7, la couche de VPC est placée à l'interface entre la couche de MG20 et le sable MG112 avec là aussi des épaisseurs de 100 mm, 200 mm et 300 mm. Le Tableau 5.1 donne la configuration des différents cas à l'étude.

5.2.2 Propriétés des matériaux

Les propriétés physiques et thermiques requises par FLAC pour ce type de simulation sont les mêmes pour chacune des couches de la structure de chaussée ; à savoir : la masse volumique ρ (kg/m^3), la conductivité thermique λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) et la diffusivité thermique α (m^2/s)).

Deux cas de figure sont considérés dans les simulations ; d'une part l'état sec, c'est à dire où la teneur en eau volumique (θ) des couches de MG20/VPC et de MG112 est supposée nulle et d'autre part un cas où $\theta = 10\%$. Les propriétés physiques et thermiques sont par conséquent différentes suivant le cas de figure et le Tableau 5.2 donne les différentes valeurs utilisées.

Tableau 5.2 Propriétés des différentes couches constituant la structure de chaussée modélisée

Matériaux	λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)		α ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)		ρ (kg/m^3)		Réf.
	$\theta = 0\%$	$\theta = 10\%$	$\theta = 0\%$	$\theta = 10\%$	$\theta = 0\%$	$\theta = 10\%$	
EB	1,380		6,72		2230		[1]
MG20	0,258	1,227	2,09	4,88	1940	1950	[2]
VPC	0,132	0,350	1,77	2,66	1520	1640	
MG112	0,500	1,250	3,68	4,90	1700	1700	[3,4,5]
Argile	1,280		1,00		1450		[6]

Réf. : [1] Corlew & Dickson (1968), [2] Berraha (2017) , [3] Abu-Hamdeh (2003), [4] Doucet (2014), [5] Chen (2008), [6] Pilate (2006)

Les propriétés du MG20 et du VPC sont issues du travail expérimental effectué au cours du présent travail de recherche et dont les résultats sont présentés dans le Chapitre 4. Pour le MG20, il est important de rappeler ici que seul la fraction [0,08-5] mm est considérée lors de la phase expérimentale, étant donné qu'aucun essai n'a été mené sur tout la fraction complète [0,08-5] mm du MG20, ce sont les propriétés de la classe 1 (0,08-1,25 mm) qui furent attribuées aux couches de MG20. Le choix des propriétés de la classe 1 se base sur l'hypothèse que la porosité de la fraction [0,08-5] mm est principalement donné par celle de la "fraction fine". En d'autres termes, l'hypothèse est que la porosité de la classe 1 'dominerait" à l'échelle de

la fraction complète (Ogolo *et al.* (2015)), et que les propriétés de la classe 1 sont, avec une bonne approximation, celles qui seraient obtenues pour la fraction [0,08-5] mm.

Pour ce qui est du VPC, ce sont les propriétés de la classe 3 qui sont retenues pour représenter les propriétés du VPC dans les simulations. La classe 3 (1,25-5 mm) a en effet présenté les propriétés thermiques les plus faibles comparées à la pierre calcaire. Sachant que le but est de comparer l'évolution du front de gel dans la structure de chaussée, avec et sans VPC, il est plus cohérent de prendre en compte les propriétés les plus favorables - donc les plus faibles - dans la perspective d'étudier son influence sur la propagation du front de gel.

En ce qui concerne les propriétés du MG112, trois références ont été considérées pour les définir. Les informations prises en compte pour cibler les propriétés thermiques d'un MG112 ont été tirées de la documentation du MTMDET. Plusieurs types de MG112 ont déjà été étudiés par Doucet dont la porosité et la masse volumique sèche sont consignées dans un rapport déposé au MTMDET en 2014 (Doucet (2014)). Le MG112 choisi est de type sable (S2), de porosité $n=36\%$ et de masse volumique sèche $\rho_d=1686 \text{ kg/m}^3$. Les propriétés thermiques ont alors été déduites grâce à deux références différentes qui donnent la conductivité thermique (Chen (2008)) et la capacité thermique (Abu-Hamdeh (2003)) de sables pour différentes porosités et différentes granulométries.

5.2.3 Conditions initiales, aux limites et températures de l'air

La température en tout point de la chaussée est initialisée à $+10^\circ\text{C}$ au début de la simulation ($T(z, t = 0) = +10^\circ\text{C}$). Pour ce qui est de la condition imposée à la frontière inférieure de la structure de chaussée, Gui *et al.* (2007) ont montré, par le biais de mesures in situ, que la température devient constante à partir d'une certaine profondeur (typiquement à partir de $z = 1 \text{ m}$). Dans cette étude, la température a été fixée à $+33,5^\circ\text{C}$ à 3 m de profondeur. Dans notre cas, la condition imposée à la frontière inférieure du massif de sol modélisé ($e=3075 \text{ mm}$: voir Tableau 5.2) est une température fixée de $+4^\circ\text{C}$ pendant toute la durée de la simulation

$(T(z = 3075, t) = +4^\circ\text{C})$. Les frontières latérales sont supposées adiabatiques, c'est à dire que le flux latéral est considéré nul.

Enfin, en ce qui concerne les conditions imposées à la surface de la chaussée, deux cas de figure sont analysés dans ce mémoire : (1) la température de l'air est maintenue constante et vaut -10°C (relation 5.5) et, (2) la température de l'air fluctue suivant une variation sinusoïdale dans le temps (noté $T_{\text{air}}^{\text{sin}}$), de période $\tau=24\text{h}$ et d'amplitude $T_0 = 12,5^\circ\text{C}$ avec une température maximale de $+5^\circ\text{C}$ et une valeur minimale de -20°C (relation 5.6). Pour les deux cas de figure, la simulation est menée sur une durée de 30 jours.

$$T_{\text{air}}(t) = -10 = T_{\text{air}}^{\text{const}} \quad (5.5)$$

$$T_{\text{air}}(t) = T_0 \cdot \cos(2\pi \cdot \frac{t}{\tau}) - 7,5 = T_{\text{air}}^{\text{sin}} \quad (5.6)$$

La surface de la chaussée est soumise uniquement à un échange convectif avec l'air et les caractéristiques de cet échange ont été présentées précédemment (*voir* section 5.1.1).

5.3 Résultats pour le cas $T_{\text{air}}^{\text{const}}$

Les simulations numériques ont été menées sur FLAC et le traitement des données s'est fait grâce au logiciel Matlab. L'Annexe V donne un exemple du code FLAC utilisé pour la simulation d'un cas d'étude.

5.3.1 Configuration de référence : cas #1 à l'état sec (S : $\theta = 0\%$) et partiellement saturé (PS : $\theta = 10\%$)

Les Figures 5.3a et 5.3b donnent respectivement l'évolution de la température en fonction du temps et de la profondeur dans le cas d'un massif à l'état sec (S : $\theta = 0\%$) et partiellement saturé (PS : $\theta = 10\%$).

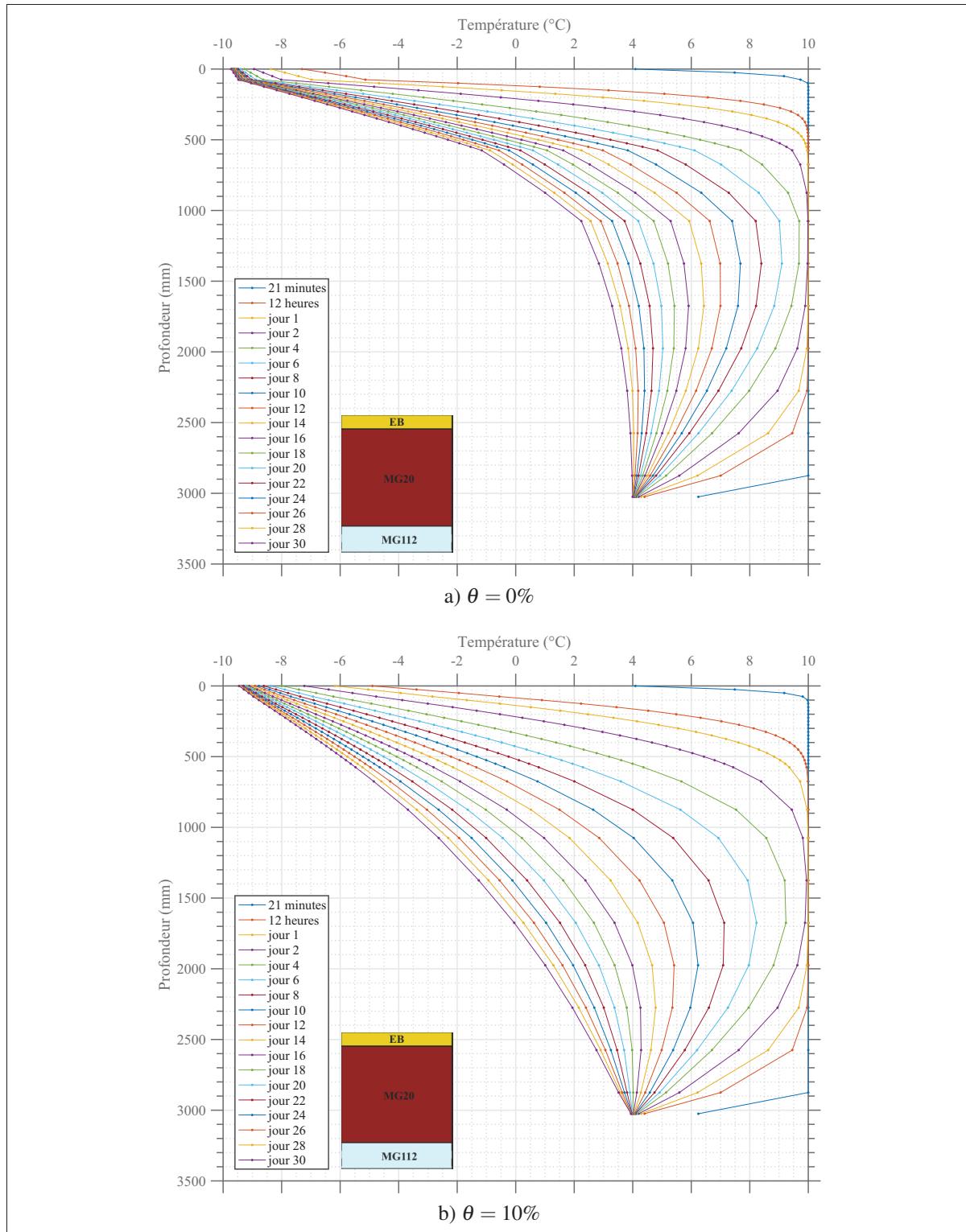


Figure 5.3 Évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas #1, pour T_{air}^{const} , $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$

La température initiale en tout point de la structure de chaussée est de $+10^{\circ}\text{C}$. Dans les deux cas ($\theta = 0$ et 10%) la température en tout point de la structure de chaussée diminue, avec en surface un refroidissement qui évolue vers la température de l'air imposée ($T_{\text{air}} = -10^{\circ}\text{C}$) et à la base du massif de sol ($z = 3075$ mm) une évolution qui tend vers la température fixée à $+4^{\circ}\text{C}$. De fait un équilibre se met en place entre la température imposée en surface et la température fixée à la base de la chaussée.

Les Figures 5.4a et 5.4b donnent, sous une autre forme, l'évolution de la température en fonction du temps et de la profondeur. Chacune des lignes représente une isotherme et l'intervalle entre chacune d'elles est fixé à 1°C . Sur chacune de ces figures, la ligne de l'isotherme 0°C apparaît en rouge afin de mettre en évidence l'évolution du front de gel dans la structure de chaussée en fonction du temps. À noter que sur ces figures n'est représentée que la section du massif de sol dans laquelle évolue le front de gel ; les figures représentant la totalité du profil ($z = 0$ à 3075 mm) sont données en Annexe VI.

Pour donner une idée de la vitesse de progression du gel, la profondeur atteinte par l'isotherme 0°C pour l'état sec et partiellement saturé, tous les 5 jours, est donnée dans le Tableau 5.3. Comparée à l'état sec ($\theta = 0\%$), la conductivité thermique des couches de MG20 et de MG112 est plus élevée dans l'état partiellement saturé ($\theta = 10\%$) augmentant par conséquent la vitesse de progression du front de gel. Au cours du temps, l'écart entre les deux cas (état sec et PS) se creuse rapidement avec un écart absolu de 386 mm à 15 jours et de 957 mm à 30 jours.

Tableau 5.3 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours

	Jours					
	5	10	15	20	25	30
$\theta = 0\%$	308	404	477	541	625	730
$\theta = 10\%$	382	609	863	1167	1461	1687

en millimètres

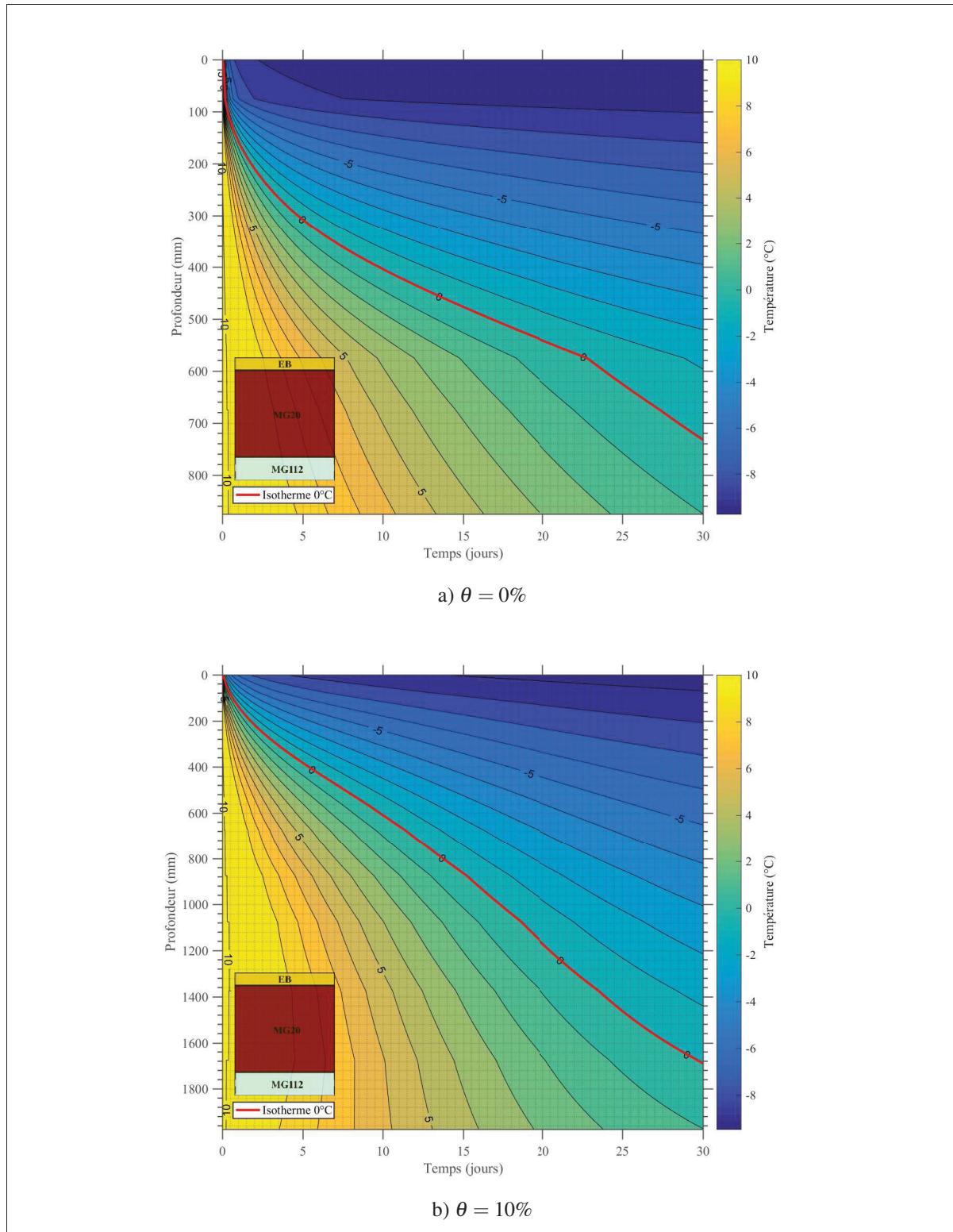


Figure 5.4 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour le cas #1, pour T_{air}^{const} , état sec : S ($\theta = 0\%$) et partiellement saturé PS ($\theta = 10\%$)

5.3.2 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 0\%$)

Les Figures 5.5 à 5.7 présentent les résultats obtenus respectivement pour les cas d'étude #2/#5, #3/#6 et #4/#7, dans lesquels une couche de VPC, d'épaisseur variable et à différentes profondeurs, est insérée dans la couche de MG20 du cas #1. Ces figures résument l'évolution de la température en fonction de la profondeur, et sur lesquelles figures en rouge la ligne d'isotherme 0°C représentant le front de gel. À titre de comparaison, sur ces figures est également reproduite la ligne d'isotherme 0°C obtenue dans le cas de la structure de chaussée de référence (cas #1). À noter ici également que les figures représentants la totalité du massif de sol modélisé ($z = 0$ à 3075 mm) sont données en Annexe VI.

Le Tableau 5.4 donne les profondeurs de pénétration du front de gel obtenues pour chacun des cas #2 à #7 ainsi que l'écart relatif avec le cas de référence.

Tableau 5.4 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas de figure suivant l'état sec (S : $\theta = 0\%$) (profondeur en (mm))

(T_{air}^{const})	Jours					
Cas	5	10	15	20	25	30
#1	308 (0) ⁽¹⁾	404 (0)	477 (0)	541 (0)	625 (0)	730 (0)
#2	245 (-21)	337 (-17)	410 (-14)	475 (-12)	536 (-14)	608 (-17)
#3	241 (-22)	293 (-28)	361 (-24)	424 (-22)	485 (-22)	541 (-26)
#4	272 (-12)	315 (-22)	349 (-27)	387 (-29)	445 (-29)	501 (-31)
#5	327 (+6)	452 (+12)	506 (+6)	540 (0)	570 (-9)	660 (-10)
#6	375 (+22)	446 (+10)	487 (+2)	521 (-4)	551 (-12)	585 (-20)
#7	363 (+18)	426 (+5)	465 (-3)	499 (-8)	529 (-15)	556 (-24)

⁽¹⁾ : la valeur entre parenthèses correspond à l'écart relatif entre les profondeurs du front de gel à celle de la structure de chaussée de référence (cas #1) exprimé en %

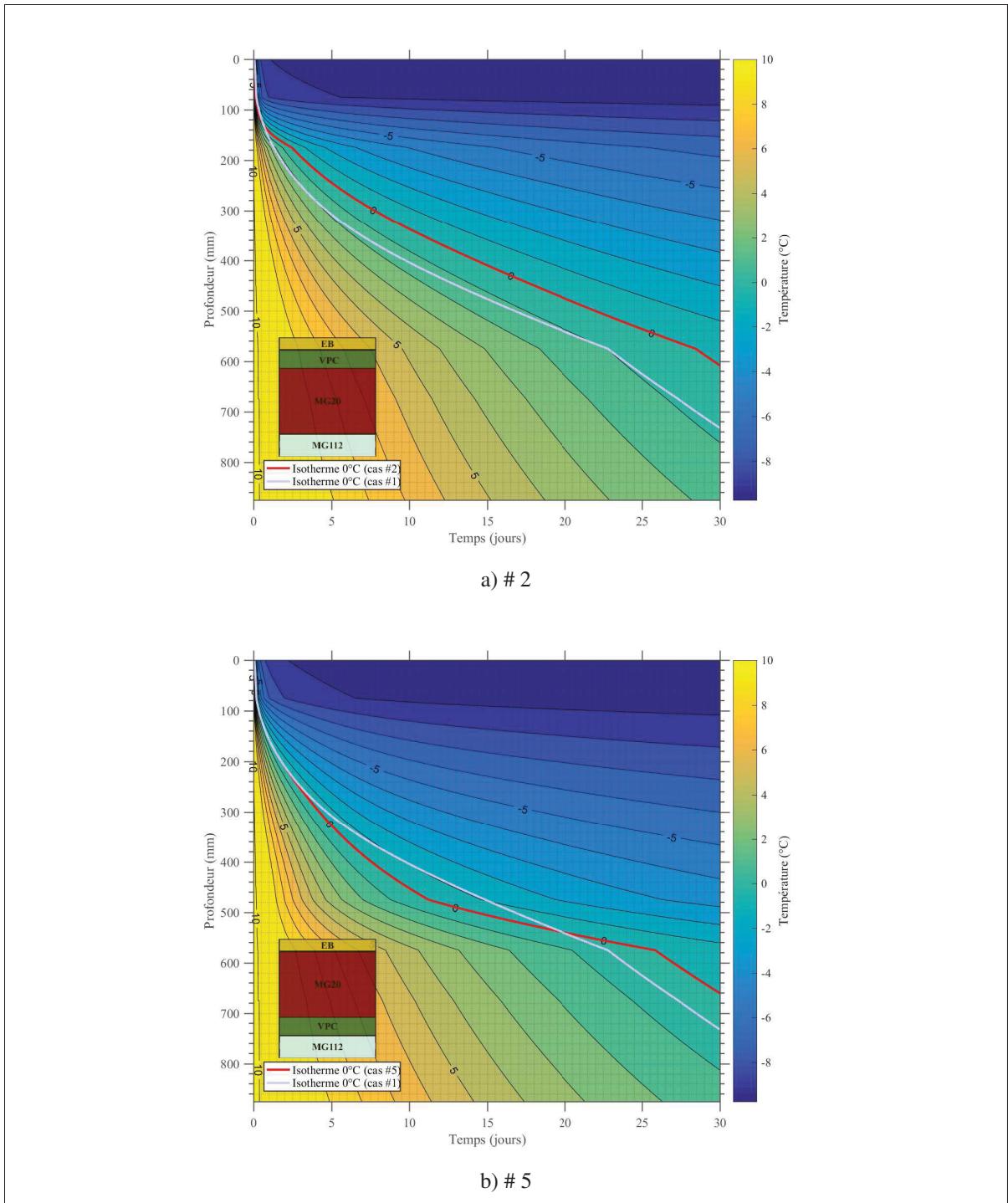


Figure 5.5 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})

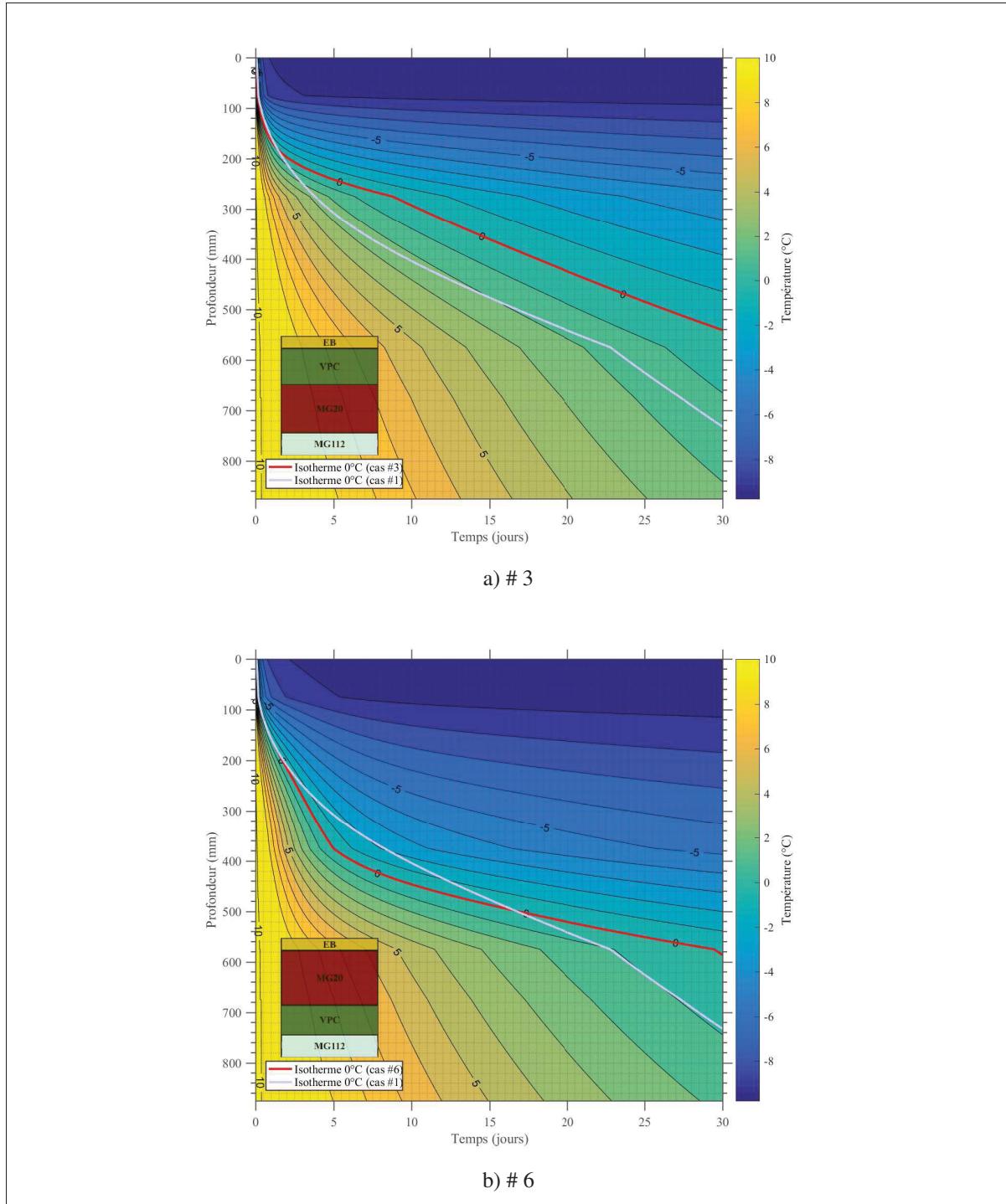


Figure 5.6 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})

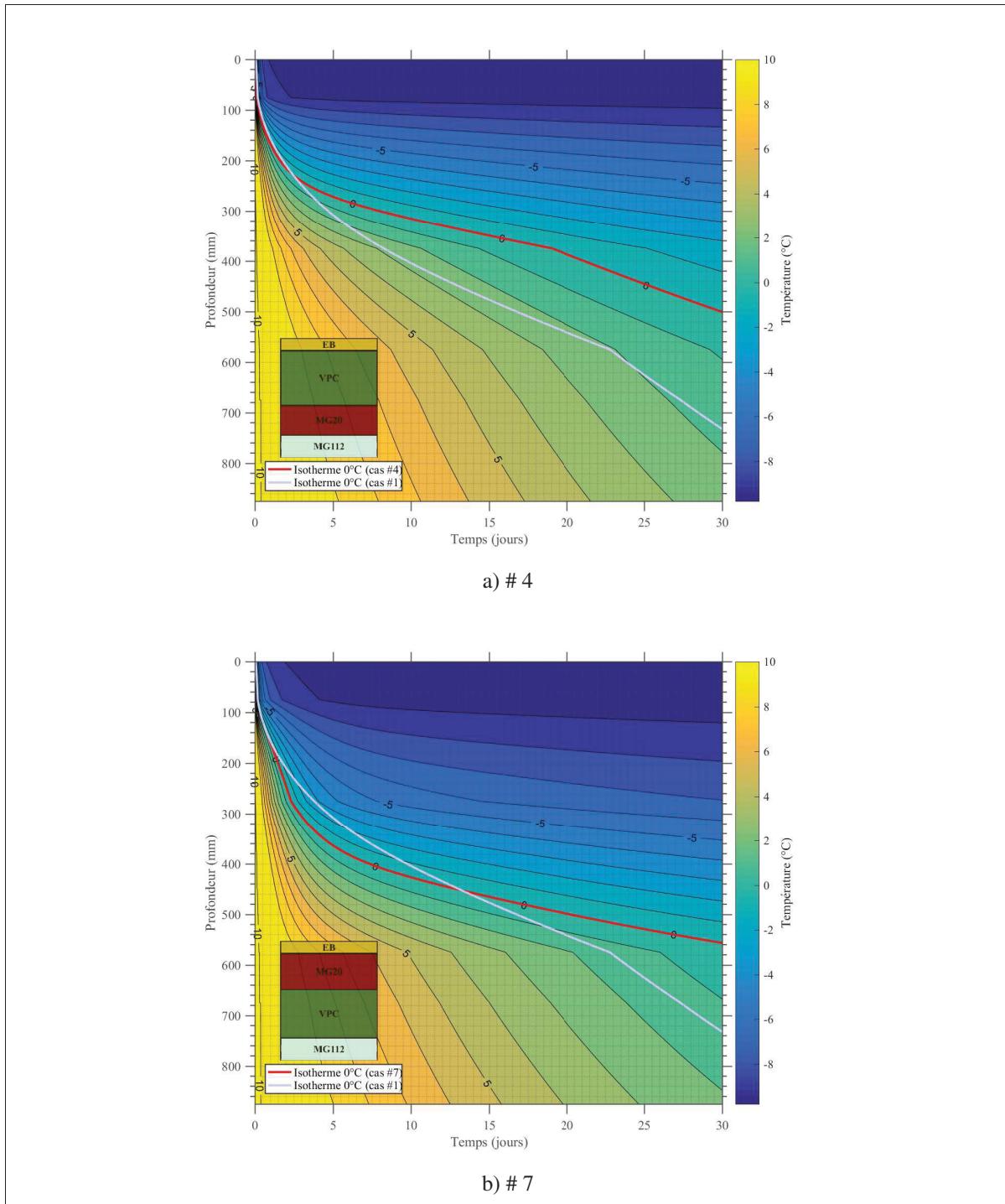


Figure 5.7 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{const})

Pour les cas où la couche de VPC est placée à l'interface entre le MG20 et l'EB (cas #5, #6 et #7), la propagation se fait plus rapide comparativement au cas #1. En effet, les profondeur atteinte durant les 10 premiers jours sont supérieures à celle du cas #1. Une fois dans la couche de VPC, la progression du front de gel est, plus ou moins "ralentie" dépendamment de l'épaisseur de la couche de VPC. Des ruptures de pente sont clairement visibles dans l'évolution des isothermes, indiquant la présence d'une couche de conductivité thermique différente. L'évolution du front de gel dans les couches subséquentes retrouve alors une pente similaire à celle du cas de référence. Du fait de cette couche de VPC, les profondeurs atteintes par le front de gel, au bout de 30 jours, sont d'autant plus faibles que l'épaisseur de la couche de VPC est grande. L'écart relatif le plus important est obtenu dans le cas #4 (501 mm (-31,4%)) et représente un écart absolu de 229 mm avec le cas de référence.

D'autre part, le régime thermique en début de simulation diffère d'un cas à l'autre. En effet, les données rapportées dans le Tableau 5.4 montrent que la profondeur de pénétration du gel est supérieure au cas de référence dans les cas #5, #6 et #7, et ce, pendant quasi les 15 premiers jours. Cela se traduit par une pénétration plus rapide du front de gel dans le cas où la couche de MG20 est placée au-dessus de la couche de VPC. Ce phénomène sera également observé dans le cas où $\theta = 10\%$ et sera discuté dans la section de synthèse (section 6.3).

5.3.3 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 10\%$)

Les Figures 5.8 à 5.10 présentent les résultats obtenus respectivement pour les cas d'étude #2/#5, #3/#6 et #4/#7, et ce, pour $\theta = 10\%$. Sur ces figures est également représentée l'évolution du front de gel obtenue dans le cas #1. La conductivité thermique de la couche de VPC (0,350 W/(m·K)) est beaucoup plus faible que celle de la couche de MG20 (1,227 W/(m·K)) et d'EB (1,38 W/(m·K)). Sur ces figures, la présence de la couche de VPC est clairement visible avec une diminution nette de la vitesse de propagation du front de gel. Une fois passée la couche de VPC, la propagation est similaire à celle obtenue dans le cas de référence avec un écart qui varie d'un cas à l'autre.

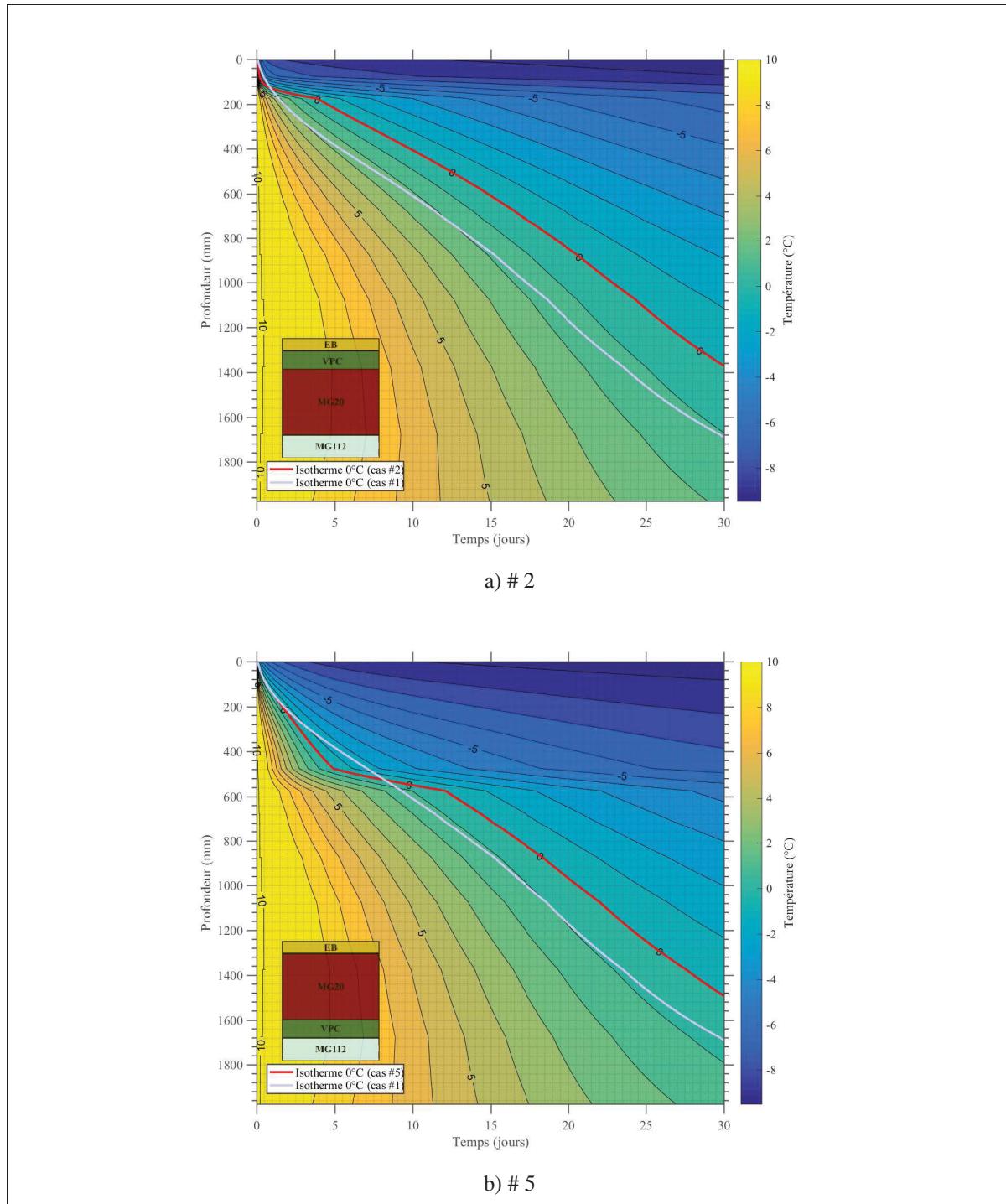


Figure 5.8 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})

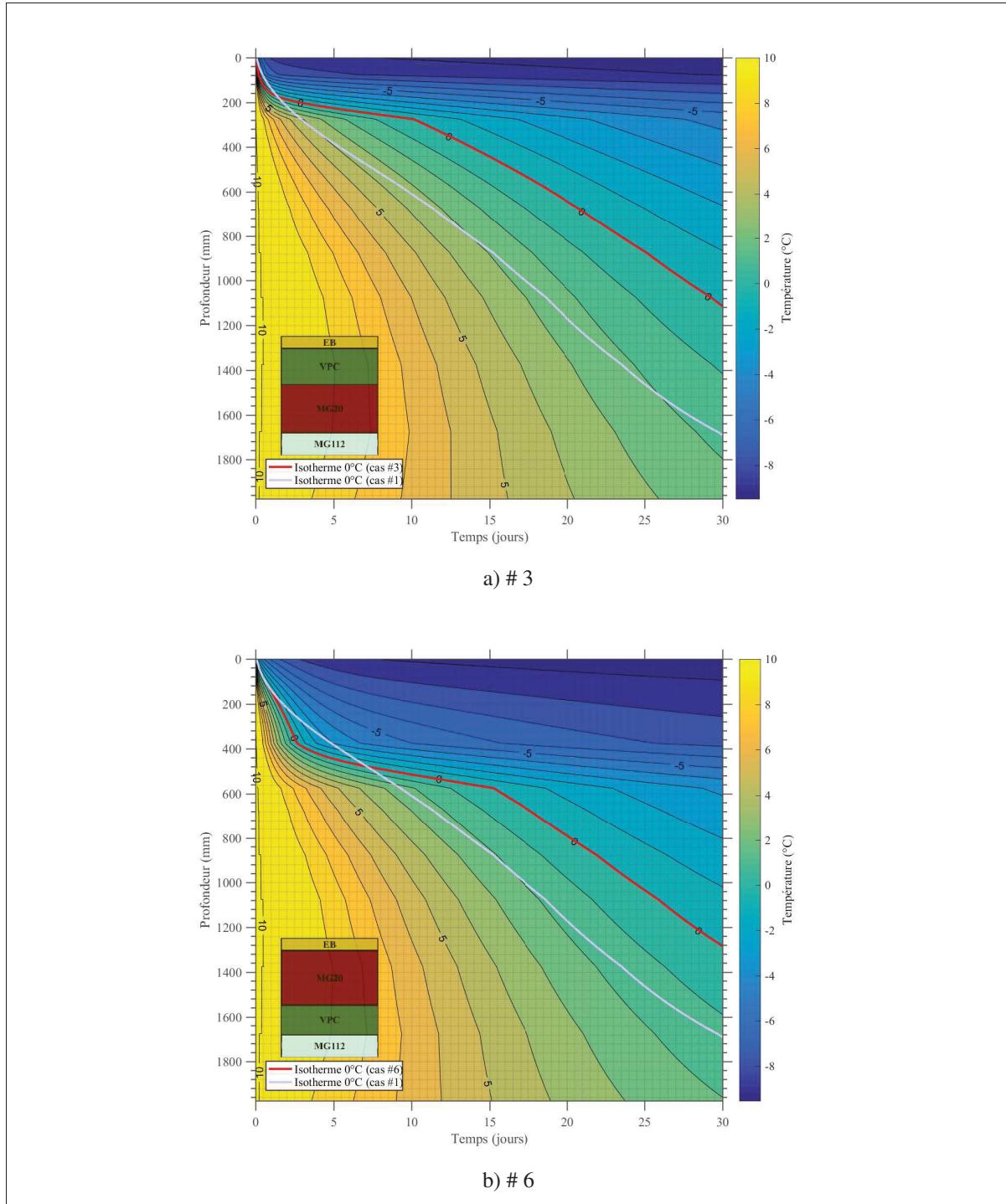


Figure 5.9 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})

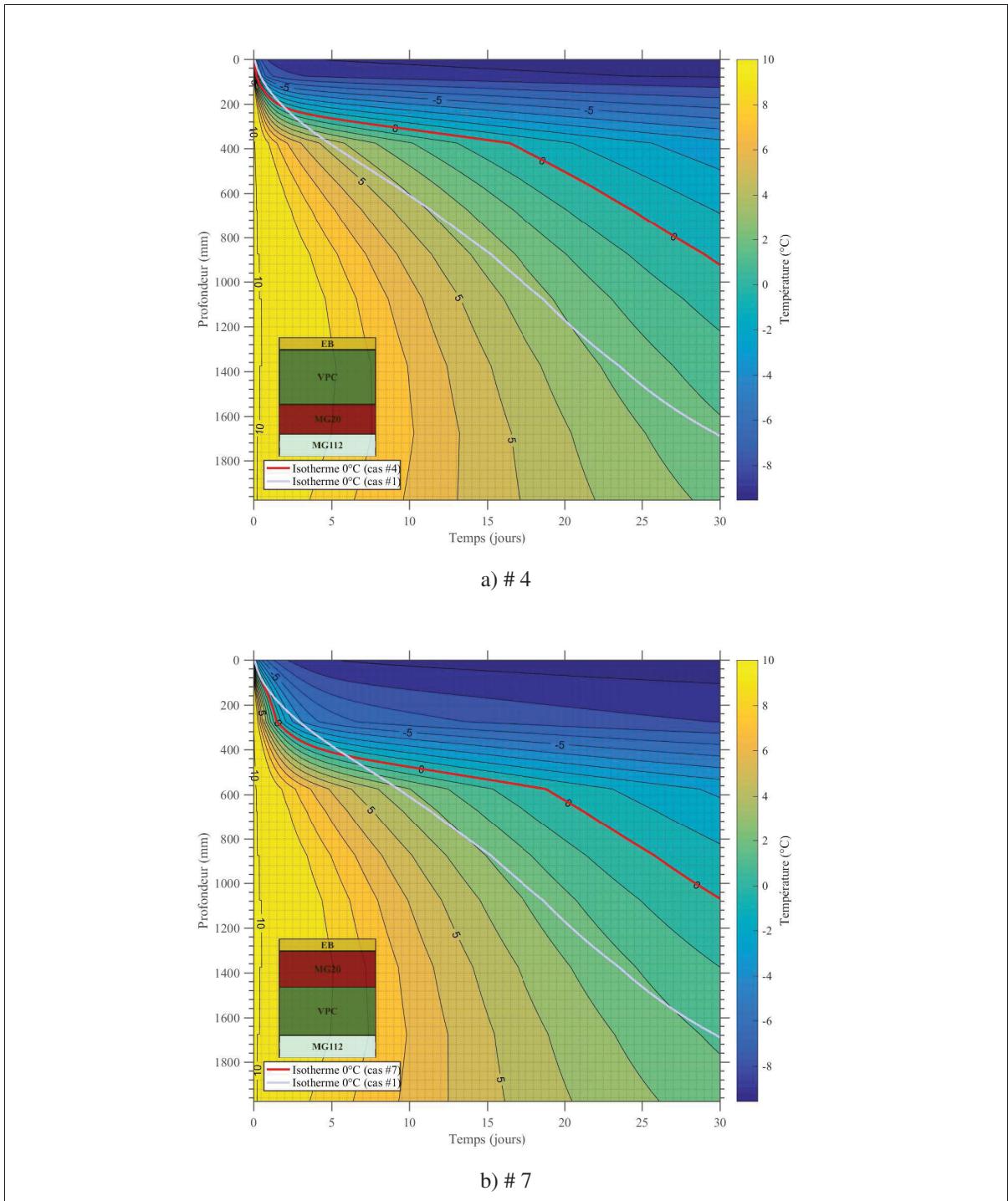


Figure 5.10 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{const})

Le Tableau 5.5 donne les profondeurs de pénétration du front de gel obtenues pour chacun des cas #2 à #7, ainsi que l'écart relatif avec le cas #1, en considérant un massif de sol dans un état partiellement saturé (PS : $\theta = 10\%$).

Tableau 5.5 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 10\%$ (profondeur en (mm))

(T_{air}^{const})	Jours					
	5	10	15	20	25	30
#1	382 (0) ⁽¹⁾	609 (0)	863 (0)	1167 (0)	1461 (0)	1687 (0)
#2	219 (-43)	405 (-33)	609 (-29)	847 (-27)	1114 (-24)	1369 (-19)
#3	226 (-41)	274 (-55)	442 (-49)	642 (-45)	869 (-41)	1111 (-34)
#4	264 (-31)	314 (-48)	361 (-58)	502 (-57)	703 (-52)	923 (-45)
#5	477 (+25)	549 (-10)	709 (-18)	966 (-17)	1247 (-15)	1491 (-12)
#6	444 (+16)	514 (-16)	572 (-34)	788 (-32)	1031 (-29)	1280 (-24)
#7	411 (+8)	476 (-22)	532 (-38)	625 (-46)	841 (-42)	1067 (-37)

⁽¹⁾ : la valeur entre parenthèses correspond à l'écart relatif entre les profondeurs du front de gel à celle de la structure de chaussée de référence (cas #1) exprimé en %

Les valeurs rapportées dans le Tableau 5.5 indiquent que dans les cas #2, #3 et #4, l'écart relatif (en valeur absolue) atteint une valeur maximale au bout d'un certain temps ([43% ; 5j] (#2), [55% ; 10j] (#3), [58% ; 15j] (#4)) puis reste relativement constant avec néanmoins une diminution progressive de l'écart dû à la condition imposée à la frontière inférieure du modèle ($T(z = 3075, t) = +4^\circ\text{C}$). Dans les cas #5, #6 et #7, la progression du front de gel est plus rapide dans les premiers instants de la simulation comparativement au cas de référence. Une fois la couche de VPC atteinte, l'évolution est "ralentie", l'écart se creuse et le comportement

devient similaire aux autres cas. L'écart relatif maximal observé avec le cas de référence est de -58% à 15 jours pour le cas #4, ce qui correspond à un écart absolu de 502 mm.

5.4 Résultats pour le cas T_{air}^{sin}

5.4.1 Configuration de référence

Les Figures 5.11a et 5.11b donnent l'évolution de la température en fonction de la profondeur pour respectivement l'état sec (S : $\theta = 0\%$) et partiellement saturé (PS : $\theta = 10\%$) du cas d'étude #1.

Sur ces figures apparaît en rouge l'évolution de l'isotherme 0°C en fonction du temps. De par la nature des fluctuations de T_{air} , deux fronts de gel apparaissent sur ces figures : le premier est un front qui se propage progressivement vers la base de la structure tandis que le deuxième, qui apparaît séparé du premier et près de la surface, est généré lors du passage journalier par une phase de redoux ($T_{air} > 0^\circ\text{C}$).

La variation de T_{air} entraîne des fluctuations de température au cours temps dans la structure de chaussée et les figures ci-dessous montrent que ces fluctuations s'amortissent en profondeur. Cet amortissement peut être quantifié en mesurant l'évolution de l'amplitude en fonction de la profondeur. Le facteur d'amortissement F_d^{30} est défini comme le rapport entre l'amplitude à une certaine profondeur $A(z)$ et l'amplitude à la surface $A(z = 0)$ (relation 5.7). Afin de s'éloigner le plus possible des effets induits par les conditions initiales l'amortissement est calculé à $t = 30$ jours.

$$F_d^{30}(z) = \frac{A(z)}{A(z = 0)} \quad (5.7)$$

Sur la Figure 5.12 est tracée l'évolution de F_d^{30} en fonction de la profondeur pour $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$.

Ces résultats montrent que l'amortissement augmente avec la profondeur et dans le cas $\theta = 10\%$, F_d s'annule à une profondeur plus grande que $\theta = 0\%$. Autrement dit, à profondeur

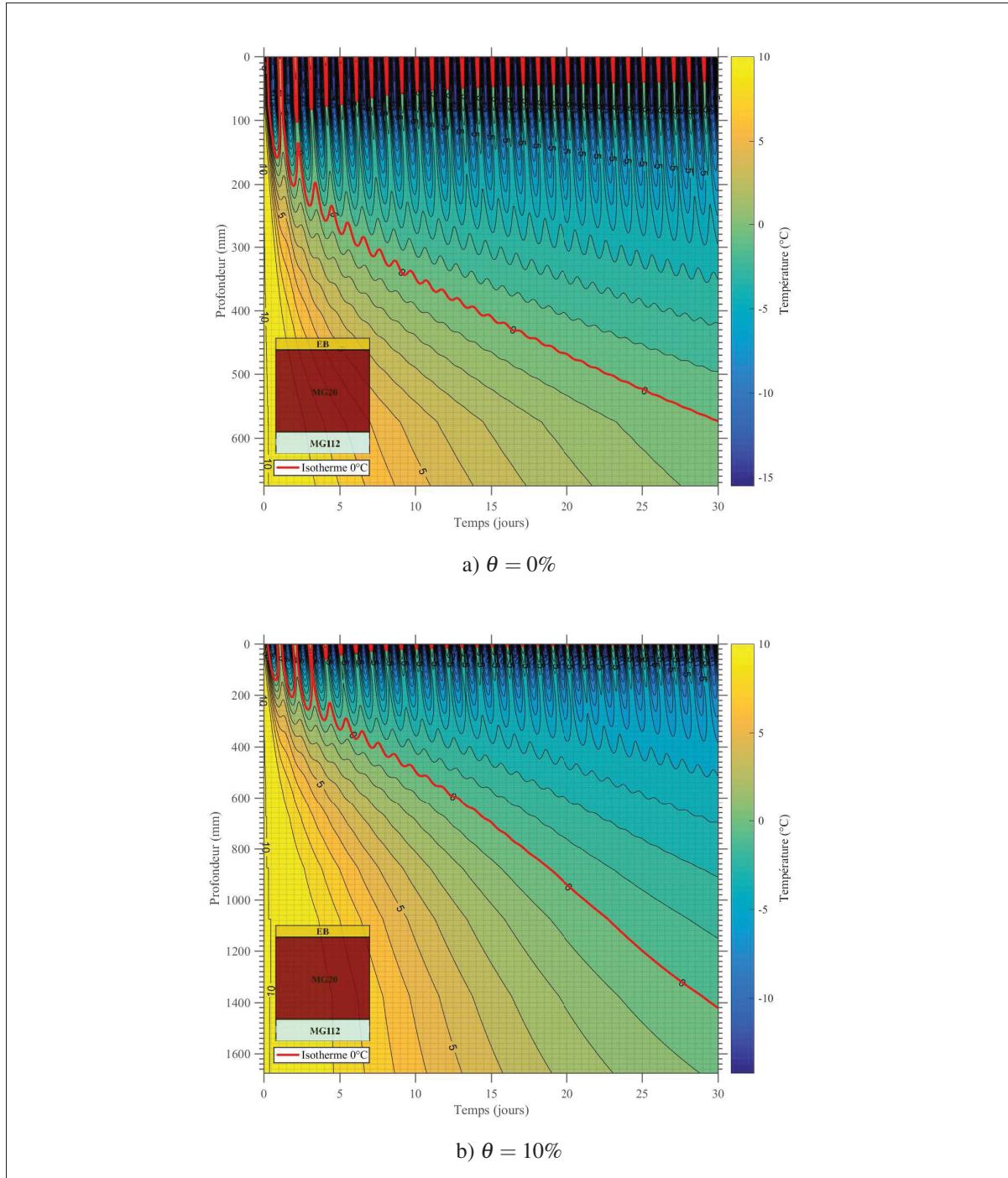


Figure 5.11 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour le cas #1, pour T_{air}^{sin} , état sec : S ($\theta = 0\%$) et partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$)

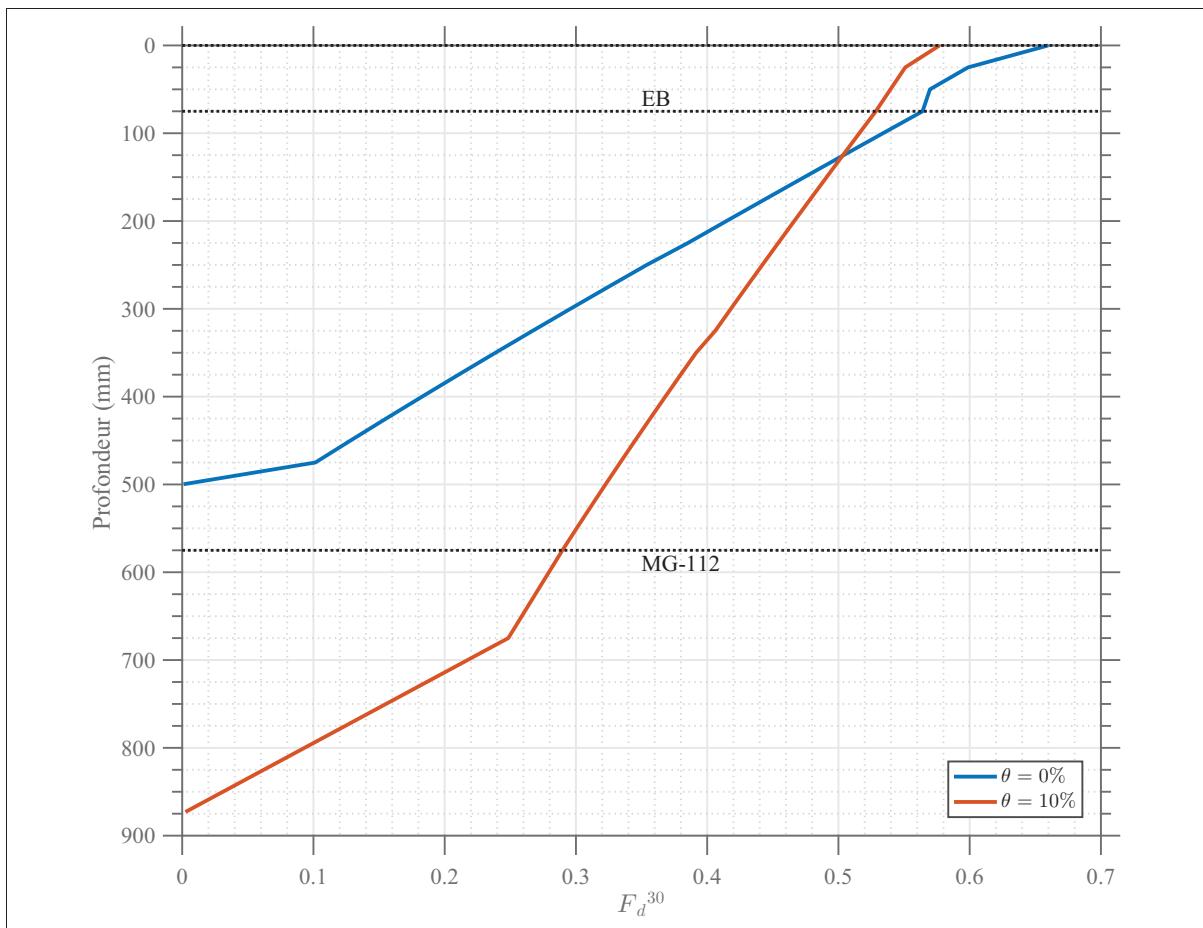


Figure 5.12 Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas #1, pour $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$ et à $t=30j$

égale, les fluctuations de la température de l'air ont moins d'effet dans le cas $\theta = 0\%$ que pour $\theta = 10\%$. Cela n'est cependant pas le cas proche de la surface où le comportement est inversé et les fluctuations journalières sont relativement plus amorties dans le cas où $\theta = 10\%$.

Enfin, le Tableau 5.6 donne les profondeurs de pénétration de l'isotherme 0°C dans les deux cas. Les valeurs obtenues indiquent que la propagation du front de gel se fait plus rapide et plus profonde dans le cas où $\theta = 10\%$ avec un profondeur maximale de 1420 mm au bout de 30 jours.

Tableau 5.6 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours

	Jours					
	5	10	15	20	25	30
$\theta = 0\%$	276	349	409	468	523	573
$\theta = 10\%$	334	496	697	938	1197	1420

*en millimètres

5.4.2 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 0\%$)

Les Figures 5.13 à 5.15 présentent les résultats obtenus respectivement pour les cas d'étude #2/#5, #3/#6 et #4/#7, et ce, dans le cas où $\theta = 0\%$. Sur ces figures est également représentée l'évolution du front de gel ainsi que celle obtenue dans le cas de référence. Ces résultats s'apparentent à ceux obtenus dans le cas #1 (Figure 5.11a) avec visiblement des profondeurs de pénétration du front de gel différentes d'un cas à l'autre.

Le Tableau 5.7 donne les valeurs de profondeurs de pénétration du front de gel obtenues tous les 5 jours ainsi que l'écart relatif avec le cas #1.

Dans les cas #2, #3 et #4, la profondeur de pénétration du front de gel est inférieure à celle du cas de référence avec un écart relatif (en valeur absolue) qui atteint un maximum ([20% ; 5j] (#2), [28% ; 15j] (#3), [30% ; 30j] (#4)) pour ensuite devenir relativement constant avec une légère décroissance. Au bout de 30 jours, c'est dans le cas #4 que le gel pénètre le moins profond (401 mm, (-30%)).

Pour les cas #5, #6 et #7, les profondeurs de pénétration de l'isotherme 0°C sont plus importantes que celles obtenues dans le cas de référence. En revanche l'écart décroît rapidement dans le cas #7 avec au bout de 15 jours, une profondeur de pénétration du front de gel moins importante que le cas de référence. Dans les autres cas, la profondeur de l'isotherme 0°C reste supérieure au cas de référence pendant quelques jours de plus ([(+1)% ; 25j] (#5), [(+2)% ; 20j] (#7)).

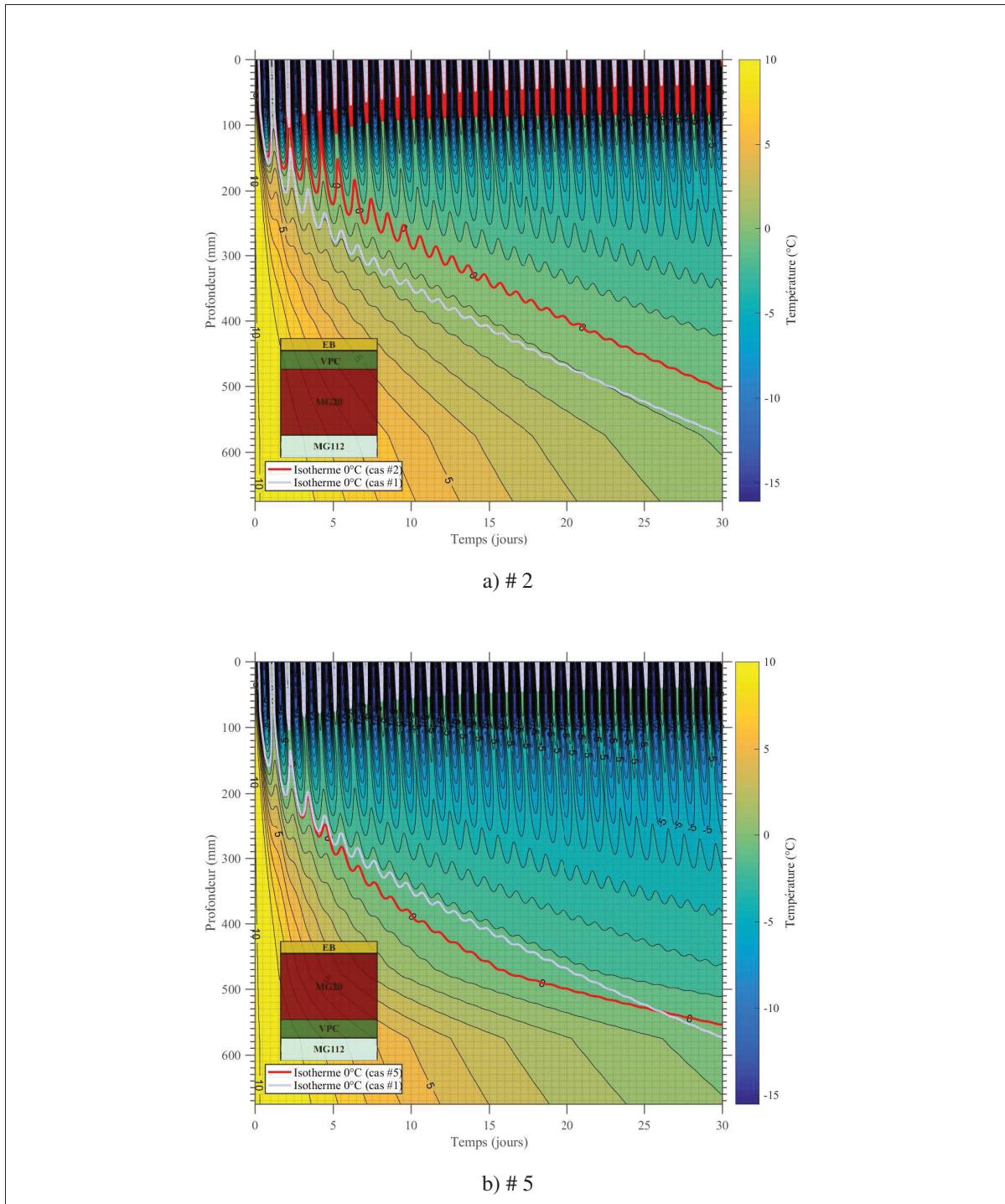


Figure 5.13 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})

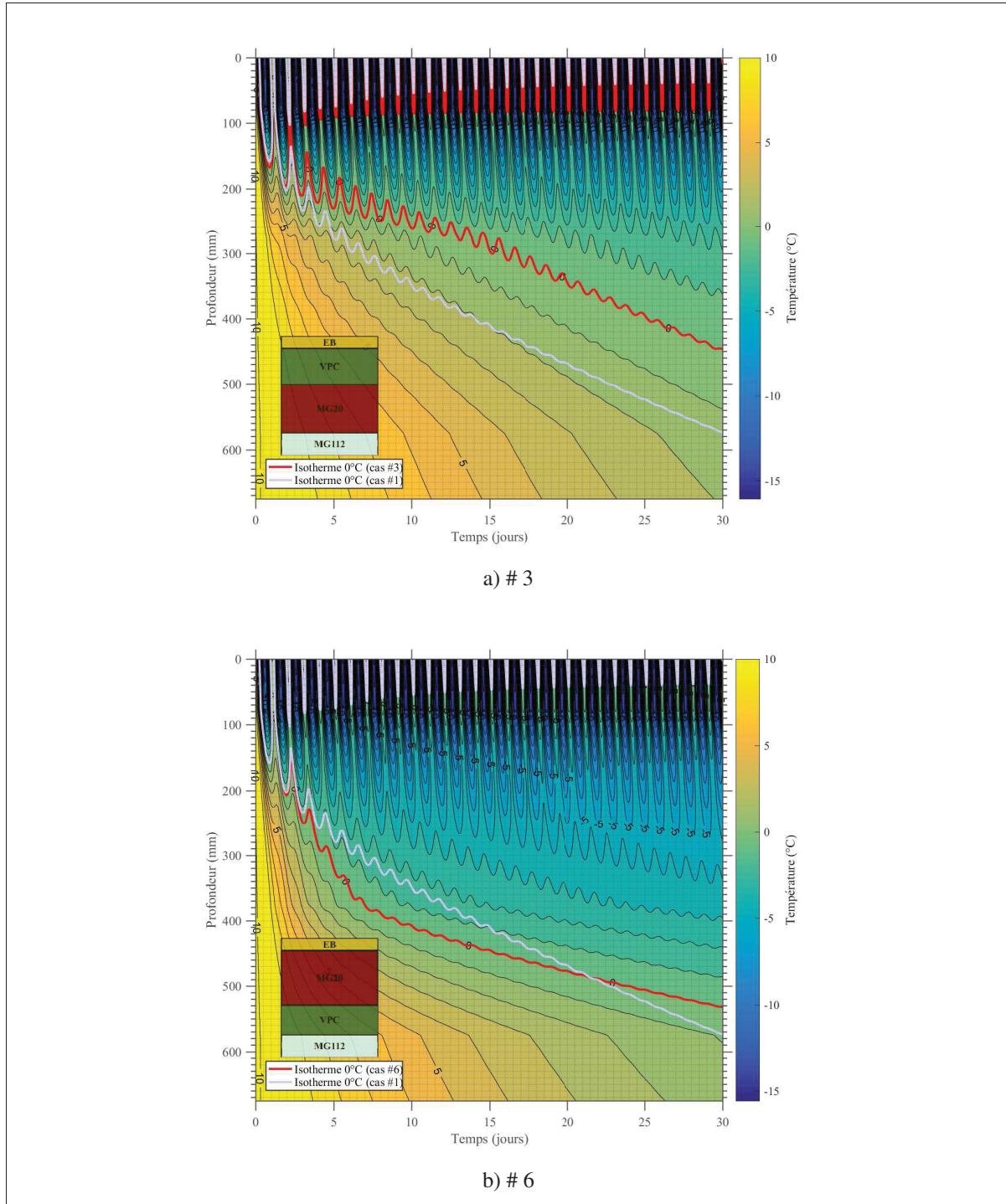


Figure 5.14 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})

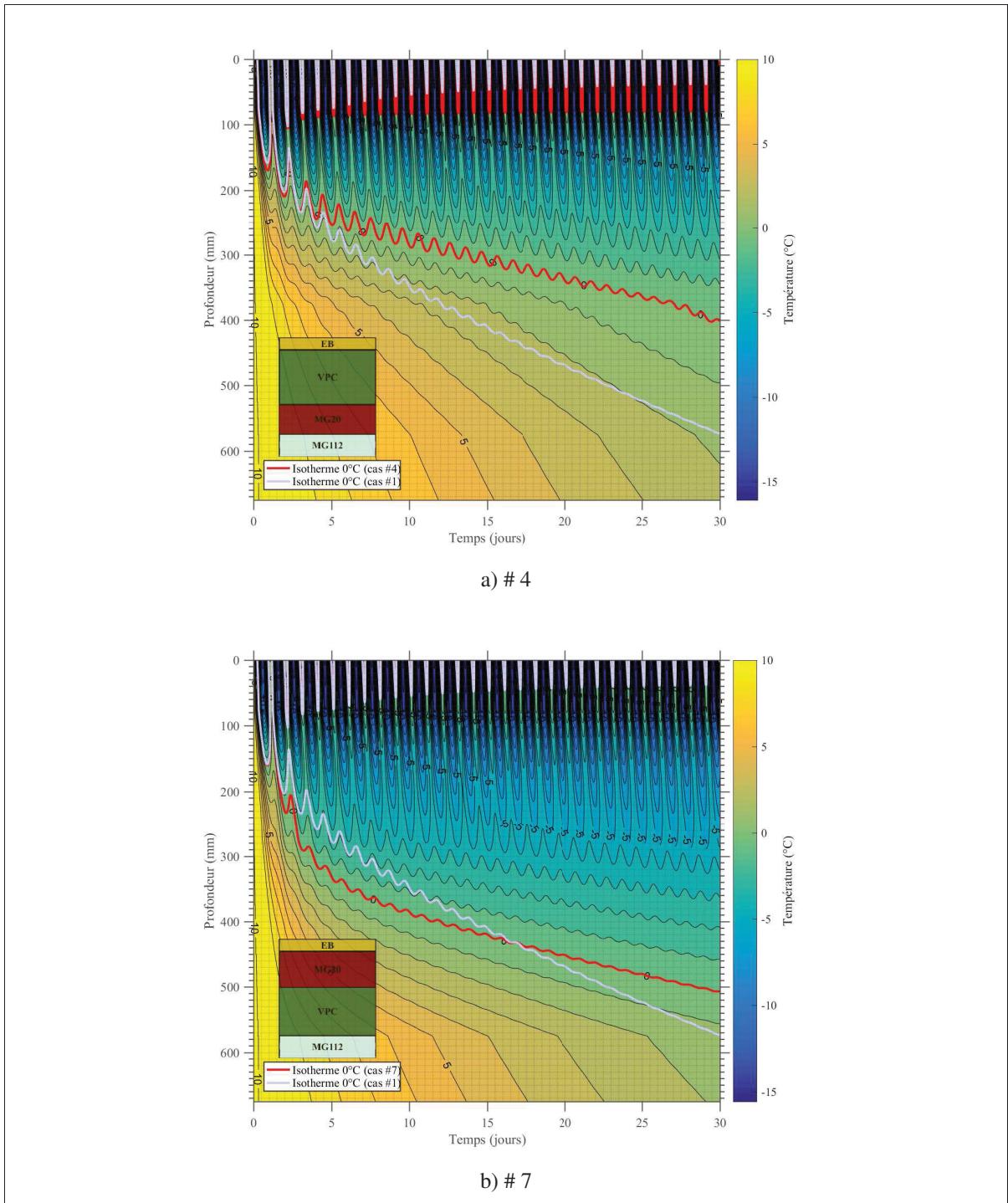


Figure 5.15 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état sec : S ($\theta = 0\%$), T_{air}^{sin})

Tableau 5.7 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 0\%$ (profondeur en (mm))

(T_{air}^{sin})	Jours					
Cas	5	10	15	20	25	30
#1	276 (0) ⁽¹⁾	349 (0)	409 (0)	468 (0)	523 (0)	573 (0)
#2	221 (-20)	287 (-18)	341 (-17)	396 (-15)	451 (-14)	504 (-12)
#3	231 (-16)	262 (-25)	296 (-28)	343 (-27)	394 (-25)	446 (-22)
#4	254 (-8)	286 (-18)	313 (-23)	338 (-28)	364 (-30)	401 (-30)
#5	289 (+5)	385 (+10)	458 (+12)	499 (+7)	528 (+1)	554 (-3)
#6	319 (+16)	407 (+17)	445 (+9)	476 (+2)	505 (-3)	531 (-7)
#7	331 (+20)	385 (+10)	419 (+2)	450 (-4)	480 (-8)	506 (-12)

⁽¹⁾ : la valeur entre parenthèses correspond à l'écart relatif entre les profondeurs du front de gel à celle de la structure de chaussée de référence (cas #1) exprimé en %

Enfin, l'évolution du facteur d'amortissement F_d^{30} des 7 cas d'étude est représentée sur la Figure 5.16. Dans l'ensemble, le comportement des cas #2 à #7 est similaire à celui du cas de référence avec un amortissement légèrement plus rapide dans les cas où la couche de VPC est placée à l'interface entre le MG20 et l'EB. Proche de la surface, les cas #2, #3 et #4 présentent un facteur d'amortissement légèrement supérieur à celui des autres cas. La profondeur à partir de laquelle les fluctuations de T_{air} n'ont plus d'effet ($F_d^{30}(z) = 0$) se trouve comprise entre 480 et 520 mm dans les 7 cas d'étude.

5.4.3 Incorporation de couches de VPC ($\theta = 10\%$)

Les Figures 5.17 à 5.19 présentent les résultats obtenus respectivement pour les cas d'étude #2/#5, #3/#6 et #4/#7, et ce, pour $\theta = 10\%$. Sur ces figures est également représentée l'évolution du front de gel ainsi que celle obtenue dans le cas de référence.

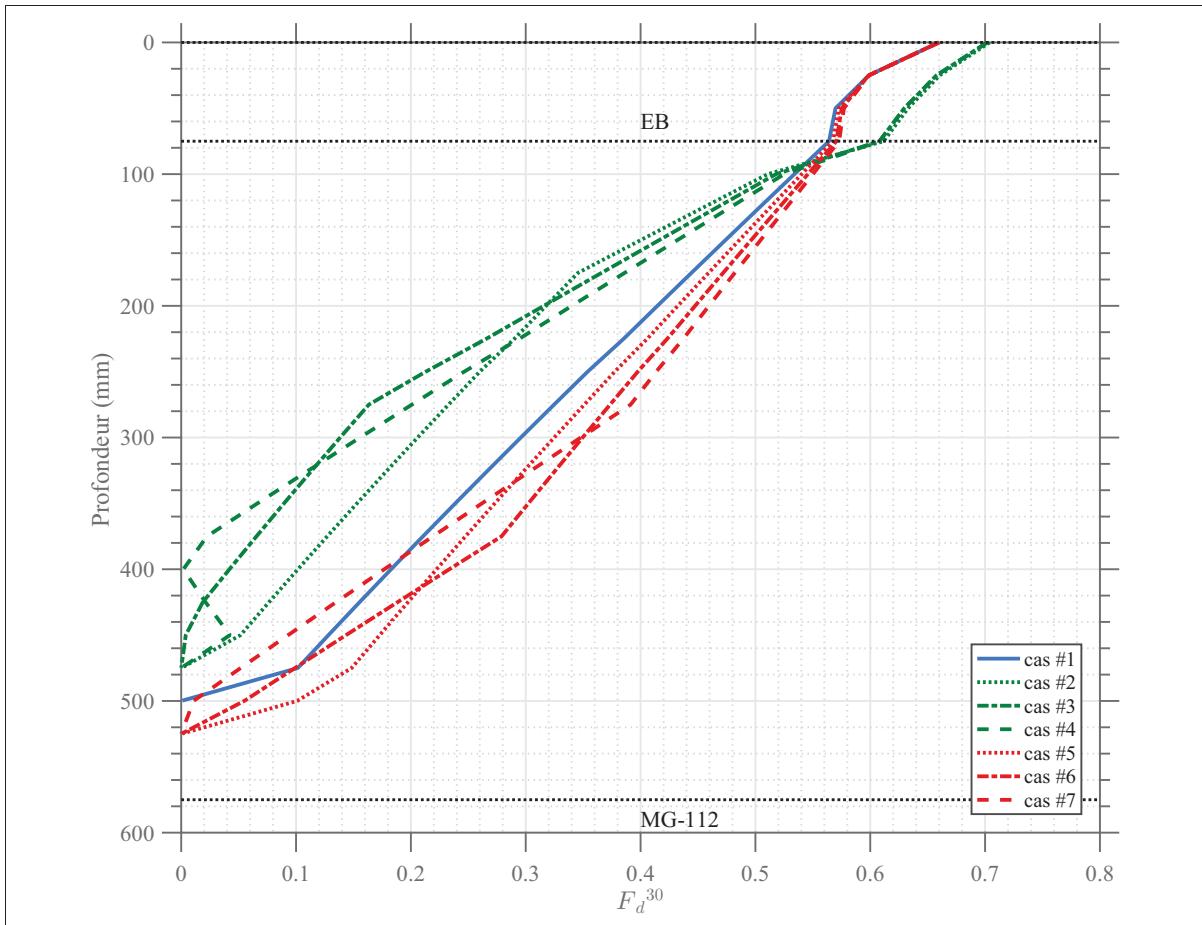


Figure 5.16 Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas où $\theta = 0\%$ et à $t=30j$

Le Tableau 5.8 donne les profondeurs atteintes par le front de gel tous les 5 jours, et ce, pour les 7 cas d'étude.

Dans les cas #2, #3 et #4, les profondeurs de pénétration de l'isotherme 0°C sont inférieures à celles obtenues dans le cas de référence avec notamment un écart relatif maximal (en valeur absolue) atteint à différents instants suivant le cas d'étude : [48% ; 5j] (#2), [55% ; 15j] (#3), [61% ; 25j] (#4). C'est dans le cas #4 que la profondeur de pénétration est la plus faible et au bout de 30 jours la profondeur atteinte est de 641 mm soit un écart relatif de **-55%** avec la valeur obtenue dans le cas #1.

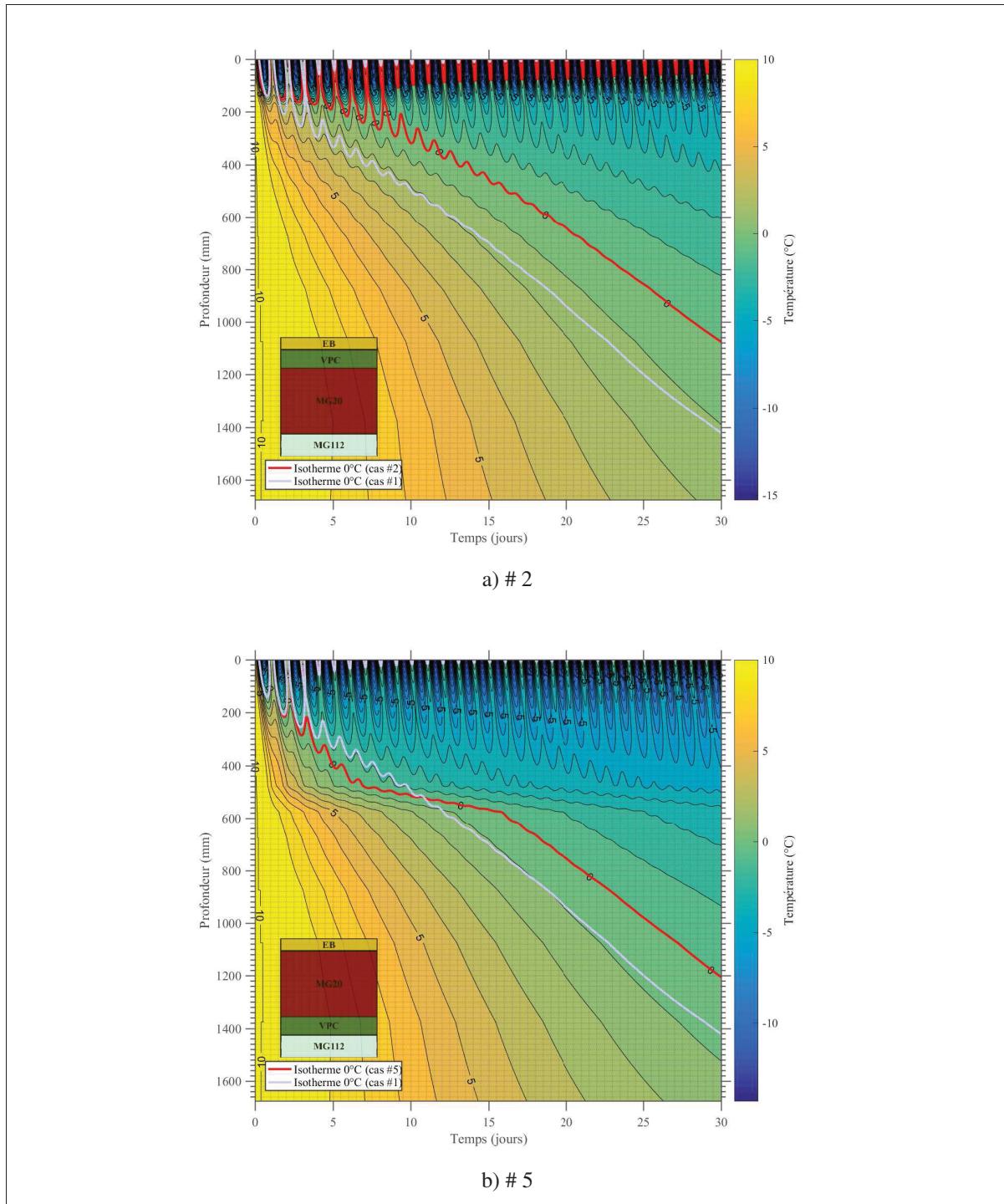


Figure 5.17 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #2 et #5 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})

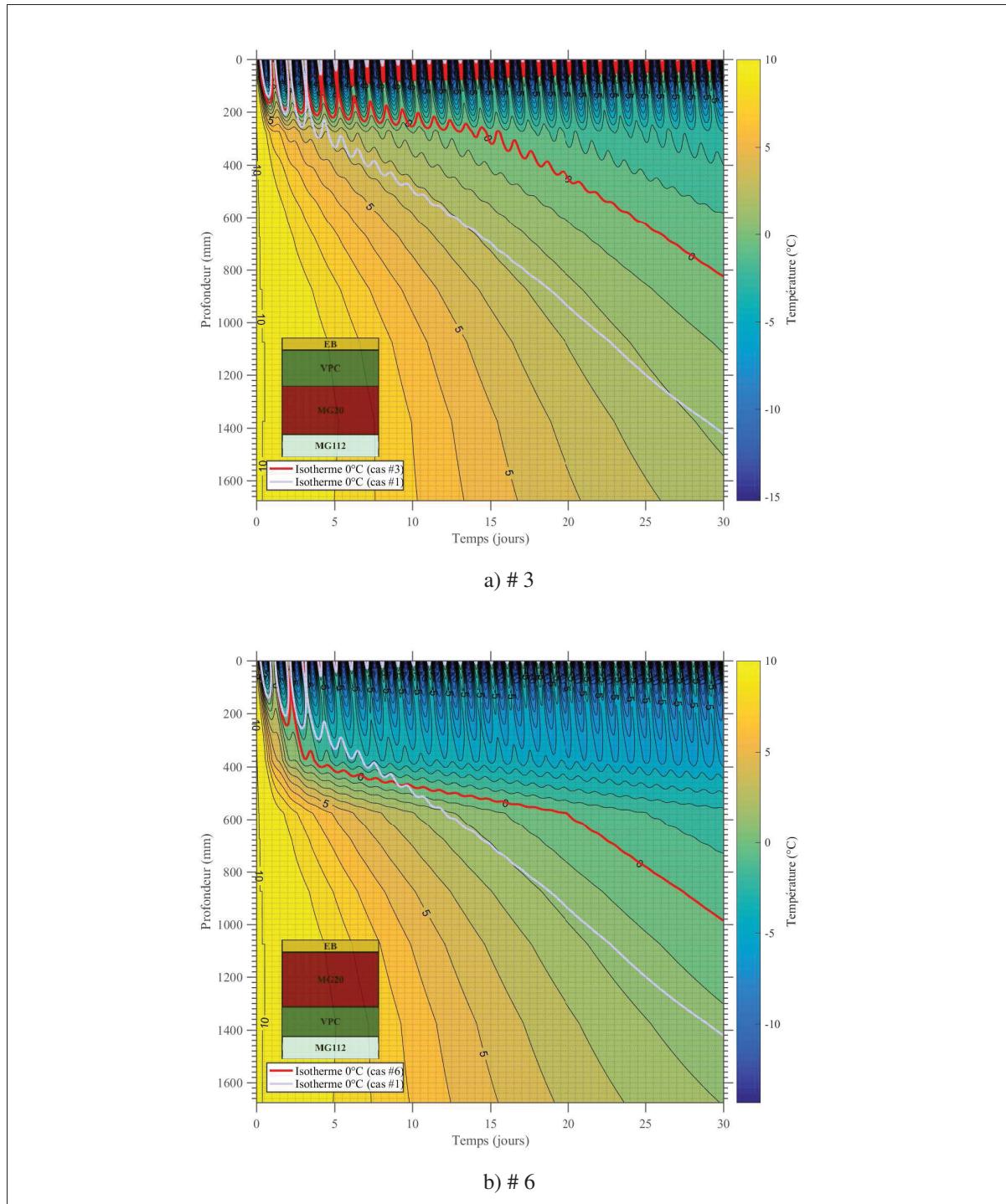


Figure 5.18 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #3 et #6 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})

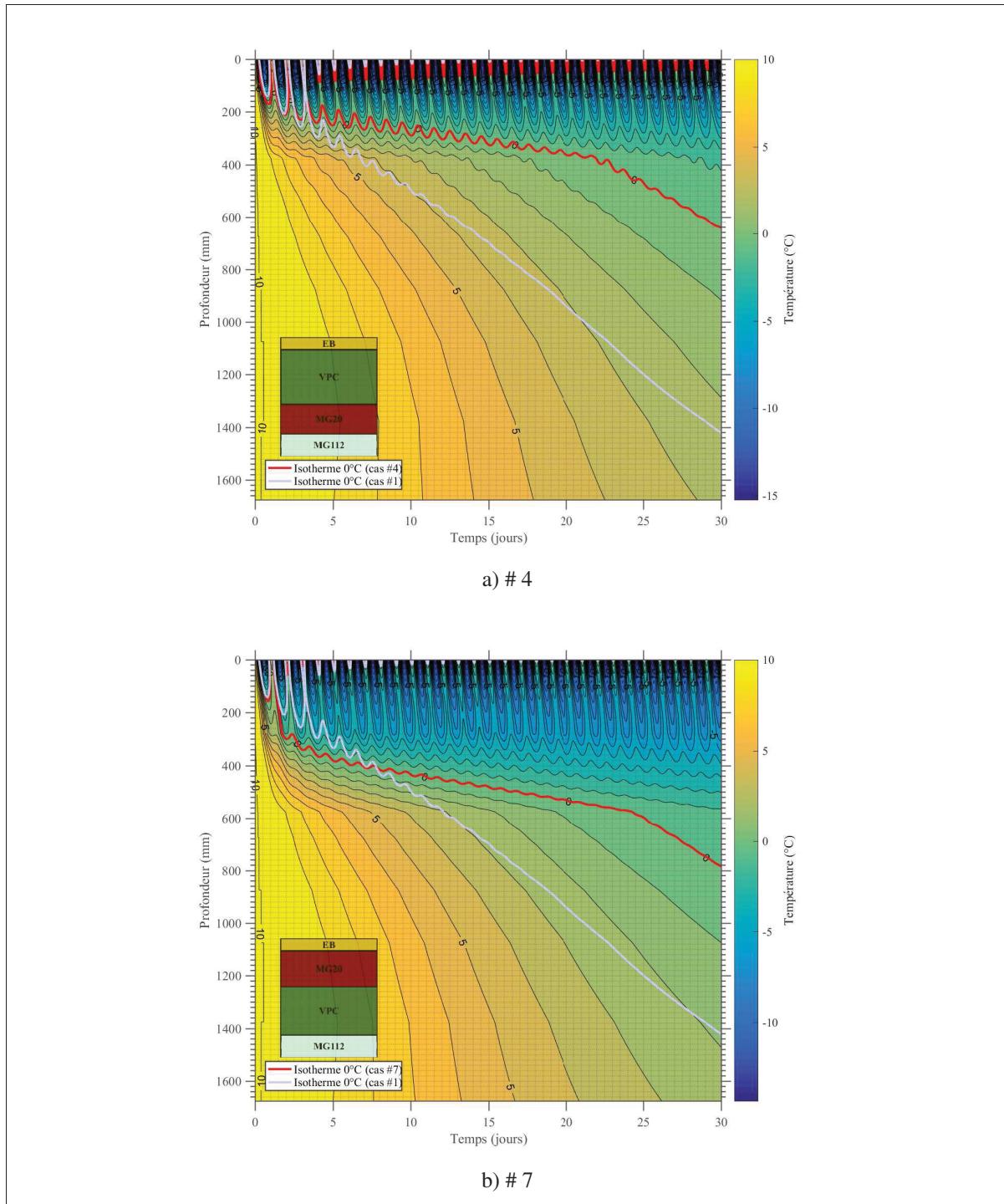


Figure 5.19 Évolution de la température dans la structure de chaussée en fonction de la profondeur pour les cas d'étude #4 et #7 (état partiellement saturé : PS ($\theta = 10\%$), T_{air}^{sin})

Tableau 5.8 Profondeur atteinte par l'isotherme 0°C tous les 5 jours dans les 7 cas d'étude avec $\theta = 10\%$ (profondeur en (mm))

(T_{air}^{sin})	Jours					
	5	10	15	20	25	30
#1	334 (0) ⁽¹⁾	496 (0)	697 (0)	938 (0)	1197 (0)	1420 (0)
#2	173 (-48)	319 (-36)	457 (-34)	640 (-32)	855 (-29)	1075 (-24)
#3	217 (-35)	254 (-49)	317 (-55)	450 (-52)	625 (-48)	824 (-42)
#4	252 (-25)	290 (-42)	325 (-53)	362 (-61)	468 (-61)	641 (-55)
#5	399 (+19)	513 (+3)	567 (-19)	752 (-20)	978 (-18)	1203 (-15)
#6	416 (+25)	475 (-4)	524 (-25)	579 (-38)	780 (-35)	984 (-31)
#7	381 (+14)	434 (-13)	480 (-31)	530 (-43)	596 (-50)	784 (-45)

⁽¹⁾ : la valeur entre parenthèses correspond à l'écart relatif entre les profondeurs du front de gel à celle de la structure de chaussée de référence (cas #1) exprimé en %

En ce qui concerne les cas #5, #6 et #7, la profondeur atteinte par le front de gel dans les premiers jours est supérieure à celle obtenue dans le cas de référence et au bout de 10 jours, la présence d'une couche de VPC ralentit la progression du front de gel et l'écart se creuse avec le cas de référence. Au bout de 30 jours, l'écart (en valeur absolue) est d'autant plus grand que l'épaisseur de la couche de VPC est grande.

Sur la Figure 5.20 sont représentés la variation du facteur d'amortissement (F_d^{30}) obtenu pour les 7 cas d'étude et avec $\theta = 10\%$.

Proche de la surface, le facteur d'amortissement est plus élevé dans les cas #2, #3 et #4 comparativement aux autres cas. En revanche, au-delà de la couche d'EB, F_d^{30} diminue moins rapidement dans les cas #5, #6 et #7 jusqu'à ce que soit atteinte la couche de VPC qui tend à amortir l'effet des fluctuations de T_{air} . Le facteur d'amortissement s'annule à 680 mm dans les

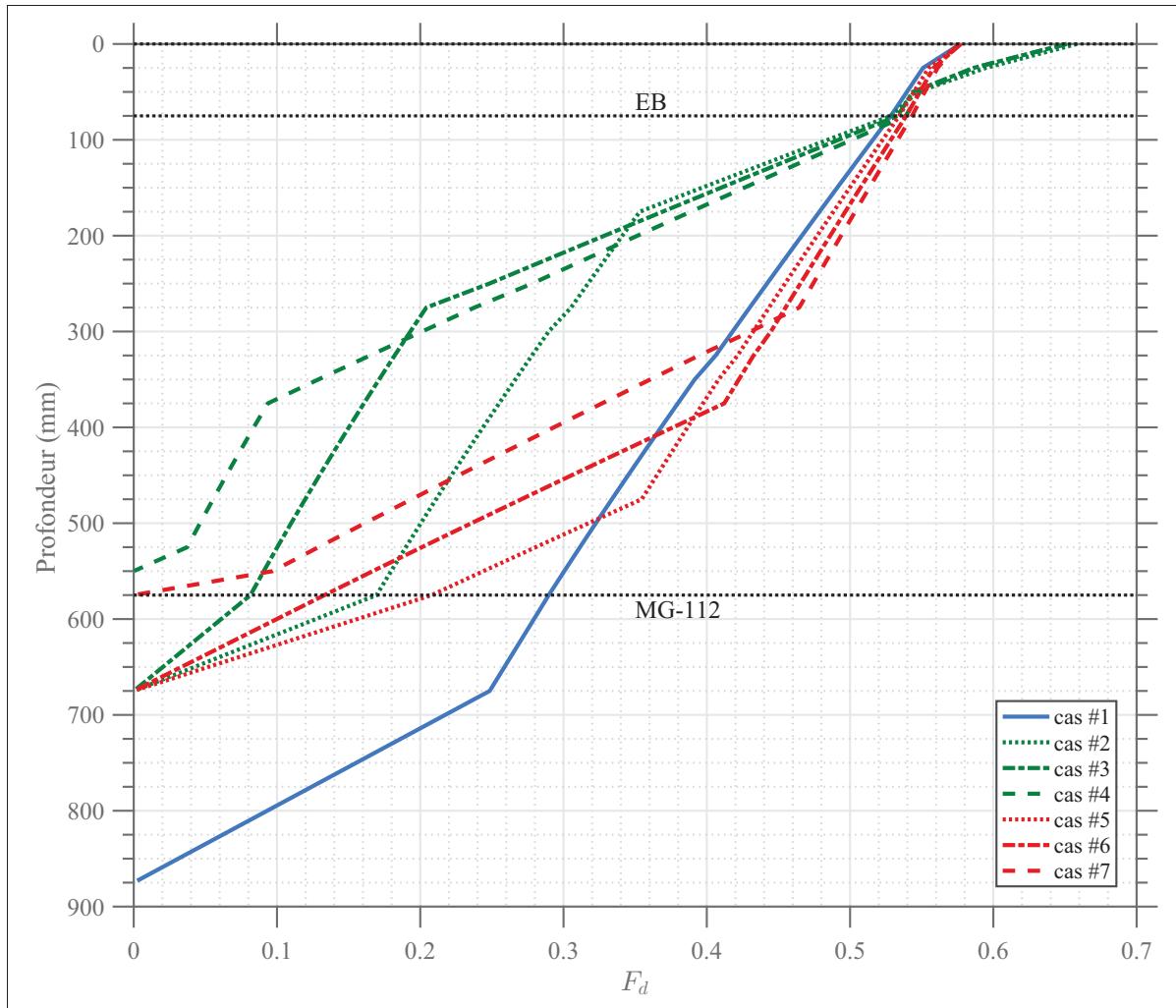


Figure 5.20 Évolution du facteur d'amortissement (F_d^{30}) en fonction de la profondeur dans le cas où $\theta = 10\%$ et à $t=30j$

cas #3, #4, #6, #7 et autour de 600 mm dans les cas #2 et #5. Dans le cas de référence, cette valeur est de 880 mm soit environ 200 mm de plus que les autres cas.

CHAPITRE 6

SYNTHÈSE ET ANALYSE

Ce chapitre présente une synthèse des résultats expérimentaux ainsi qu'une analyse portant sur les résultats des modélisations numériques.

6.1 Synthèse des essais de conductivité thermique

6.1.1 Effet de la porosité à l'état sec ($\theta = 0\%$)

À l'état sec, l'écart observé entre la classe 1 et les classes 2 et 3 (dans le cas du VPC et de la pierre calcaire) s'explique en comparant les valeurs de porosité obtenue pour chacun de ces mélanges. Pour les besoins de cette section, notons n_V et n_P la porosité du VPC et de la pierre calcaire respectivement. Les porosités obtenues sont regroupées dans le Tableau 6.1

Tableau 6.1 Porosités obtenues dans le cas des classes 1, 2 et 3, à $\theta = 0\%$

Classe	n_V (%)	n_P (%)
1 : 0,08-1,25 mm	28,7	30,1
2 : 0,630-2,5 mm	40,9	38,3
3 : 1,25-5 mm	38,0	38,5

La porosité a une influence directe sur la conductivité thermique. En effet, une diminution de la porosité conduit à un nombre plus grand de contact entre les granulats et donc à un meilleur transfert du flux thermique (Farouki (1981)). À titre d'exemple, Terzaghi (1952) illustre la variation de conductivité thermique, en fonction de la porosité, de sable et d'argile en condition gelée et non gelée (Figure 6.1). Les résultats montrent, entre autres, qu'à mesure que la porosité approche les 100%, la conductivité thermique des sols saturés et gelés tend à approcher la conductivité thermique de la glace, tandis que celle des sols saturés non gelés approche celle

de l'eau. A l'autre extrême, lorsque la porosité diminue vers 0%, la conductivité thermique tend vers celle des particules solides.

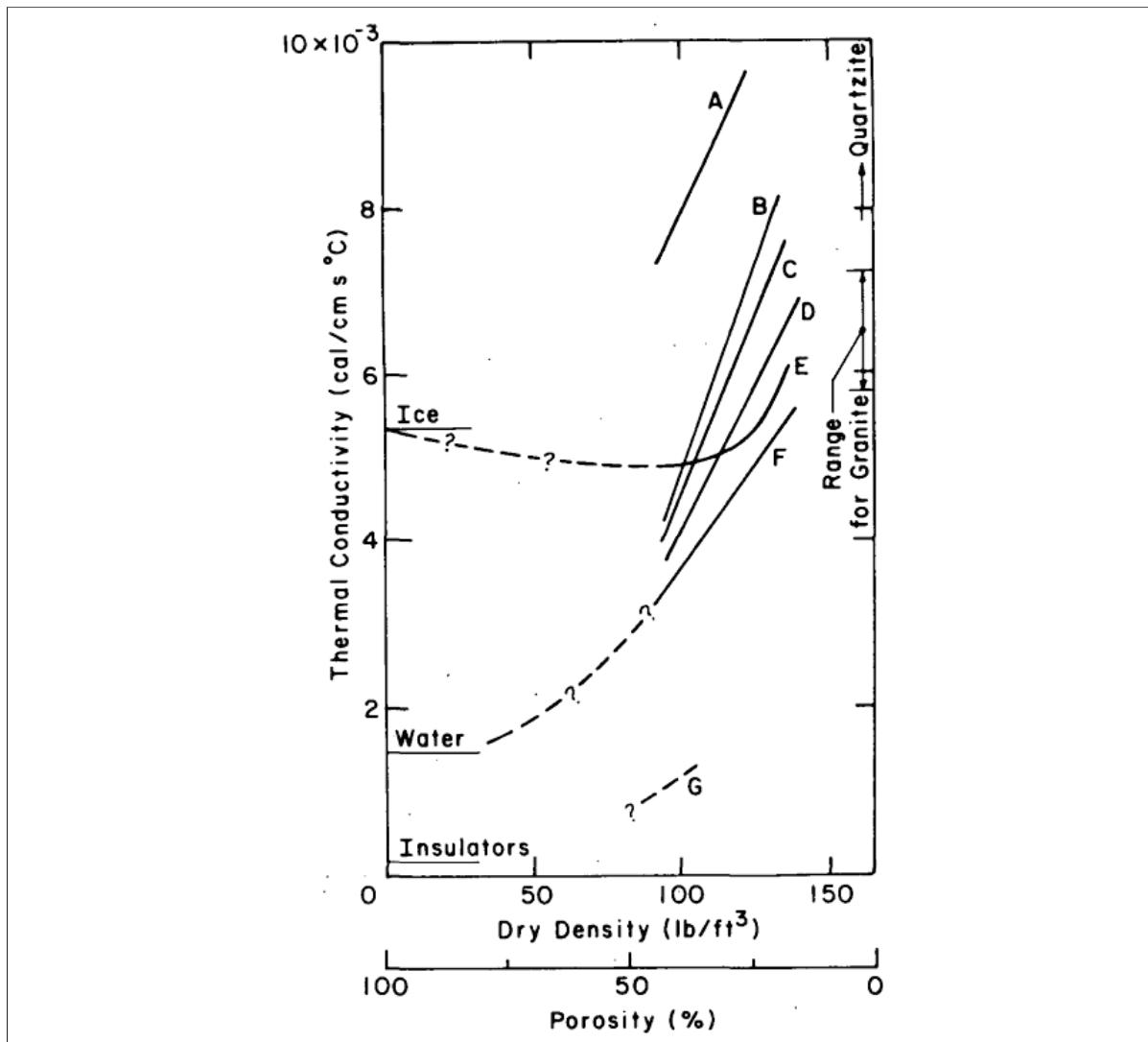


Figure 6.1 Conductivité thermique de sable et d'argile en condition gelée et non gelée, en fonction de la masse volumique sèche : A-sable gelé et saturé, B-sable non gelé et saturé, C-sable gelé et $S_r = 75\%$, D-sable non gelé et $S_r = 50\%$, E-argile gelée et saturée, F-argile non gelé et saturé, G-sable non gelé et non gelé

Tirée de Farouki (1981)

Dans le cas du présent projet de recherche, la porosité de la classe 1 (0,08-1,25 mm) est plus faible que celle des classes 2 (0,630-2,5 mm) et 3 (1,25-5 mm). La présence de particules fines dans les mélanges de classe 1 vient combler l'espace entre les plus grosses particules, donnant lieu à une plus forte densité de matière par unité de volume et une plus faible porosité. Par conséquent, les valeurs de conductivité thermique sont plus élevées dans le cas de la classe 1 comparée à celles des classes 2 et 3. Cette différence va d'ailleurs se manifester de manière plus marqué à mesure que la teneur en eau va augmenter.

6.1.2 Effet de la teneur en eau

La section 1.4.3.2 présente sommairement la relation entre la présence d'eau dans un milieu poreux et sa conductivité thermique. Les sols secs ont une faible conductivité thermique, car le contact entre les granulats n'est pas bon et l'augmentation de la teneur en eau tend à assurer un meilleur transport de la chaleur, et de fait à des valeurs de conductivité thermique plus élevées. Les résultats présentés dans les sections précédentes corroborent cette hypothèse.

La Figure 6.2 présente les résultats rapportés par Tarnawski & Leong (2000) concernant l'évolution de la conductivité thermique de sols provenant de différentes localisations dans la région Est de Washington. Les caractéristiques de ces sols sont données dans le Tableau 6.2 avec notamment les ratios de sable, de limon et d'argile dans chacun des sols, notés respectivement m_{sa} , m_{si} et m_{cl} .

Tableau 6.2 Caractéristiques géotechniques et minéralogiques des sols de la Figure 6.2

Sol	n	ρ_d (kg/m ³)	m_{sa}	m_{si}	m_{cl}
Quincy	0,434	1500	0,950	0,035	0,00335
Ritzville	0,528	1250	0,300	0,645	0,054
Walla Walla	0,528	1250	0,300	0,606	0,073
Palouse	0,528	1250	0,200	0,676	0,088
Naff	0,528	1250	0,200	0,566	0,143

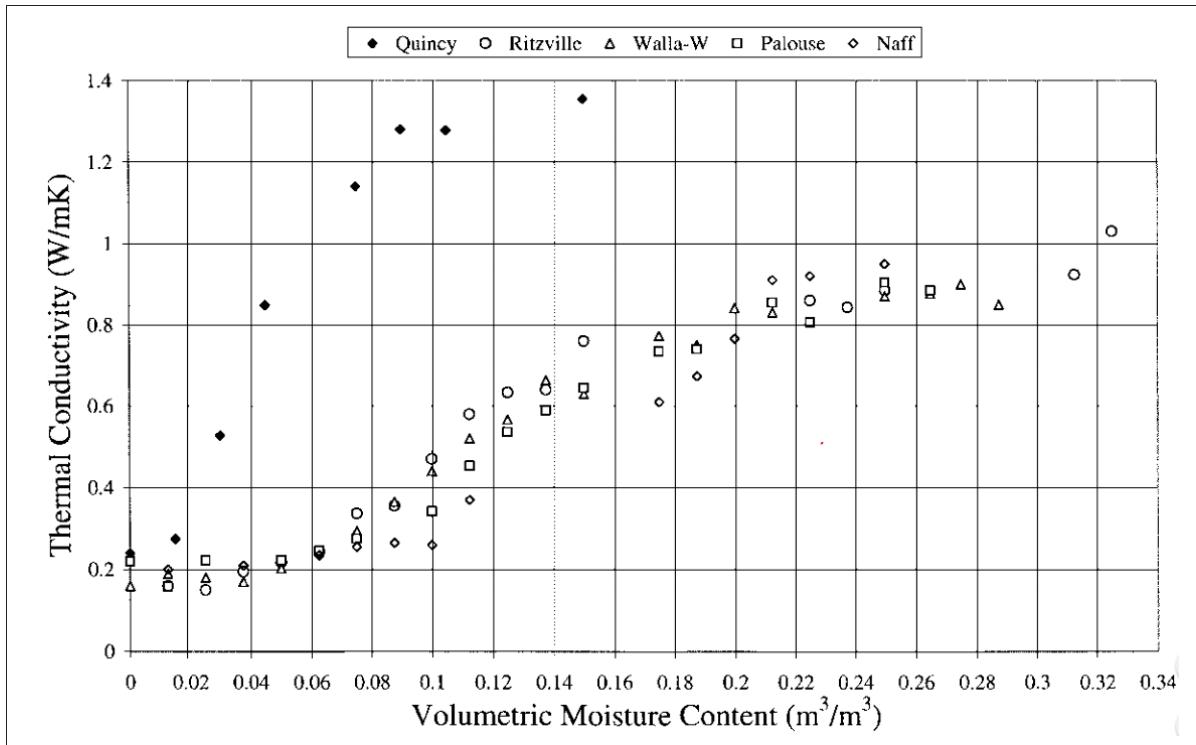


Figure 6.2 Conductivité thermique de différents sols

en fonction de la teneur en eau volumique

Tirée de Tarnawski & Leong (2000)

La majorité des sols présentés à la Figure 6.2 contiennent une grande proportion de limon et seul le sol de Quincy peut être considéré comme un sable. De ce fait, il est pertinent de comparer les résultats obtenus dans le cadre du présent projet de recherche avec les résultats du sol de Quincy ; les autres sols ayant, par définition, des granulats de diamètre inférieur et une porosité élevée.

Ainsi, notons dans un premier temps que la conductivité thermique obtenue à teneur en eau nulle est d'environ 0,2 W/(m.K), soit approximativement ce qui fut mesuré dans le cas de la pierre calcaire. Ensuite, la conductivité thermique du sol de Quincy croît rapidement puis semble se stabiliser autour d'une valeur maximale comprise entre 1,2 et 1,4 W/(m.K). Dans le cas des mélanges à l'étude, un comportement analogue fut observé et l'ordre de grandeur des valeurs de conductivité thermique obtenues est similaire à celui de la classe 1 (0,08-1,25

mm) de pierre calcaire qui, de par sa granulométrie, peut être considéré comme un sable de taille comparable à celle du sol de Quincy. Aucune étude ne s'est intéressée spécifiquement à l'évolution de la conductivité thermique de granulats de VPC en fonction de la teneur en eau ; il est donc difficile de statuer rigoureusement sur l'influence de l'eau dans le cas du VPC. Cela étant dit, les mesures effectuées indiquent que la sensibilité de la conductivité thermique d'un sol de VPC vis-à-vis de l'eau est plus faible que celle de la pierre calcaire. Autrement dit, en comparant le comportement du VPC à celui de la pierre, l'augmentation de la conductivité thermique est moins importante dans le cas du VPC, et ce, quelle que soit la classe considérée.

6.1.3 Effet de la teneur en VPC

Au-delà de l'étude sur l'influence de la granulométrie dans le cas du VPC et de la pierre calcaire, les résultats obtenus lors de cette première phase donnent une idée quant à la différence de conductivité thermique entre ces deux matériaux. Nous avons donc remarqué qu'à teneur en eau nulle, la différence de conductivité thermique entre les deux matériaux est certes appréciable, mais les ordres de grandeur sont les mêmes et à l'échelle d'une chaussée ces différences ne sont pas significatives. Au contraire, à teneur en eau équivalente, la différence de conductivité thermique entre les deux matériaux se fait plus marquée et le VPC présente une conductivité thermique plus faible que celle de la pierre calcaire.

L'étude de l'impact de la teneur en VPC s'est faite sur les 3 mélanges définis dans la Tableau 4.9. Les valeurs obtenues à $\theta = 0\%$ sont relativement proches, mais l'influence du VPC se fait sentir dès que de l'eau est introduite dans le milieu. Les résultats indiquent clairement que l'ajout de VPC tend à diminuer la conductivité thermique du mélange (Figure 4.7).

6.2 Synthèse des essais de diffusivité thermique

6.2.1 Effet de la teneur en eau

Tout comme la conductivité thermique, la diffusivité thermique d'un milieu poreux dépend de sa teneur en eau. Les résultats présentés à la Figure 6.3 font référence au travail de Baver *et al.* (1972) et donnent la variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique de différents types de sols. À sec, la diffusivité thermique des différents sols est relativement faible, mais dès lors que de l'eau est introduite dans le milieu, les valeurs augmentent rapidement jusqu'à un seuil au delà duquel un effet inverse est observé, entraînant la diminution de la diffusivité thermique.

A l'état sec ($\theta = 0\%$), aucune différence majeure n'a été observée entre les différentes classes de pierre calcaire testées. Dans le cas du VPC, la classe 1 (0,08-1,25 mm) présente une diffusivité thermique légèrement plus élevée que les deux autres classes granulaires. Au vu des résultats de la phase de calibration et de l'erreur relative moyenne obtenue ($\delta\alpha_r = 4,5\%$), l'écart observé dans le cas du VPC n'est pas jugé significatif.

Pour tous les mélanges examinés, l'ajout d'eau entraîne une hausse de la diffusivité thermique. En revanche, cette augmentation se manifeste différemment suivant la nature des sols étudiés (pierre calcaire et VPC). Dans le cas de la pierre calcaire, les valeurs de diffusivité thermique obtenues sur les 3 classes granulaires sont dans le même ordre de grandeur que celles de la Figure 6.3. La variation de la diffusivité thermique est également similaire avec une augmentation rapide de la diffusivité thermique suivie d'une stabilisation, voire même d'une légère diminution. En ce qui concerne le VPC, l'ajout d'eau, certes, contribue à l'augmentation de la diffusivité thermique, mais la variation est moins importante que pour la pierre de calcaire. En effet, la diffusivité thermique des classes de pierre calcaire varie grossièrement entre 2×10^{-7} m²/s et 5×10^{-7} m²/s tandis que pour le VPC, elle varie entre 2×10^{-7} m²/s et 3×10^{-7} m²/s. Autrement dit, du point de vue de la diffusivité thermique, le VPC est moins sensible à l'augmentation de la teneur en eau que ne l'est la pierre de calcaire. A l'échelle de la chaussée, un

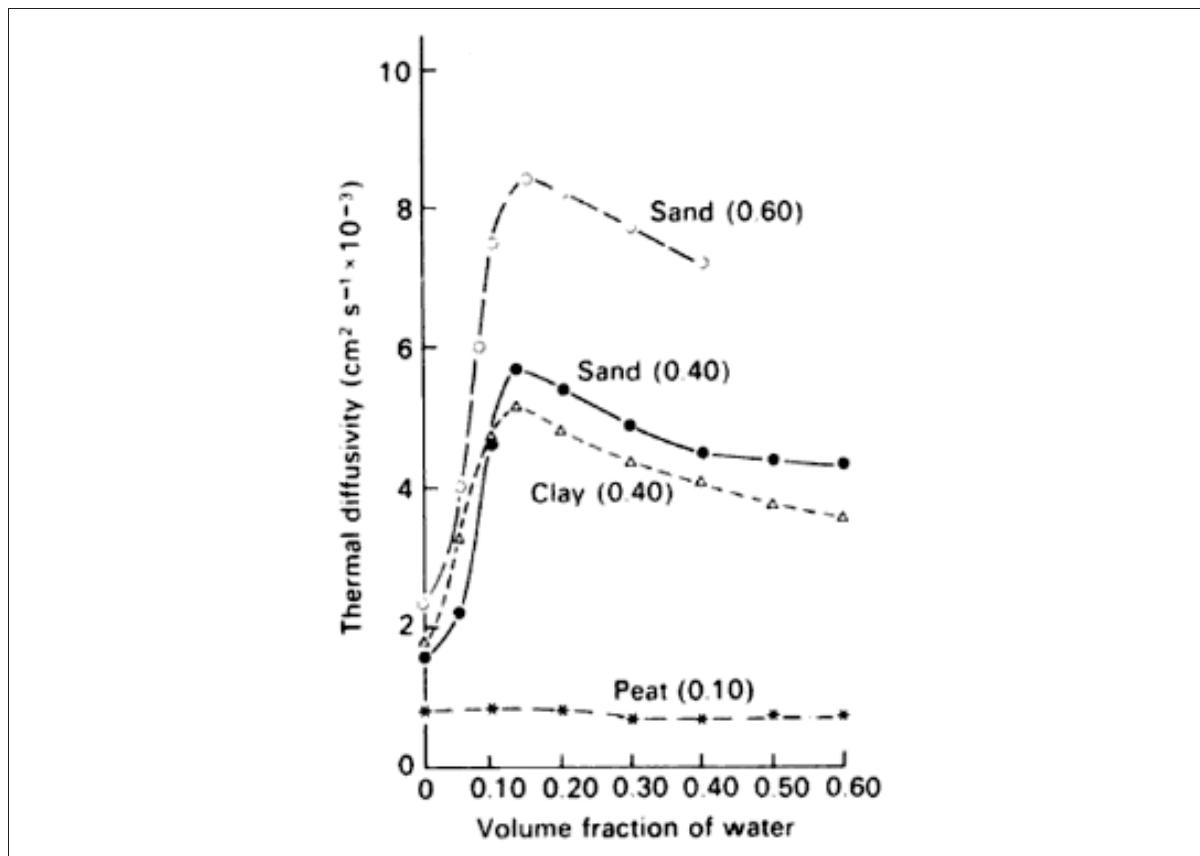


Figure 6.3 Effet de l'eau sur la diffusivité thermique. Note : (0.10), (0.40) et (0.60) représentent la fraction volumique de la phase solide
Tirée de Perry & Goodall (1979)

diminution de la diffusivité thermique implique principalement une augmentation de l'amortissement d'une variation sinusoïdale de la température de l'air. Cet aspect est abordé dans plus de détails lors de l'analyse des résultats de modélisation numérique.

6.2.2 Effet de la teneur en VPC

Un ordre de grandeur de la diffusivité thermique du VPC et de la pierre de calcaire a pu être obtenu grâce aux essais sur les différentes classes granulaires. Les résultats montrent qu'à l'état sec, la diffusivité thermique du VPC est plus faible que celle de la pierre calcaire.

Cette différence se manifeste également dans les résultats obtenus lors des essais sur les différents combinés. Le combiné 75V/25P contient une grande proportion de VPC et l'évolution de la diffusivité thermique est semblable à celle des classes granulaires de VPC, avec notamment une plus faible sensibilité vis-à-vis de l'augmentation de la teneur en eau. La diffusivité thermique du combiné 25V/75P augmente plus rapidement que les autres combinés et ceci est équivalent au comportement observé sur les classes granulaires de pierre de calcaire. L'évolution de la diffusivité thermique du combiné 50V/50P semble être un mélange des deux autres combinés avec une valeur de diffusivité thermique plus faible que celle du combiné 25V/75P à $\theta \simeq 15\%$ mais avec pourtant une valeur maximale de l'ordre de $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Il faut néanmoins noter que le nombre d'essai effectué est relativement faible et d'autres essais sont nécessaires afin de pouvoir confirmer ou infirmer l'analyse proposé ci-dessus. Cela dit, l'augmentation de la teneur en VPC dans un mélange granulaire de pierre calcaire semble diminuer sa diffusivité thermique.

6.3 Modélisation numérique

Les Figures 6.4a et 6.4b représentent respectivement l'évolution de l'isotherme 0°C dans les cas $T_{\text{air}}^{\text{const}}$ et $T_{\text{air}}^{\text{sin}}$, et ce, pour $\theta = 0\%$; les Figures 6.5a et 6.5b donnent l'équivalent lorsque $\theta = 10\%$.

6.3.1 Impact de la teneur en eau

La différence entre les cas où $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$ réside dans les propriétés thermiques des couches de MG20/VPC et de MG112 qui sont différentes d'un cas à l'autre. En l'occurrence, l'augmentation de θ a pour effet d'augmenter la conductivité et la diffusivité thermiques de ces couches, et par conséquent, "facilite" le transfert de chaleur dans la structure de chaussée. Les observations énoncées dans les sections précédentes ont corroboré cette hypothèse avec en particulier des profondeurs de pénétration du front de gel plus grande dans le cas $\theta = 10\%$.

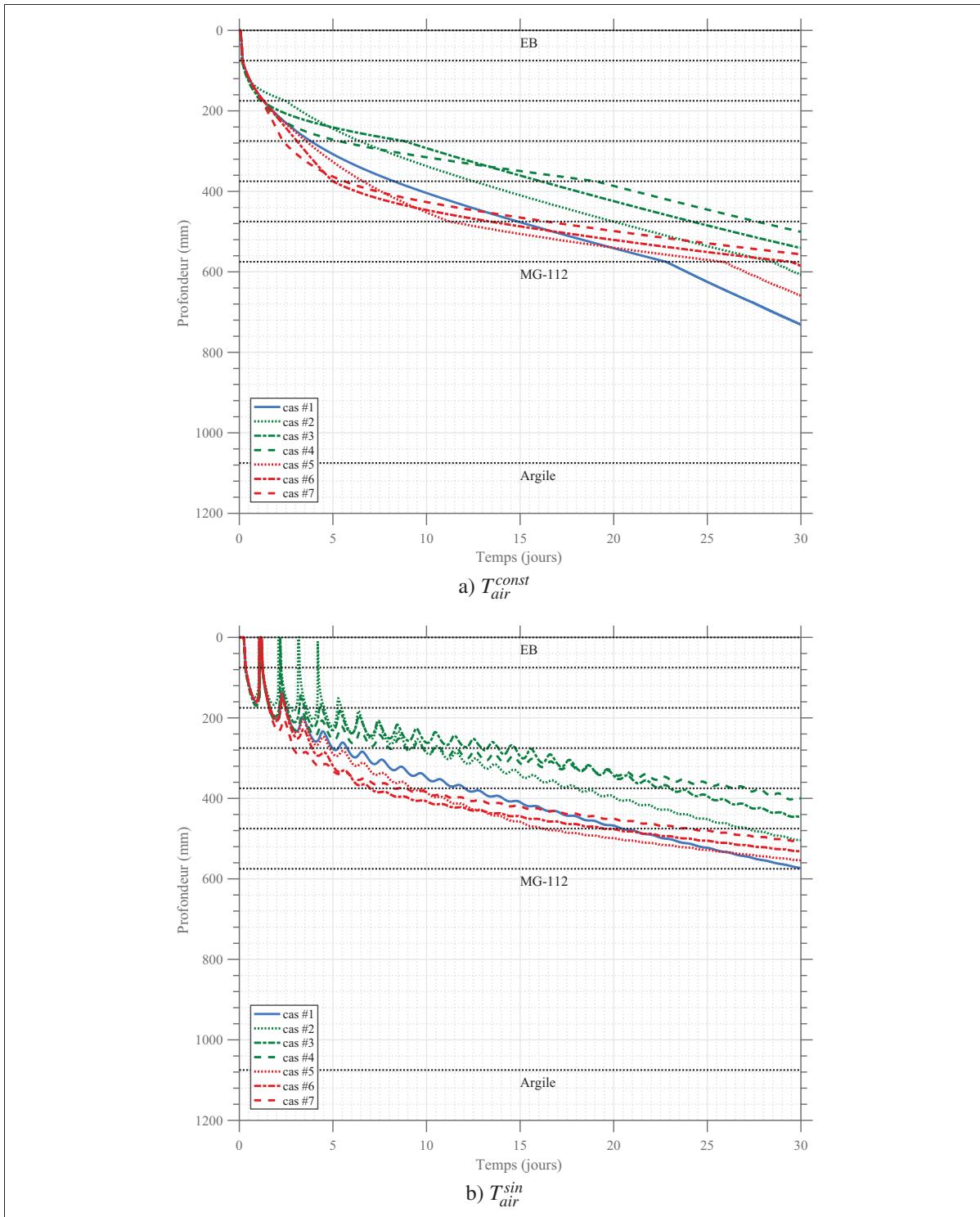


Figure 6.4 Évolution du front de gel dans les cas T_{air}^{const} et T_{air}^{sin} et pour $\theta = 0\%$

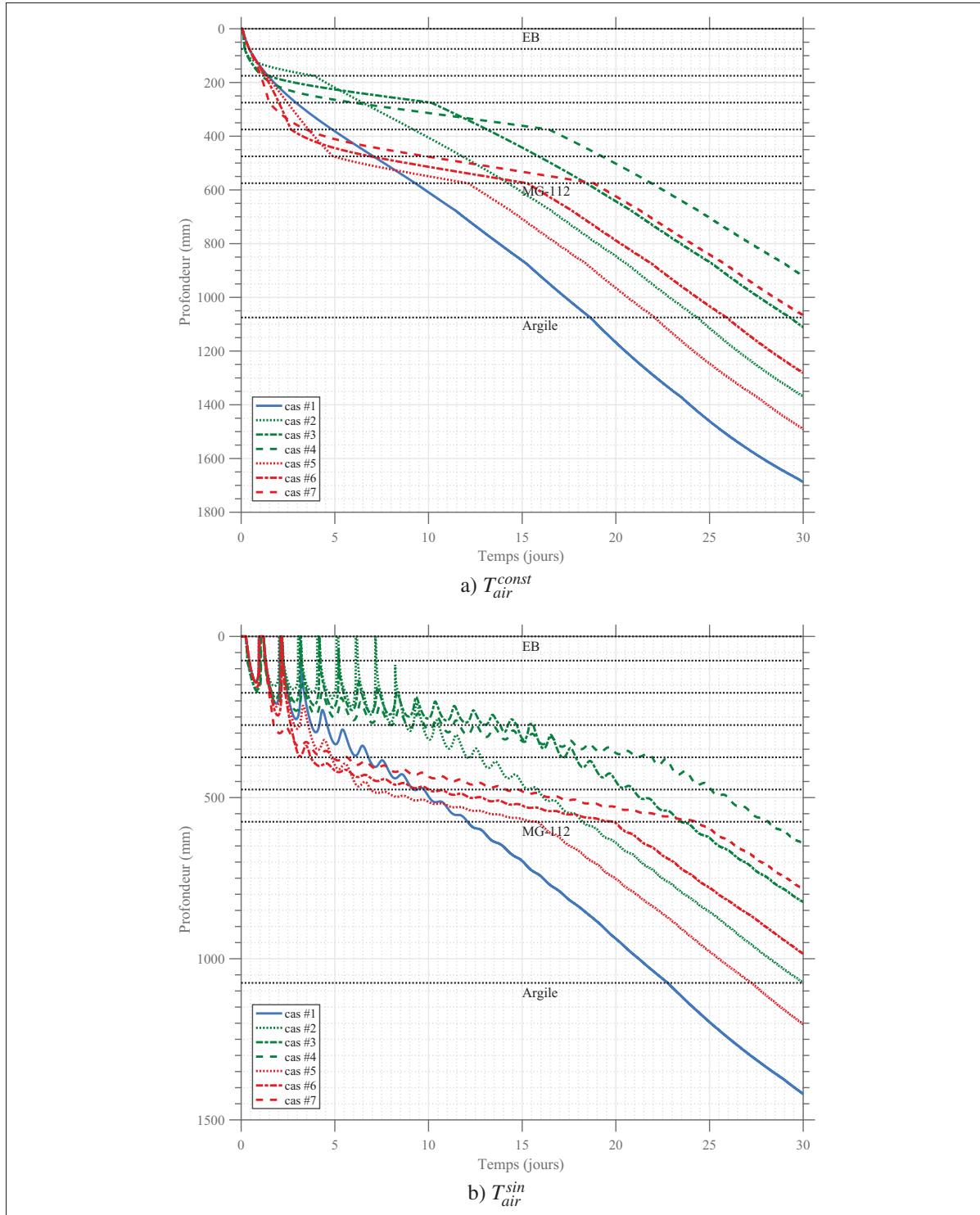


Figure 6.5 Évolution du front de gel dans les cas T_{air}^{const} et T_{air}^{sin} et pour $\theta = 10\%$

Cela dit, les Figures 6.4 et 6.5, montrent qu'effectivement les profondeurs atteintes sont plus grandes dans le cas $\theta = 10\%$ mais que cela n'est réellement le cas qu'à partir du 15^{me} jours. En effet, si seuls les 15 premiers jours sont pris en compte et à l'exception du cas #1, la conclusion n'est plus la même, car nous constatons que les profondeurs obtenues restent proches relativement à l'épaisseur de la couche avec des valeurs comprises entre 300 et 500 mm pour $\theta = 0\%$ et entre 300 et 600 mm pour $\theta = 10\%$ (voir Tableaux 5.4, 5.5, 5.7 et 5.8). En d'autres termes, l'ajout d'une couche de verre semble limiter l'impact de la teneur en eau sur la profondeur de pénétration de l'isotherme 0°C.

La vitesse de progression du front de gel augmente nettement à partir de la couche de MG-112 et l'influence de la teneur en eau se fait plus marqué. Dans certains cas, la profondeur atteinte pour $\theta = 0\%$ et $\theta = 10\%$ à 30 jours varie du simple au double. À titre d'exemple, dans le cas #2 (T_{air}^{sin}) le front de gel atteint 504 mm lorsque $\theta = 0\%$ et 1075 mm lorsque $\theta = 10\%$.

6.3.2 Impact de l'épaisseur et de la position de la couche de VPC

Gustafson (1981) a classé les différentes structures de chaussée (conventionnelle, avec isolants ou matériaux granulaires) par importance relative de la sensibilité au givre. Cette classification est montrée sur la Figure 6.6.

La première catégorie de structures touche les chaussées sans isolant thermique. Le risque de formation de givre est faible lorsque la structure possède de bonnes épaisseurs de matériaux granulaires de fondation humide (MG20 et sable) sous le pavage et les matériaux stabilisés au bitume (sec). Toutefois, le risque augmente considérablement lorsque la fondation est constituée de matériaux à granulométrie ouverte (drainant, donc sec). Les deuxième et troisième catégories de structures concernent les profondeurs de l'isolant thermique. Plus l'isolant est situé en profondeur, moins le risque de formation de givre est élevé. La quatrième catégorie concerne l'épaisseur de la couche d'isolant thermique, et il a été constaté que pour des structures semblables, l'épaisseur de l'isolant n'a pas ou très peu d'influence sur le risque de formation de givre. Dans la cinquième catégorie de structure, il est montré que le risque de

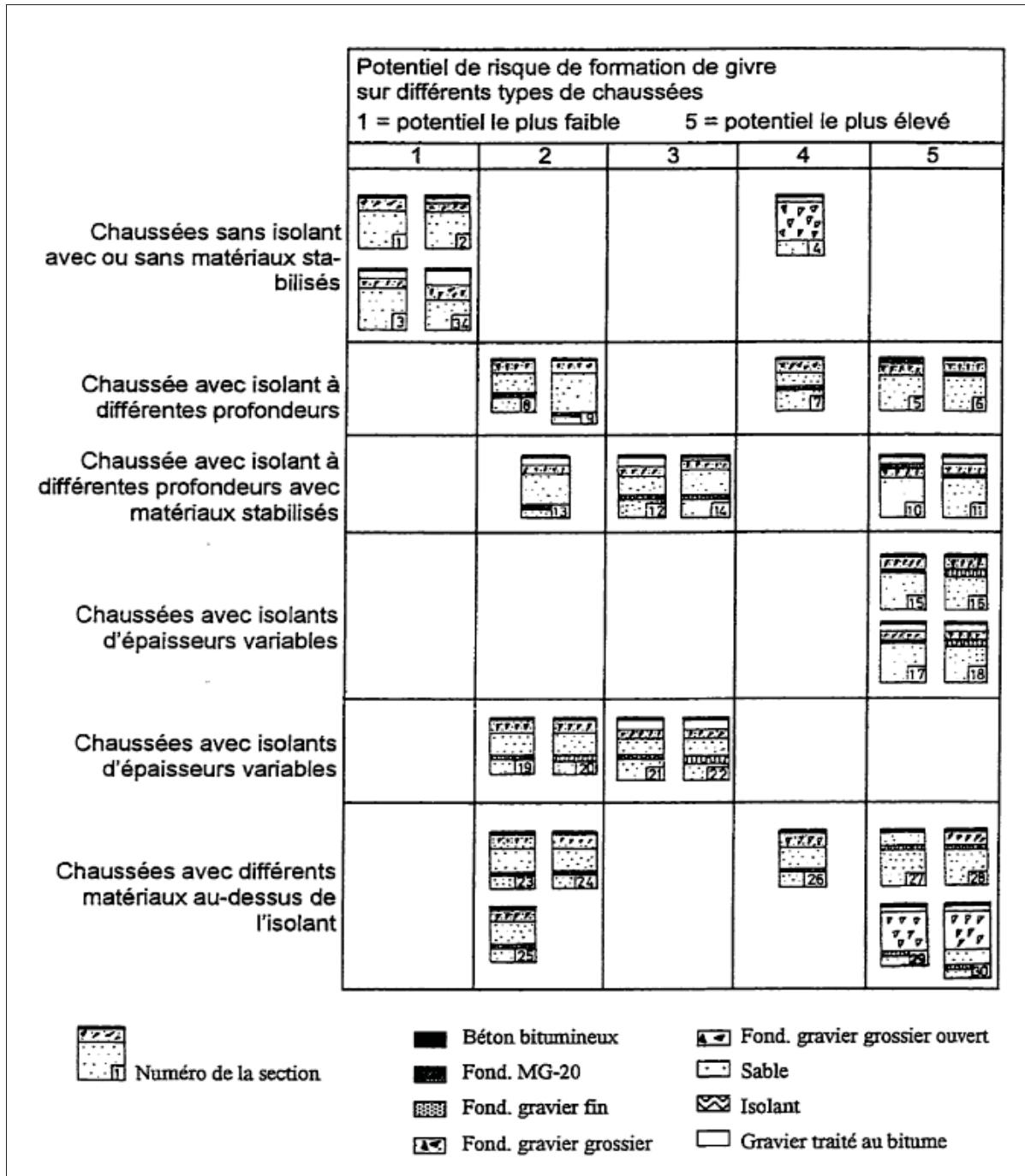


Figure 6.6 Potentiel de risque de formation de givre sur les différents types de chaussées
Tirée de Gustafson (1981)

formation de givre d'une structure avec l'isolant placé près de la surface est équivalent à celui de structures avec l'isolant placé plus en profondeur, mais comportant des matériaux secs (gra-

nulométrie ouverte, stabilisée au bitume) dans la fondation. Dans ce cas, le risque de formation de givre est égal à 5.

Les cas #2/#5, #3/#6 et #4/#7 ont respectivement une couche de VPC d'une épaisseur de 100 mm, 200 mm et 300 mm. Quelques soient θ ou T_{air} et indépendamment de la position de la couche, l'impact de l'épaisseur est similaire dans tous les cas, en ce sens que la propagation du front de gel est d'autant ralentie par la couche de VPC que celle-ci est épaisse (6.4 et 6.5). Les résultats obtenus lors des simulations montrent que le régime thermique dans le corps de la chaussée est différent suivant la position de la couche de VPC avec notamment un refroidissement plus rapide des couches proches de la surface dans les cas #5, #6 et #7. Ainsi, à épaisseur égale, la profondeur de pénétration du front de gel est plus grande dans le cas où la couche de VPC est placée en dessous de la celle de MG20.

Enfin, l'étude du facteur d'amortissement a révélé que dans les cas #5, #6 et #7, les valeurs en surface sont plus élevées que dans les autres cas. De plus, F_d^{30} diminue plus rapidement en présence d'une couche de conductivité thermique plus faible, mais l'impact de l'épaisseur et de la position a très peu d'influence sur la profondeur à partir de laquelle les fluctuations de la température de l'air n'ont plus d'effet ($F_d^{30}(z) = 0$).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La revue de l'état de la pratique et des connaissances dans le domaine de l'incorporation de VPC dans la chaussée a fait ressortir un manque d'information concernant les propriétés thermiques du VPC et son impact sur les performances thermiques de la chaussée. Or, si l'incorporation de granulats de VPC dans la structure de chaussée est envisageable, une bonne connaissance des propriétés thermiques est essentielle lors du dimensionnement d'une chaussée, notamment lorsqu'il s'agit de prendre en compte les sollicitations thermiques. Le présent projet de recherche a donc eu pour but de mesurer les propriétés thermiques du VPC afin de pouvoir les comparer à ceux de granulats de pierre calcaire, lesquels sont couramment utilisés comme matériaux des couches de fondation. De plus, les résultats de ces mesures ont permis de modéliser l'évolution de la température dans la structure d'une chaussée incorporant une couche de VPC, et ce, en conditions hivernales.

Dans le cadre de la première phase du travail, c'est-à-dire celle qui concerne la mesure en laboratoire des propriétés thermiques du VPC et de la pierre calcaire, l'attention a été portée d'une part sur l'influence de la taille des granulats sur les propriétés thermiques (conductivité thermique λ et diffusivité thermique α) des deux matériaux granulaires, et d'autre part, sur l'influence de la teneur en VPC dans un mélange de VPC et de pierre calcaire. Ces deux paramètres (taille des granulats et teneur en verre) ont également été couplés avec l'étude de l'influence de la teneur en eau dans le milieu. Pour ce qui est de la taille des granulats, la courbe granulométrique d'un MG20 (matériaux de fondation dont la taille des plus gros granulats est de 20mm) a servi de référence. La fraction granulaire qui nous a intéressés est comprise entre 80 μ m et 5mm et a été subdivisée en trois classes granulométriques : (classe 1) 0,08-1,25 : retenu 0,08mm et passant 1,25mm, (classe 2) 0,630-2,5 : retenu 0,630mm et passant 2,5mm et (classe 3) 1,25-5 : retenu 1,25mm et passant 5mm. En ce qui concerne l'impact de la teneur en VPC, trois combinés différents ont été définis (en proportion massiques) : 75V/25P : 75% de VPC et 25% de pierre calcaire, 50V/50P : 50% de VPC et 50% de pierre calcaire et 25V/75P :

25% de VPC et 75% de pierre calcaire. Enfin différentes teneurs en eau massiques furent visées et sont comprises entre 0% et 16%.

Deux nouveaux essais ont été mis en place au LCMB pour la mesure des propriétés thermiques. Le premier est un essai de conductivité thermique (λ) réalisé à l'aide d'une sonde thermique et le second est un essai de diffusivité thermique (α) réalisé en se basant sur la solution numérique de l'équation de la chaleur dans le cas d'un flux unidimensionnel. Les résultats ont montré d'une part que la teneur en eau a une influence importante sur les valeurs de λ et α avec notamment une augmentation de ces valeurs lorsque la teneur en eau augmente. De plus l'étude des résultats des essais effectués sur les différentes classes granulométriques a mis en évidence l'influence importante de la porosité sur la conductivité thermique : plus la porosité est faible, autrement dit plus le nombre de contacts entre les granulats est important, et plus la conductivité thermique est élevée. D'autre part, la conductivité thermique semble diminuer à mesure que la teneur en verre augmente dans les différents combinés de VPC et de pierre calcaire. Enfin, notons que les résultats des essais de diffusivité thermique montrent que la taille des granulats a très peu d'influence sur l'évolution d' α en fonction de la teneur en eau et que l'augmentation de la teneur en verre dans les combinés réduit la sensibilité à l'eau et tend à diminuer la diffusivité thermique.

Les résultats de la phase expérimentale ont par la suite servi à modéliser une chaussée dans des conditions hivernales. Les paramètres qui nous ont intéressés sont l'épaisseur de la couche de VPC (100, 200 et 300mm) ainsi que sa position relative dans la chaussée (interface enrobé bitumineux et MG-20 et interface MG20 et couche de sous-fondation (MG112)). De plus, deux différents cas de température de l'air (température constante et variable au cours du temps) et deux conditions de teneur en eau (à l'état sec et à l'état partiellement saturé ($\theta = 10\%$)) ont été modélisés. Les résultats ont été comparés sur la base de l'évolution du front de gel dans la chaussée en fonction du temps. Dans l'ensemble, les résultats montrent que l'incorporation

d'une couche de conductivité thermique relativement faible tend à diminuer la profondeur atteinte par le front de gel avec une profondeur d'autant plus faible que l'épaisseur de la couche de VPC est grande. De plus, la position de la couche de VPC a un impact sur le taux de refroidissement des couches situées au-dessus. En d'autres termes, les résultats des simulations numériques montrent que la progression du front de gel se fait plus rapidement dans les couches situées au-dessus de la couche de VPC (comparativement au cas de référence). Cette observation a une importance capitale, car nous avons vu qu'un refroidissement rapide des couches de surface contribue à la formation de givre. Enfin, notons que l'état des pratiques de conception en ce qui concerne le risque de formation de givre sur les chaussées avec isolants thermiques en est toujours au stade empirique. En effet, les investigations sur le givre des chaussées avec isolant thermique en service sont très limitées et souvent insuffisantes pour arriver à faire le point sur les méthodes de constructions à adopter en vue d'une meilleure protection contre la formation de givre tout en maintenant les objectifs de protection contre le gel des infrastructures. Par contre, avec l'expérience, les différents intervenants du domaine routier ont pu déterminer des profondeurs typiques d'isolants dans le corps des chaussées pour réduire au minimum les risques reliés aux givre. Ces profondeurs minimales se situent entre 350 et 500 mm à partir de la surface et au Québec, le Ministère des Transports recommande une épaisseur minimale de 450 mm de gravier au-dessus de l'isolant. Ainsi, d'un point de vue des exigences dans la pratique, les cas où la couche de verre est placée à l'interface entre l'enrobé bitumineux et la couche de fondation ne seraient pas tolérés. Pour un compromis entre les exigences et une bonne protection contre la pénétration du gel, le cas #6, pour lequel la couche de VPC est placé à l'interface entre la couche de fondation et de sous-fondation et d'une épaisseur de 200mm, pourrait être un bon candidat.

En définitive, ce projet de recherche a servi d'étude exploratoire sur les propriétés thermiques de granulats de verre postconsommation et l'impact thermique (modification du régime thermique de la chaussée) qu'aurait l'incorporation de ce matériau dans le corps de chaussée. L'idée

de départ de ce projet est d'exploiter les propriétés isolantes du verre pour limiter la profondeur de pénétration du gel dans la chaussée et de limiter les désordres causés par les dégels ponctuels qui ont lieu durant l'hiver au Québec. Une couche contenant du verre (par conséquent moins conductrice) pourrait-elle agir comme une "zone tampon" entre les fluctuations de température à la surface et les couches susceptibles au gel ? Les conclusions qui ressortent du travail présenté dans ce mémoire sont encourageantes tant le verre à un comportement thermique intéressant lorsque la teneur en eau augmente, en l'occurrence, la conductivité et diffusivité thermique du VPC augmentent peu lorsque la teneur en eau augmente, comparativement à la pierre calcaire. De plus, l'ajout d'une couche de diffusivité thermique faible permet de réduire la profondeur d'amortissement des variations de température à la surface. En d'autres termes, l'idée d'une couche tampon est cohérente avec ce qui a été obtenu. Cela étant dit, il faut également questionner la faisabilité d'incorporer une couche de VPC dans la chaussée du point de vue des performances hydrauliques et structurales. D'autre part, une couche de 200 mm de VPC représente une quantité non négligeable de matériaux et son transport pourrait s'avérer dispendieux.

Ce travail de recherche exploratoire pourrait être poursuivi avec tout d'abord, un approfondissement des essais concernant les combinés de granulats de verre et de pierre calcaire. Rapelons que seule la fraction $80 \mu\text{m}-5 \text{ mm}$ a été considérée. Il serait donc pertinent d'effectuer des mesures sur la granulométrie complète d'un MG20 de référence avec seulement de la pierre calcaire. Ensuite il serait intéressant de substituer une partie des granulats de la pierre située dans la fraction $80 \mu\text{m}-5 \text{ mm}$ par du VPC et vérifier les différences de propriétés thermiques. De plus, l'essai de conductivité thermique introduit au LCMB a été un succès dû en grande partie à l'existence d'un standard (ASTM D5334) qui a beaucoup aidé pour l'élaboration de la procédure expérimentale. En revanche, l'essai de diffusivité thermique a été plus compliqué à mettre en place. La théorie est certes irréfutable, mais les hypothèses sont contraignantes (exemple : hypothèse de flux thermique unidirectionnel, écart constant entre les trois thermo-

couples durant le compactage). Les résultats obtenus sont néanmoins satisfaisants, mais il serait préférable d'effectuer une autre série de mesure pour confirmer la répétabilité.

Enfin, pour ce qui est des simulations numériques, il serait intéressant de considérer des variations de température de l'air réelles, c'est-à-dire issues de données météorologiques, de façon à s'approcher d'une situation réelle. D'autre part, seul un échange convectif avec l'air a été modélisé ce qui est loin d'être le seul échange qui a lieu entre le corps de la chaussée et l'environnement extérieur. En effet, le rayonnement solaire apporte beaucoup d'énergie durant la journée et son absence durant la nuit participe à un refroidissement de la chaussée, par perte de chaleur de la chaussée vers l'atmosphère. Le module thermique FLAC ne dispose pas de modèles de rayonnement, mais il existe des codes de calculs permettant de considérer les échanges par radiation (exemple : Cast3M (CEA)). L'approche rayonnement peut également être intéressante pour ce qui est du VPC dans les enrobés bitumineux, car une hypothèse à considérer est que le VPC permettrait d'augmenter l'albédo, c'est-à-dire la capacité à réfléchir un rayonnement, du mélange enrobé bitumineux et VPC. De fait, cela pourrait être intéressant dans l'étude des îlots de chaleur qui ne sont pas rares à Montréal par exemple.

ANNEXE I

EXEMPLE DE PRÉPARATION DES MÉLANGES

Le Tableau-A I-1 indique les masses requises à la préparation d'un mélange de 1000 g de classe 1, 2 et 3. En ce qui concerne les mélanges mixtes (i.e. 75V/25P, 50/50 et 25V/75P), le Tableau-A I-2 donne les masses requises pour la préparation de 1000 g de ces mélanges en fonction des proportions en VPC et en pierre.

Tableau-A I-1 Masses nécessaires à la préparation de 1000 g de mélange pour les classes 1, 2 et 3

Tamis (mm)	GE* retenu (%)	Classe 1 (g)	Classe 2 (g)	Classe 3 (g)
2.5	10	0	0	500
1.25	10	0	500	500
0.630	10	500	500	0
0.315	4	200	0	0
0.160	3	150	0	0
0.08	3	150	0	0
Cumulés (g)	-	1000	1000	1000

*granulométrie à l'étude (extrait du Tableau 2.1)

Tableau-A I-2 Masses nécessaires à la préparation de 1000 g de mélange pour les classes 75V/25P, 50/50 et 25V/75P

Tamis (mm)	75V/25P (g)		25V/75P (g)		50/50 (g)	
	VPC	pierre	VPC	pierre	VPC	pierre
2.5	187.5	62.5	62.5	187.5	125	125
1.25	187.5	62.5	62.5	187.5	125	125
0.630	187.5	62.5	62.5	187.5	125	125
0.315	75	25	25	75	50	50
0.160	56.25	18.75	18.75	56.25	37.5	37.5
0.08	56.25	18.75	18.75	56.25	37.5	37.5
Cumulés (g)	750	250	250	750	500	500

ANNEXE II

PROCÉDURE POUR LA PRÉPARATION DU MÉLANGE EAU/AGAR-AGAR

L'agar-agar se présente sous forme de poudre blanchâtre et se trouve dans la majorité des commerces asiatiques. La préparation de l'eau est identique pour tous les mélanges. De l'eau distillée contenue dans un bécher est d'abord placée sur une plaque chauffante réglée à 300°C. L'eau est remuée régulièrement avec un bâton agitateur jusqu'à ce que la température de l'eau soit de $90^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (mesuré à l'aide d'un thermomètre (*voir* Tableau 3.3)) ; 85°C étant la température de dissolution de l'agar-agar (Low *et al.* (2014)). Dès que cette température est atteinte, la plaque est réglée à 150°C et une masse d'agar-agar équivalente à 1% de la masse d'eau chaude est peu à peu ajoutée dans le bécher, et ce, tout en continuant d'agiter l'eau. Une fois le gélifiant ajouté, le mélange eau-agar continue d'être agité pendant une dizaine de minutes de manière à ce que toute la poudre se dissolve puis la plaque est mise hors tension. L'eau-agar est alors laissée au repos jusqu'à ce qu'il commence à avoir une texture de gelée.

ANNEXE III

THÉORIE DE LA SONDE THERMIQUE

Considérons une source linéique infinie telle que donnée à la Figure-A III-1.

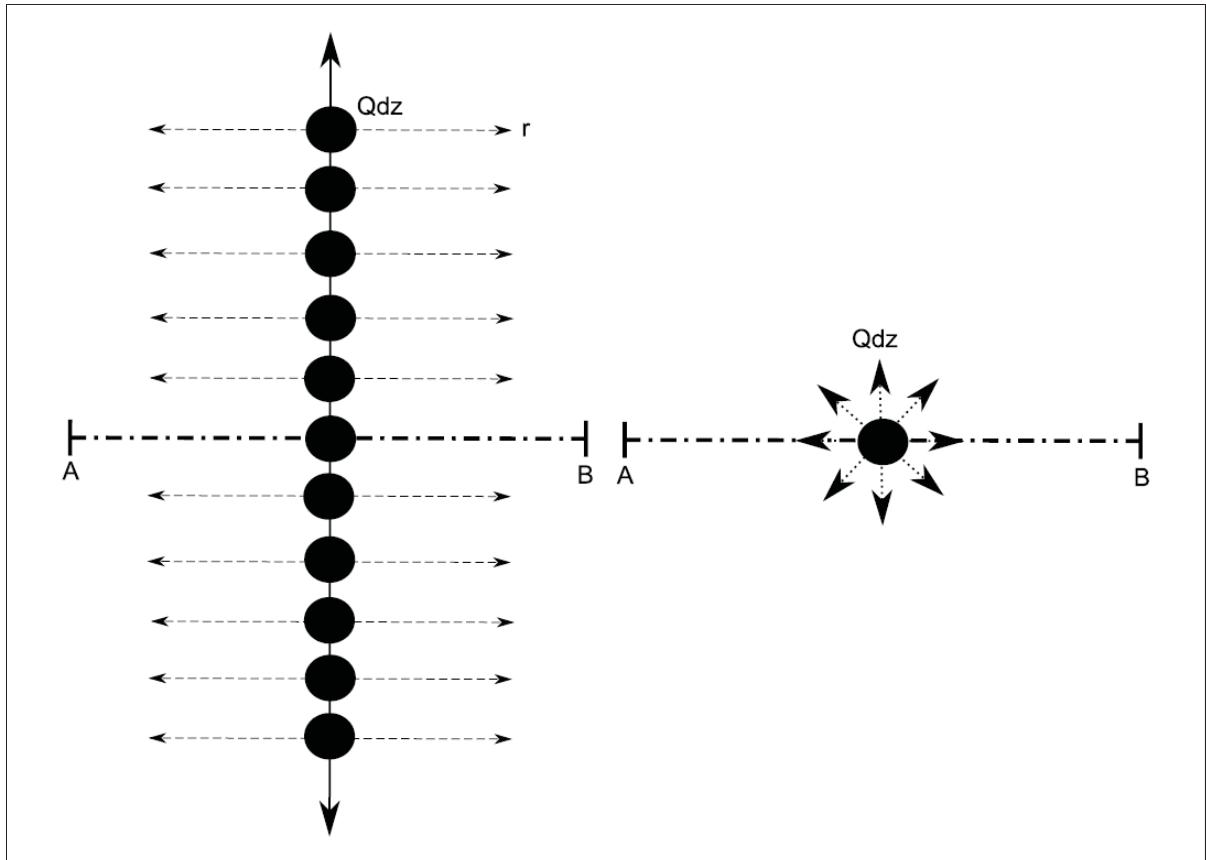


Figure-A III-1 Géométrie du modèle ligne source infinie
Tirée de Giordanengo (2010)

Trois hypothèses sont à la base du modèle analytique. Premièrement, on suppose que la ligne source est la sommation d'une série de points sources le long d'une ligne droite infinie. Deuxièmement, chaque point source possède une quantité de chaleur Qdz ($(q = \int Qdz)$) et, finalement, on suppose que le flux de chaleur est radial à la source de chaleur. Ce système répond à l'équation générale de Fourier donnée par la relation 1.5 à la page 31. Dans le système de coordonnées

cylindriques, cette relation s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (\text{A III-1})$$

r étant la distance en coordonnées cylindriques d'un point de mesure à la source de chaleur et α la diffusivité thermique du milieu dans lequel se trouve la ligne source.

Les conditions initiales et aux frontières sont telles que (De Vries & Peck (1958)) :

$$T = T_0, \quad \text{pour } t = 0 \text{ et } r = \infty;$$

$$q = -\lim_{r \rightarrow 0} 2\pi\lambda r \partial T / \partial r, \quad \text{pour } t \geq 0.$$

Si on assume que la chaleur est générée à partir d'un temps $t = 0$ à un taux constant q , la solution de l'équation A III-1 donnant la variation de température ΔT s'écrit (Carslaw & Jaeger (1986)) :

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (\text{A III-2})$$

où $Ei(-x)$ est la fonction Intégrale Exponentielle telle que :

$$Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{A III-3})$$

La sonde thermique génère une source de chaleur dans le milieu pendant un certain temps τ_h durant laquelle la variation de température dans le milieu est décrite par l'équation A III-2. Suite à cela, la sonde cesse d'être alimentée pour laisser place à une phase de repos. La variation de température pendant cette deuxième phase est quant à elle décrite par l'équation (A III-4) (Carslaw & Jaeger (1986))

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \left[-Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha(t - \tau_h)}\right) \right] \quad (\text{A III-4})$$

Les équations A III-2 et A III-4 ne peuvent pas être résolues explicitement pour λ et α (ASTM International (2014)). En revanche, le développement en série de Taylor de la fonction Intégrale

Exponentielle s'écrit :

$$Ei(x) = \gamma + \ln|x| - x + \frac{1}{4}x^2 + O(x^3) \quad (\text{A III-5})$$

γ étant la constante d'Euler (De Vries & Peck (1958)).

Donc si $4\alpha t/r^2 \gg 1$ et en supposant que λ est constante dans le temps et l'espace, nous obtenons, avec un bon degré d'approximation, la variation de température qui est alors proportionnelle au logarithme du temps (relation A III-6) (ASTM International (2014)) :

$$\Delta T \simeq -\frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) \quad 0 < t \leq \tau_h \quad (\text{A III-6})$$

Pendant la phase de repos ($t > \tau_h$) les conditions sur le flux de chaleur deviennent :

$$\begin{aligned} q &= -\lim_{r \rightarrow 0} 2\pi\lambda r \partial T / \partial r, \quad \text{pour } 0 \leq t \leq \tau_h; \\ q &= 0, \quad \text{pour } t > \tau_h. \end{aligned}$$

La variation de température pendant cette seconde phase est donnée par la relation A III-7 :

$$\Delta T \simeq -\frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t - \tau_h}\right) \quad t \geq \tau_h \quad (\text{A III-7})$$

ANNEXE IV

MONTAGE DE LA SONDE THERMIQUE

La Figure-A IV-1 donne le montage pour la sonde thermique de type TR-1 de chez East30Sensors. Sur cette figure sont représentés les différents branchements avec la station d'acquisition CR1000 et le boîtier d'excitation CE-4.

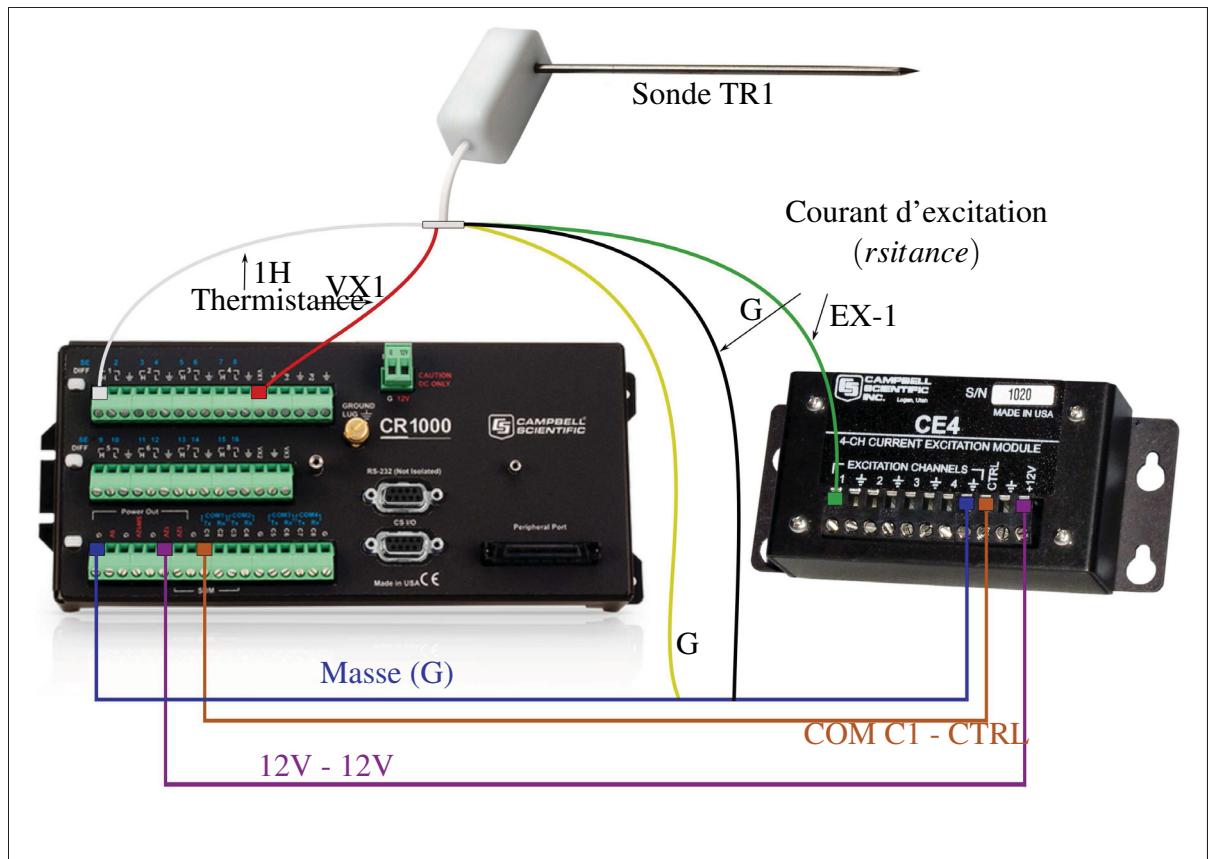


Figure-A IV-1 Montage pour la sonde thermique de type TR-1 de chez East30Sensors

ANNEXE V

EXEMPLE DE CODE FLAC

Les lignes de codes suivantes donnent les instructions FLAC pour la simulation du cas d'étude #2 et pour un échange convectif avec T_{air}^{const} . Le language utilisé est le FISH (voir documentation FLAC)

Création de la géométrie.

```
config thermal
grid 40,123
gen 0.0, -3.0 0.0, -2.0 1.0, -2.0 1.0, -3.0
i=1,41 j=1,41
gen 0.0, -2.0 0.0, -1.3 1.0, -1.3 1.0, -2.0
i=1,41 j=41,69
gen 0.0, -1.3 0.0, -1.2 1.0, -1.2 1.0, -1.3
i=1,41 j=69,73
gen 0.0, -1.2 0.0, -1.1 1.0, -1.1 1.0, -1.2
i=1,41 j=73,77
gen 0.0, -1.1 0.0, -1.0 1.0, -1.0 1.0, -1.1
i=1,41 j=77,81
gen 0.0, -1.0 0.0, -0.9 1.0, -0.9 1.0, -1.0
i=1,41 j=81,85
gen 0.0, -0.9 0.0, -0.8 1.0, -0.8 1.0, -0.9
i=1,41 j=85,89
gen 0.0, -0.8 0.0, -0.7 1.0, -0.7 1.0, -0.8
i=1,41 j=89,93
gen 0.0, -0.7 0.0, -0.6 1.0, -0.6 1.0, -0.7
i=1,41 j=93,97
gen 0.0, -0.6 0.0, -0.5 1.0, -0.5 1.0, -0.6
```

i=1,41 j=97,101
gen 0.0,-0.5 0.0,-0.4 1.0,-0.4 1.0,-0.5
i=1,41 j=101,105
gen 0.0,-0.4 0.0,-0.3 1.0,-0.3 1.0,-0.4
i=1,41 j=105,109
gen 0.0,-0.3 0.0,-0.2 1.0,-0.2 1.0,-0.3
i=1,41 j=109,113
gen 0.0,-0.2 0.0,-0.1 1.0,-0.1 1.0,-0.2
i=1,41 j=113,117
gen 0.0,-0.1 0.0,0.0 1.0,0.0 1.0,-0.1
i=1,41 j=117,121
gen 0.0,0.0 0.0,0.075 1.0,0.075 1.0,0.0
i=1,41 j=121,124
model elastic i=1,40 j=1,40
model elastic i=1,40 j=41,68
model elastic i=1,40 j=69,72
model elastic i=1,40 j=73,76
model elastic i=1,40 j=77,80
model elastic i=1,40 j=81,84
model elastic i=1,40 j=85,88
model elastic i=1,40 j=89,92
model elastic i=1,40 j=93,96
model elastic i=1,40 j=97,100
model elastic i=1,40 j=101,104
model elastic i=1,40 j=105,108
model elastic i=1,40 j=109,112
model elastic i=1,40 j=113,116
model elastic i=1,40 j=117,120
model elastic i=1,40 j=121,123

Définir les frontières de la géométrie.

```
mark i=1 j=1,41
mark i=1,41 j=41
mark i=41 j=1,41
mark i=1,41 j=1
mark i=1 j=41,69
mark i=1,41 j=69
mark i=41 j=41,69
mark i=1 j=69,73
mark i=1,41 j=73
mark i=41 j=69,73
mark i=1 j=73,77
mark i=1,41 j=77
mark i=41 j=73,77
mark i=1 j=77,81
mark i=1,41 j=81
mark i=41 j=77,81
mark i=1 j=81,85
mark i=1,41 j=85
mark i=41 j=81,85
mark i=1 j=85,89
mark i=1,41 j=89
mark i=41 j=85,89
mark i=1 j=89,93
mark i=1,41 j=93
mark i=41 j=89,93
mark i=1 j=93,97
mark i=1,41 j=97
mark i=41 j=93,97
```

```

mark i=1 j=97,101
mark i=1,41 j=101
mark i=41 j=97,101
mark i=1 j=101,105
mark i=1,41 j=105
mark i=41 j=101,105
mark i=1 j=105,109
mark i=1,41 j=109
mark i=41 j=105,109
mark i=1 j=109,113
mark i=1,41 j=113
mark i=41 j=109,113
mark i=1 j=113,117
mark i=1,41 j=117
mark i=41 j=113,117
mark i=1 j=117,121
mark i=1,41 j=121
mark i=41 j=117,121
mark i=1 j=121,124
mark i=1,41 j=124
mark i=41 j=121,124

```

Retirer le module mécanique pour cette modélisation.

```
set mech off
```

Définir les propriétés mécaniques...

```

group 'User:revetement' region 37 122
group 'User:verre' region 34 119
group 'User:mg20' region 33 115

```

```
group 'User:mg20' region 32 110
group 'User:mg20' region 31 107
group 'User:mg20' region 31 103
group 'User:sable' region 36 98
group 'User:sable' region 34 94
group 'User:sable' region 34 90
group 'User:sable' region 32 87
group 'User:sable' region 31 83
group 'User:argile' region 33 79
group 'User:argile' region 31 75
group 'User:argile' region 31 71
group 'User:argile' region 29 60
group 'User:argile' region 30 26
model elastic notnull group 'User:revetement'
prop density=2230.0 bulk=0 shear=0 notnull group
'User:revetement'
model elastic notnull group 'User:mg20'
prop density=2200.0 bulk=0 shear=0 notnull group
'User:mg20'
model elastic notnull group 'User:sable'
prop density=1500.0 bulk=0 shear=0 notnull group
'User:sable'
model elastic notnull group 'User:argile'
prop density=1450.0 bulk=0 shear=0 notnull group
'User:argile'
model elastic notnull group 'User:verre'
prop density=1520.0 bulk=0 shear=0 notnull group
'User:verre'}
```

...et thermique du modèle.

```
model th_isotropic region 23 122
prop conductivity=1.38 spec_heat=921.0 region 23 122
model th_isotropic region 17 119
prop conductivity=0.132 spec_heat=491 region 17 119
model th_isotropic region 18 115
prop conductivity=0.258 spec_heat=636 region 18 115
model th_isotropic region 23 111
prop conductivity=0.258 spec_heat=636 region 23 111
model th_isotropic region 22 107
prop conductivity=0.258 spec_heat=636 region 22 107
model th_isotropic region 21 102
prop conductivity=0.258 spec_heat=636 region 21 102
model th_isotropic region 19 98
prop conductivity=0.5 spec_heat=800.0 region 19 98
model th_isotropic region 20 95
prop conductivity=0.5 spec_heat=800.0 region 20 95
model th_isotropic region 19 91
prop conductivity=0.5 spec_heat=800.0 region 19 91
model th_isotropic region 18 86
prop conductivity=0.5 spec_heat=800.0 region 18 86
model th_isotropic region 18 84
prop conductivity=0.5 spec_heat=800.0 region 18 84
model th_isotropic region 17 79
prop conductivity=1.28 spec_heat=880.0 region 17 79
model th_isotropic region 17 75
prop conductivity=1.28 spec_heat=880.0 region 17 75
model th_isotropic region 18 70
prop conductivity=1.28 spec_heat=880.0 region 18 70
```

```

model th_isotropic region 19 65
prop conductivity=1.28 spec_heat=880.0 region 19 65
model th_isotropic region 21 33
prop conductivity=1.28 spec_heat=880.0 region 21 33

```

Définir les nœuds du maillage dont on souhaite connaître la température au cours du temps (spécifiques au maillage donc à faire manuellement, il s'agit là d'un exemple).

```

history 1 temperature i=21, j=124
history 20 temperature i=21, j=123
history 21 temperature i=21, j=122
history 2 temperature i=21, j=121
history 22 temperature i=21, j=120
history 23 temperature i=21, j=119
history 24 temperature i=21, j=118
history 3 temperature i=21, j=117
history 25 temperature i=21, j=116
history 26 temperature i=21, j=115
history 27 temperature i=21, j=114
history 4 temperature i=21, j=113
history 28 temperature i=21, j=112
history 29 temperature i=21, j=111
history 30 temperature i=21, j=110
history 5 temperature i=21, j=109
history 31 temperature i=21, j=108
history 32 temperature i=21, j=107
history 33 temperature i=21, j=106
history 6 temperature i=21, j=105
history 34 temperature i=21, j=104
history 35 temperature i=21, j=103

```

```

history 36 temperature i=21, j=102
history 7 temperature i=21, j=101
history 8 temperature i=21, j=97
history 10 temperature i=21, j=89
history 12 temperature i=21, j=81
history 13 temperature i=21, j=69
history 14 temperature i=21, j=57
history 15 temperature i=21, j=45
history 16 temperature i=21, j=33
history 17 temperature i=21, j=21
history 18 temperature i=21, j=9
history 19 temperature i=21, j=2
history 99 thtime

```

Définir les conditions initiales, aux limites et de température de l'air.

```

initial temperature 10.0
fix   temperature 4.0 j 1
;fonction pour la declaration des variables fixes
def set_tt
  tdt=60 ;pas de temps (en secondes)
  freq=30 ;nombre de jours de la simulation
  command
    set thdt tdt ;fixer le pas de temps a tdt
  end_command
  ratio=3600.0/tdt
end
;fonction pour la resolution du probleme
def solve_convection
  set_tt

```

```
loop stp (1.0 , freq*24.0* ratio )
    temp_var= 12.5*cos((2*pi*stp/( ratio *24.0)))-7.5
    command ; resolution
        apply convection temp_var 16.53 from 1,124 to 41,124
        step 1
    end_command
    end_loop
end
solve_convection
```

Récupérer en sortie l'évolution de la température en fonction du temps dans un fichier de sortie (cas2_w0_v2.his)

```
hist write 1 20 21 2 22 23 24 3 25 26
27 4 28 29 30 5 31 32 33 6 34 35 36 7
8 10 12 13 14 15 16 17 18 19 vs 99
set hisfile=cas2_w0_v2.his
```


ANNEXE VI

RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les Figures données dans cette Annexe représentent les profils complets ($z=0$ à 3000 mm) des résultats de simulation numériques pour les deux cas de température de l'air :

Tableau-A VI-1 Liste des Figures de l'Annexe VI

	$\theta = 0\%$	$\theta = 10\%$
T_{air}^{const}	Figures A VI-1 à A VI-4	Figures A VI-5 à A VI-8
T_{air}^{sin}	Figures A VI-9 à A VI-12	Figures A VI-13 à A VI-16

1. Cas d'étude #1 à #7 pour T_{air}^{const} et $\theta = 0\%$

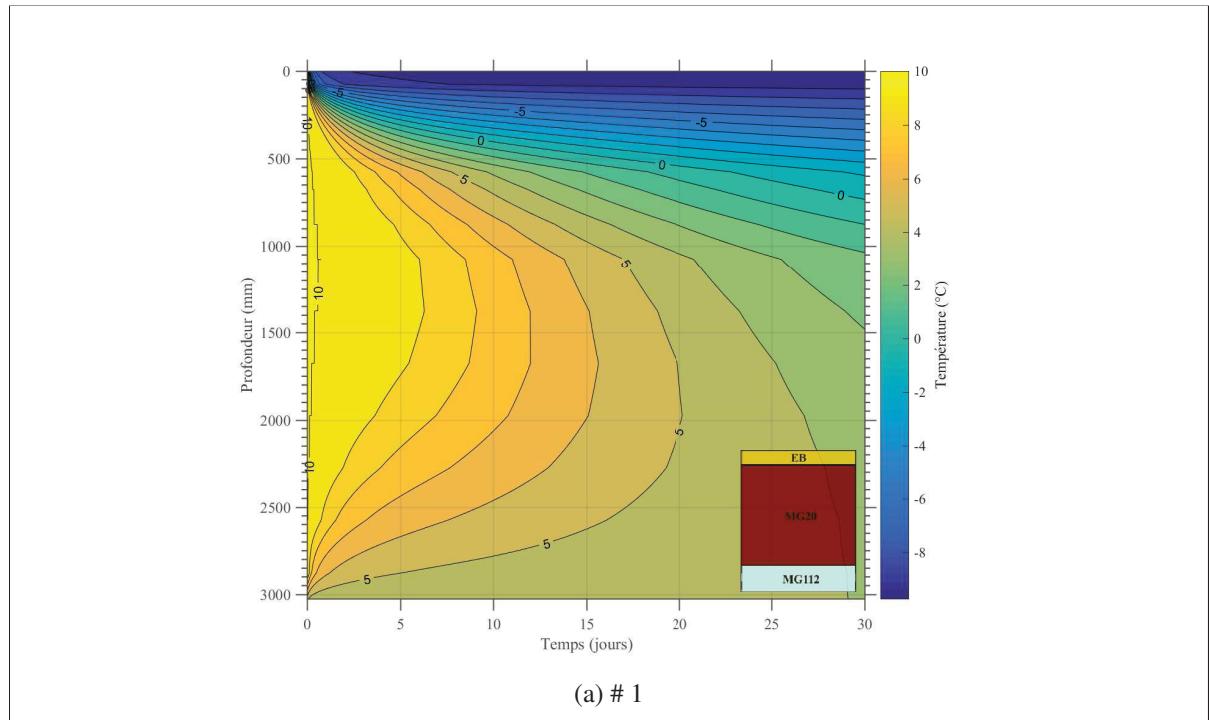


Figure-A VI-1 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas d'étude #1 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{const})

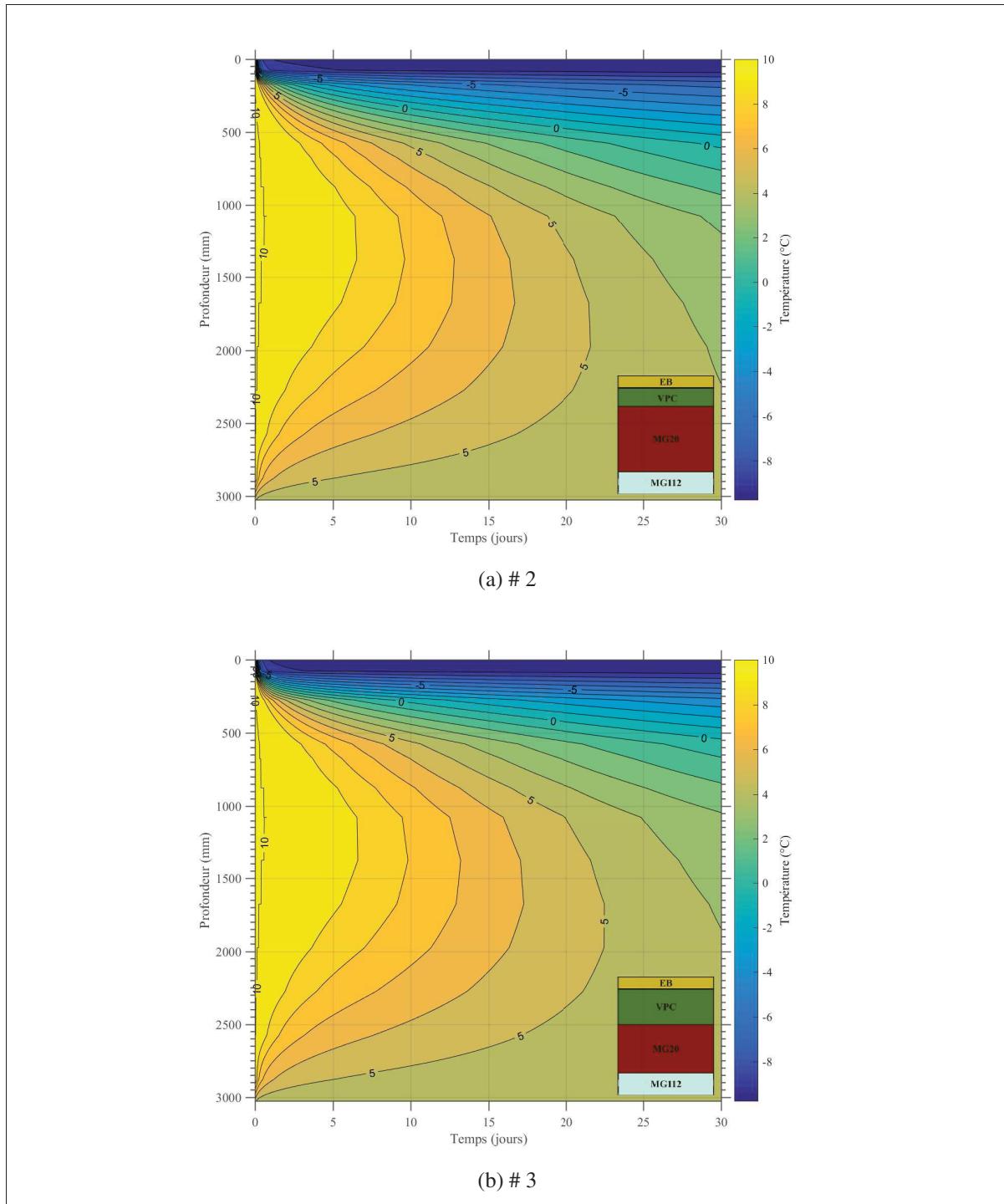


Figure-A VI-2 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #2 et #3 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{const})

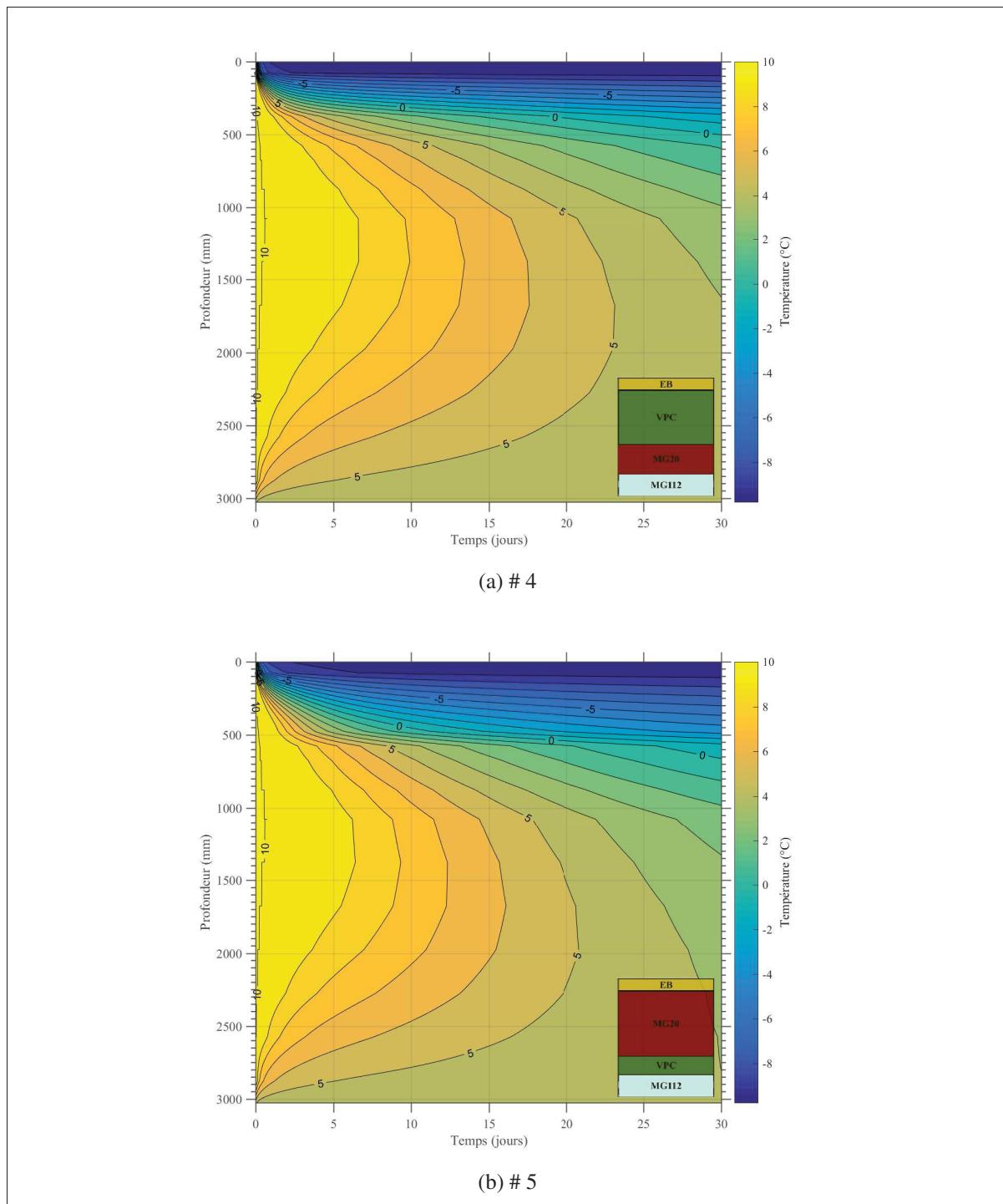


Figure-A VI-3 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #4 et #5 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{const})

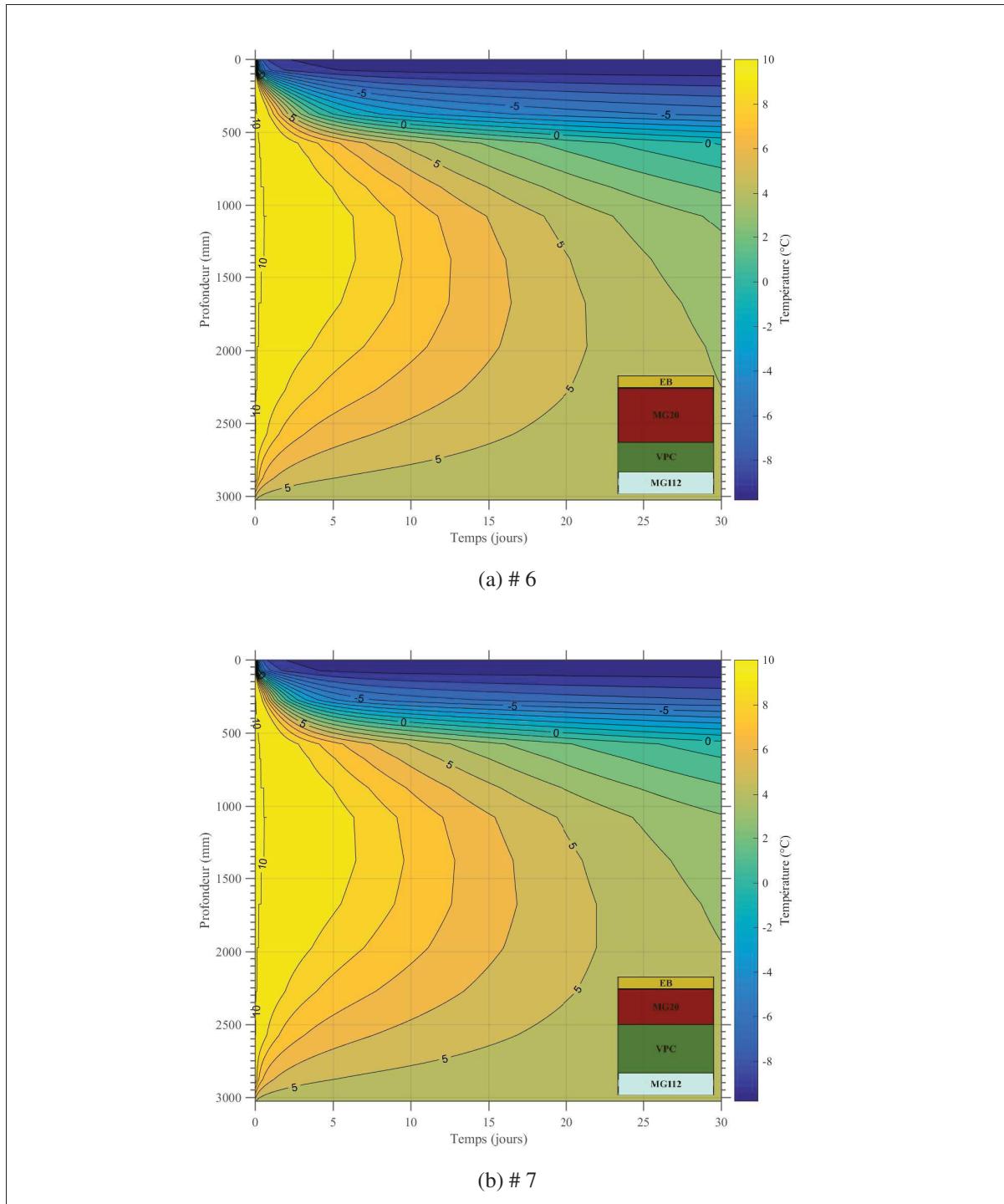


Figure-A VI-4 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #6 et #7 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{const})

2. Cas d'étude #1 à #7 pour T_{air}^{const} et $\theta = 10\%$

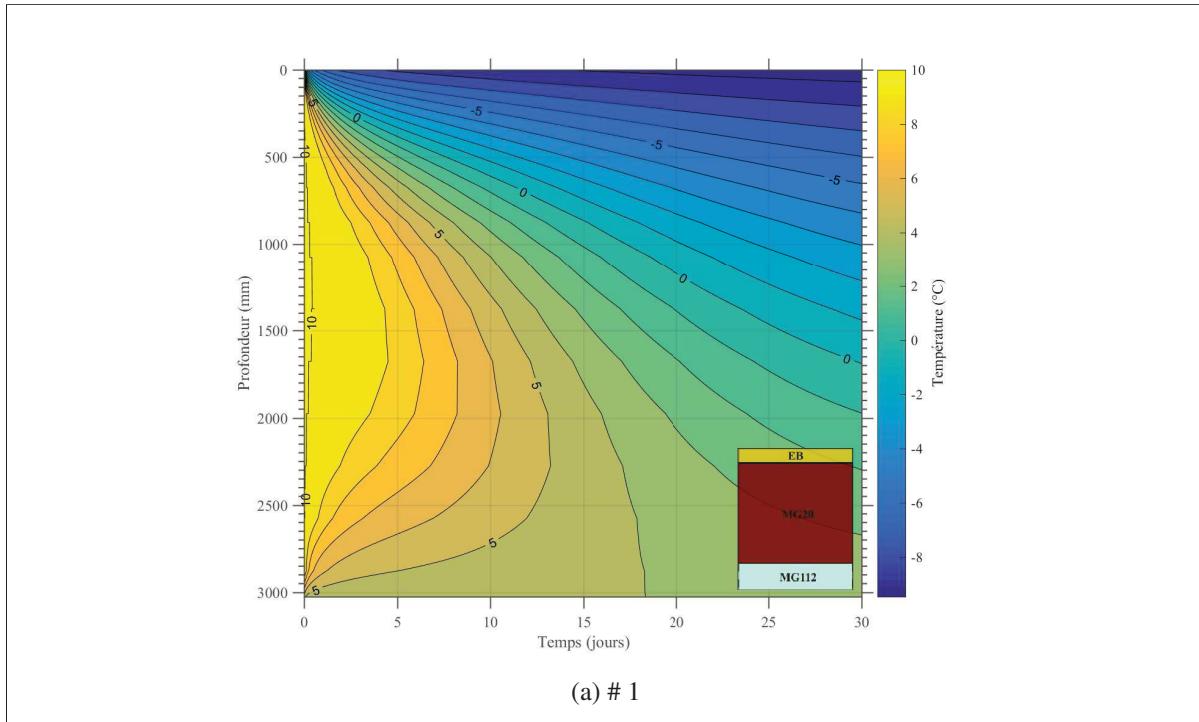


Figure-A VI-5 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas d'étude #1 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{const})

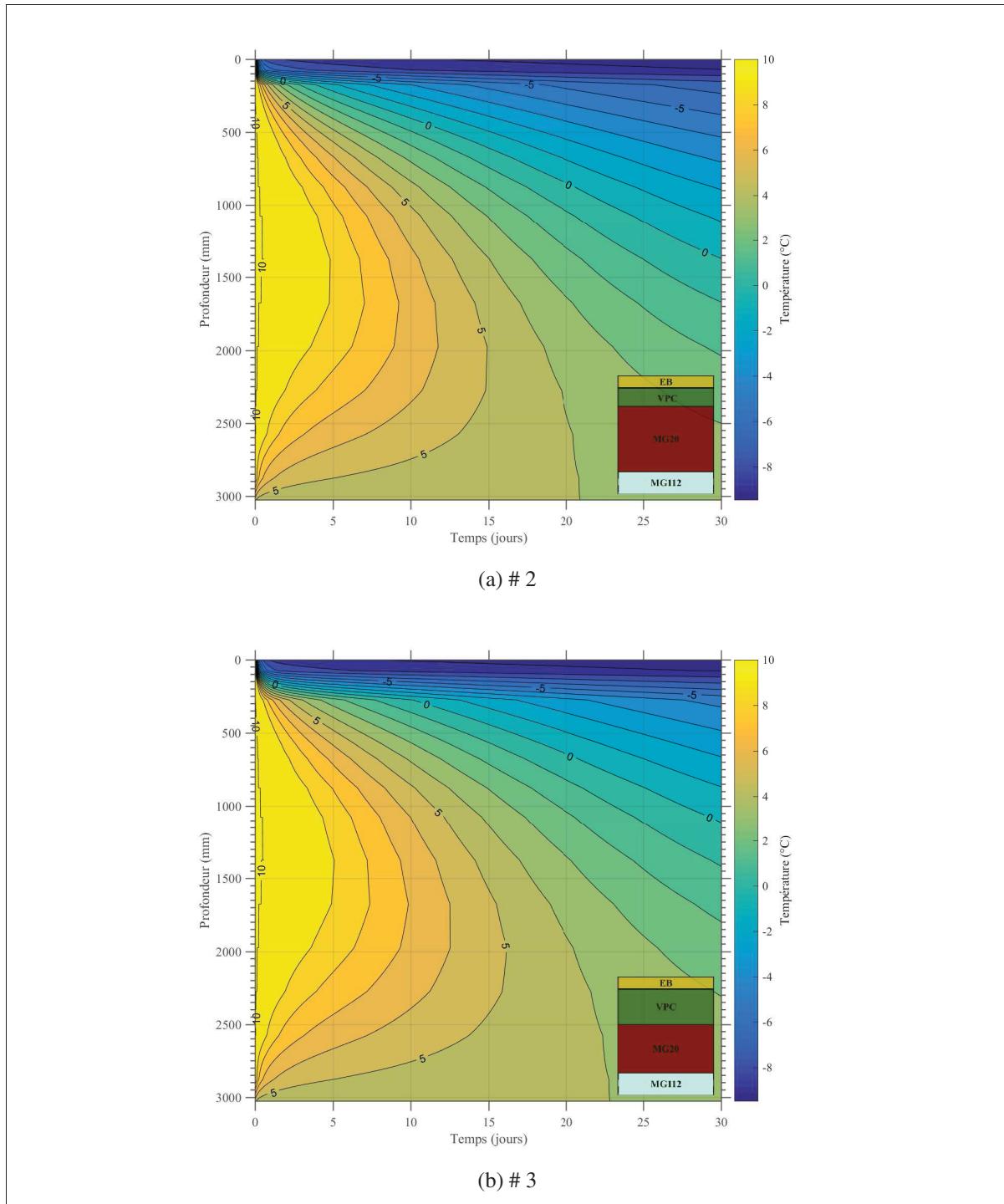


Figure-A VI-6 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #2 et #3 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{const})

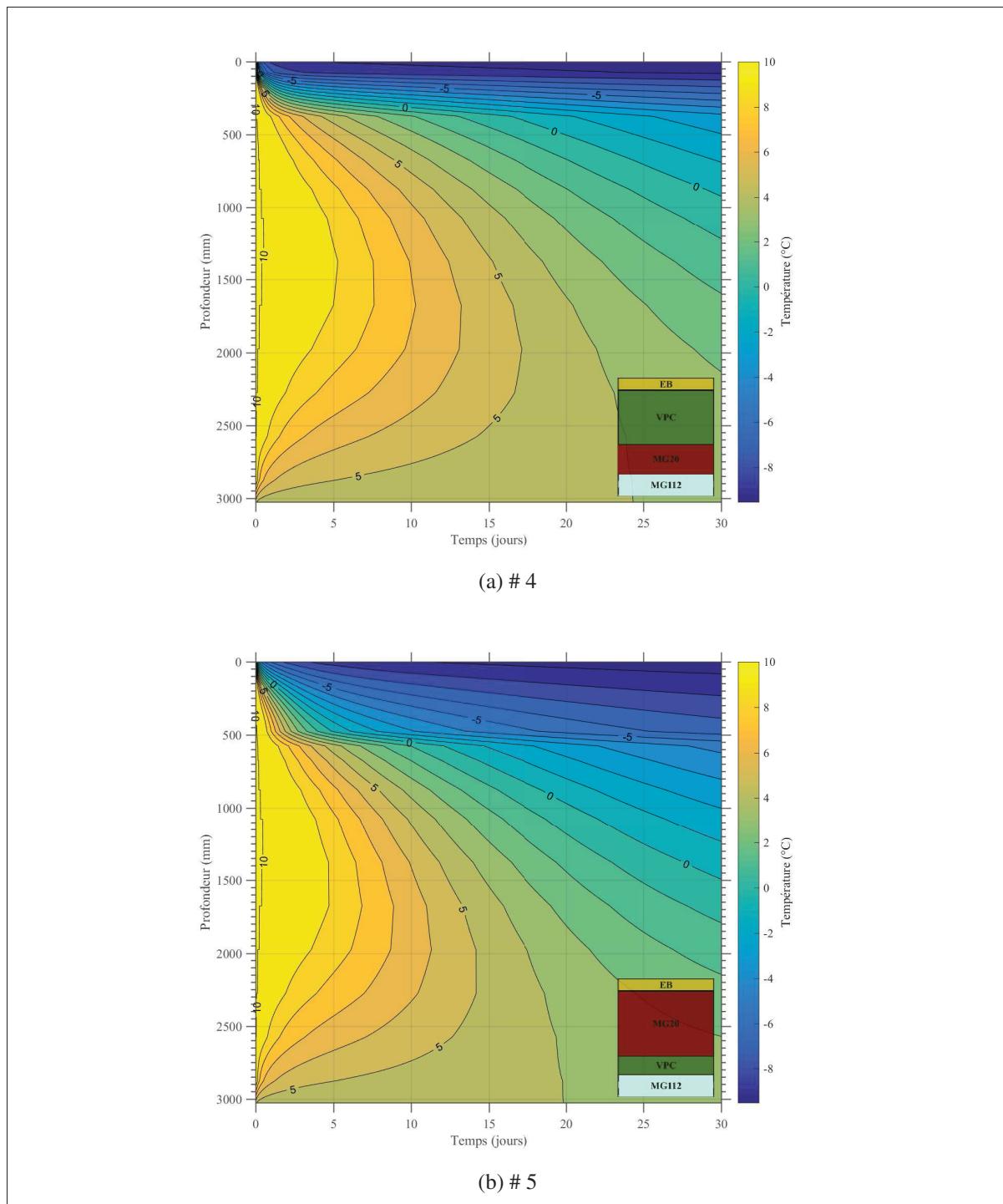


Figure-A VI-7 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #4 et #5 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{const})

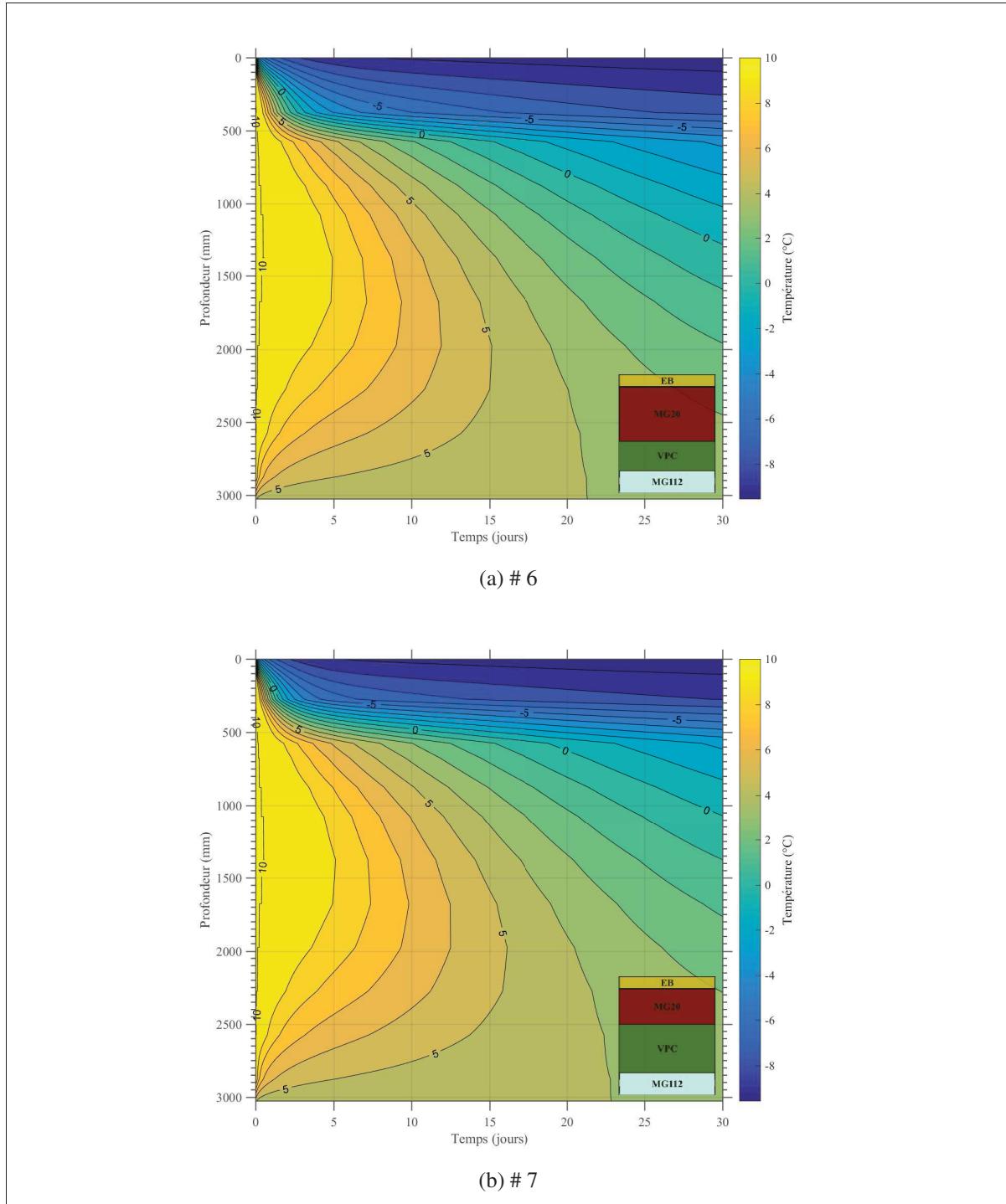


Figure-A VI-8 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #6 et #7 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{const})

3. Cas d'étude #1 à #7 pour T_{air}^{sin} et $\theta = 0\%$

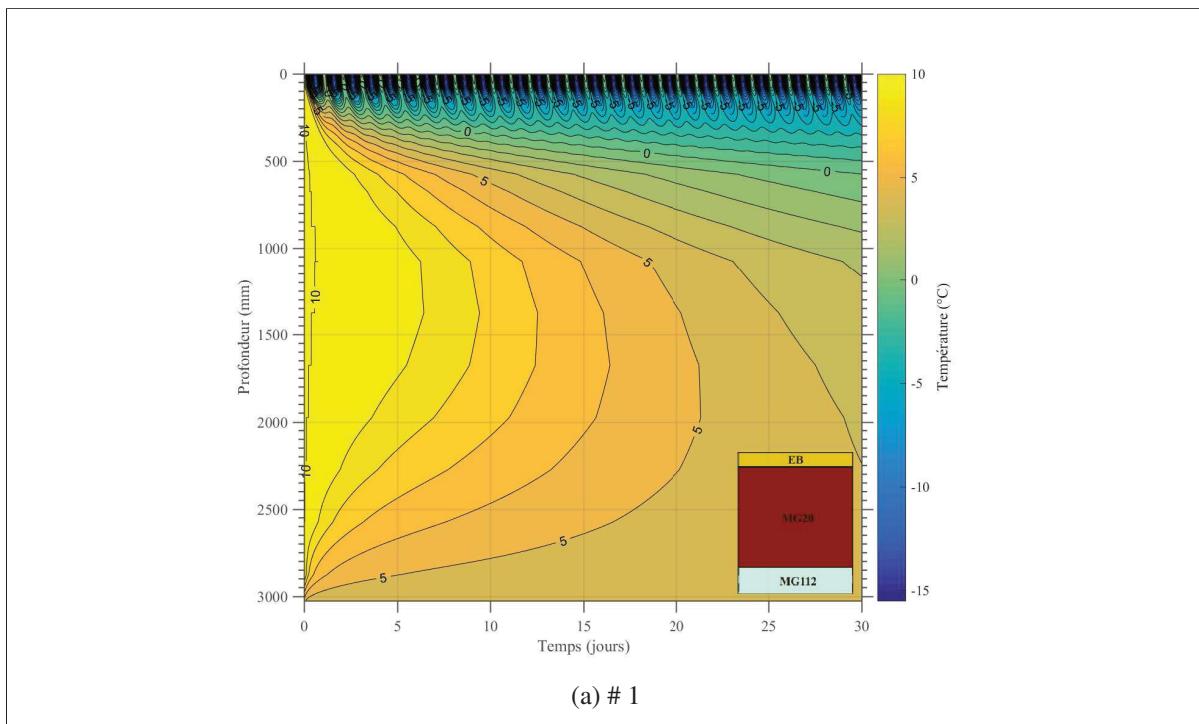


Figure-A VI-9 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas d'étude #1 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{sin})

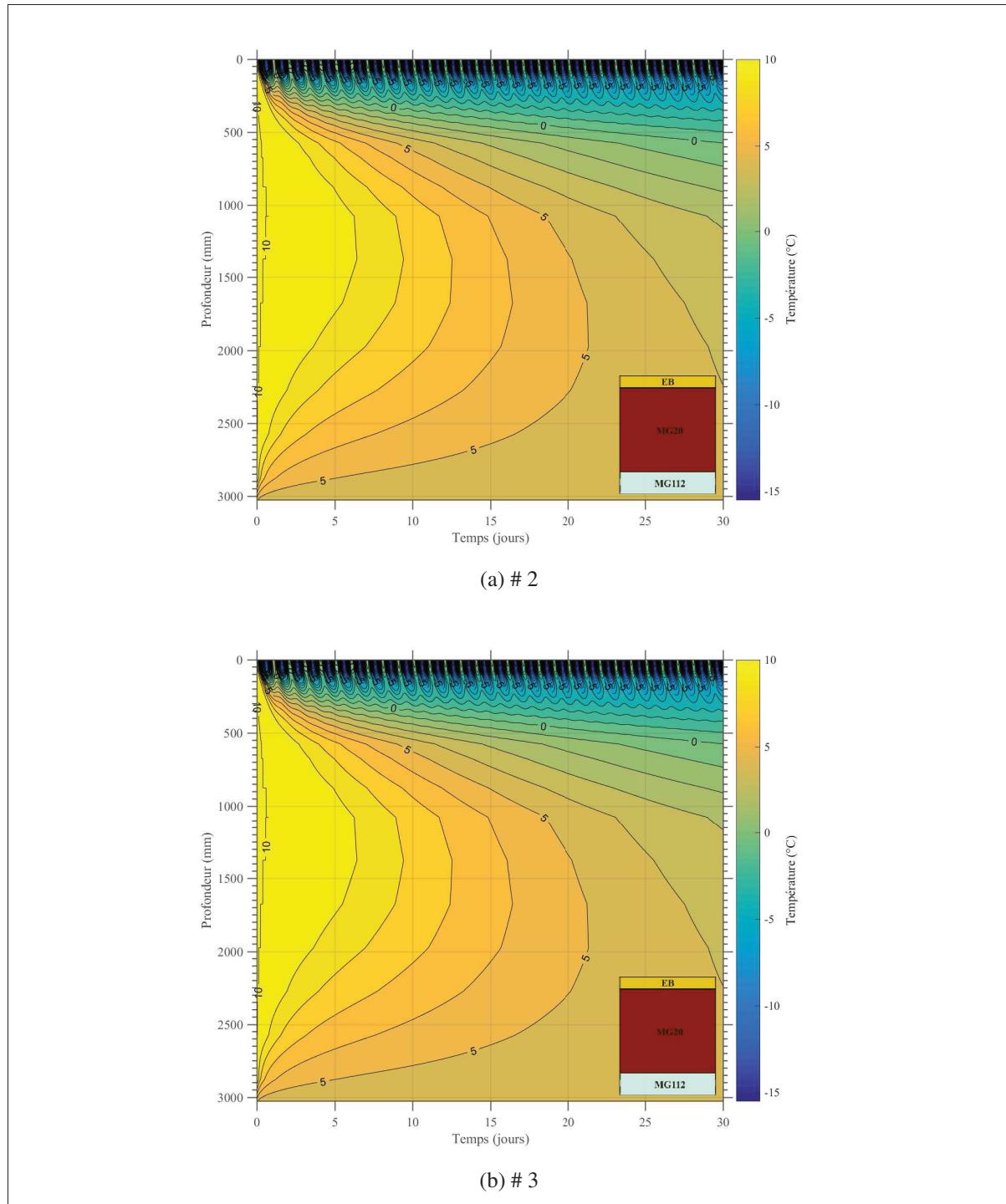


Figure-A VI-10 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #2 et #3 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{sin})

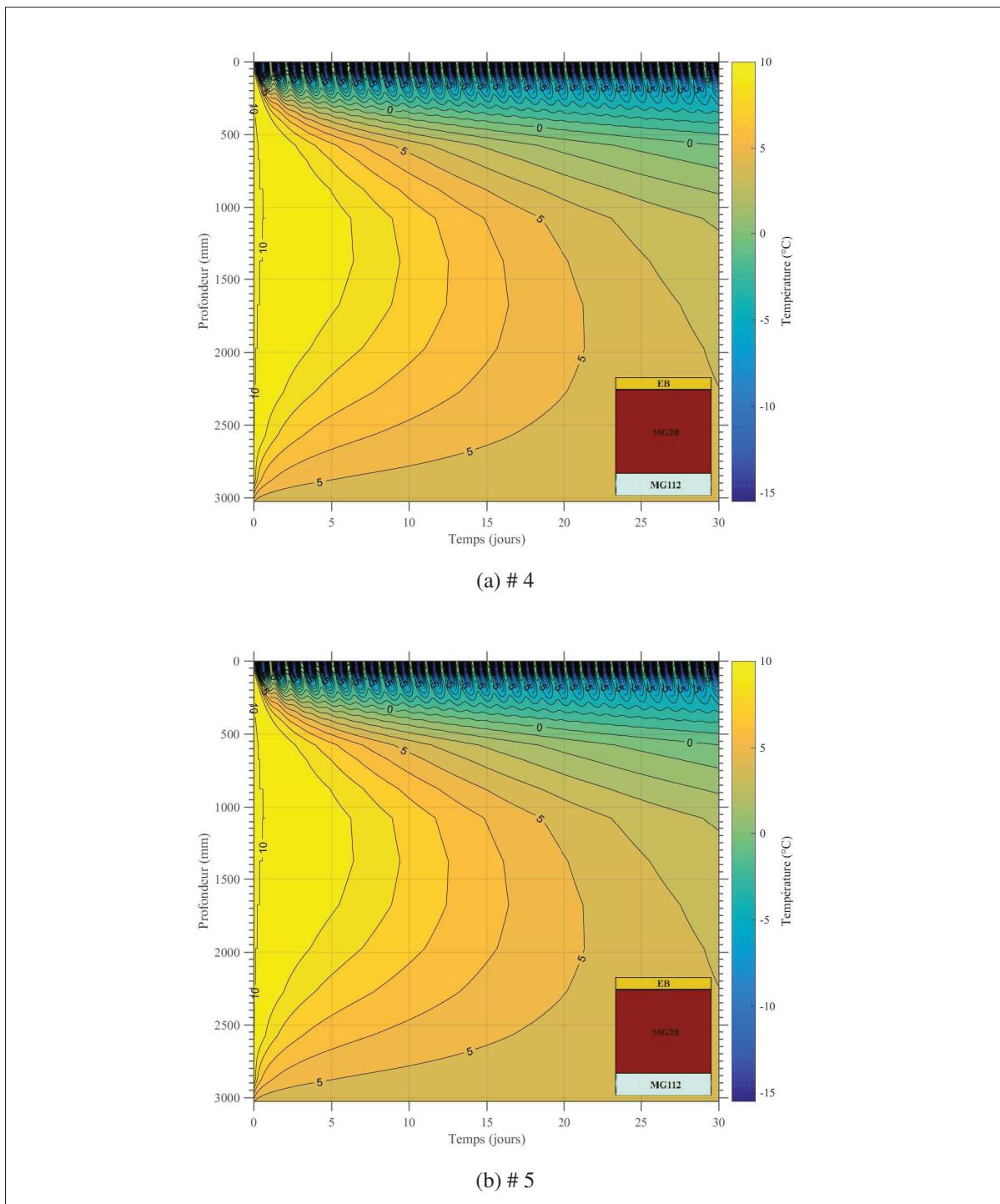


Figure-A VI-11 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #4 et #5 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{sin})

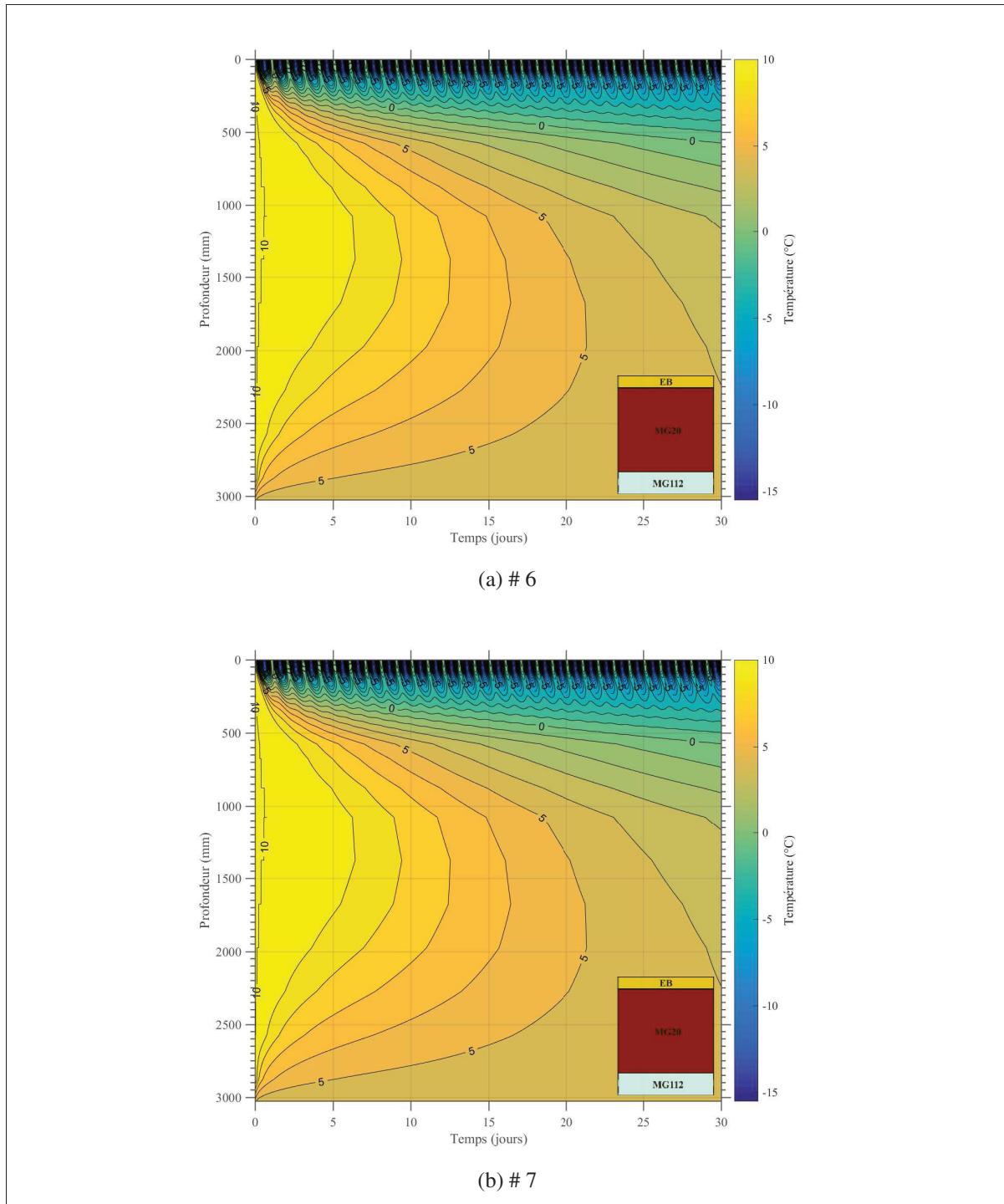


Figure-A VI-12 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #6 et #7 ($\theta = 0\%$, T_{air}^{sin})

4. Cas d'étude #1 à #7 pour T_{air}^{sin} et $\theta = 10\%$

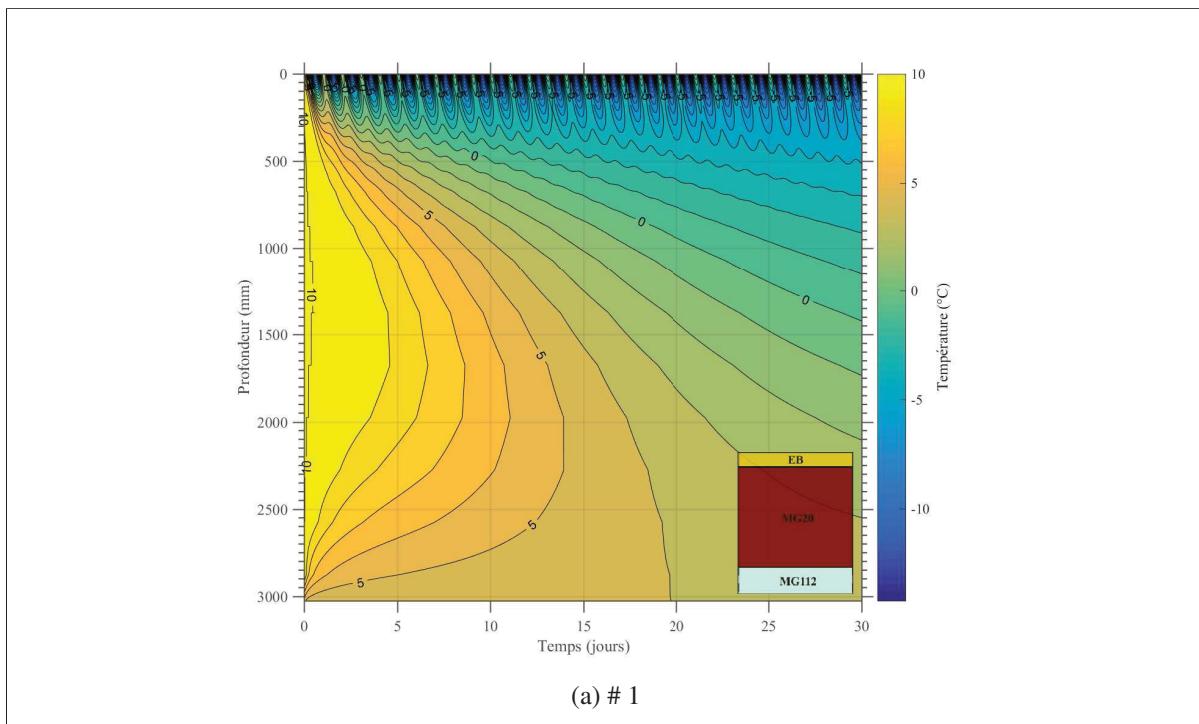


Figure-A VI-13 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans le cas d'étude #1 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{sin})

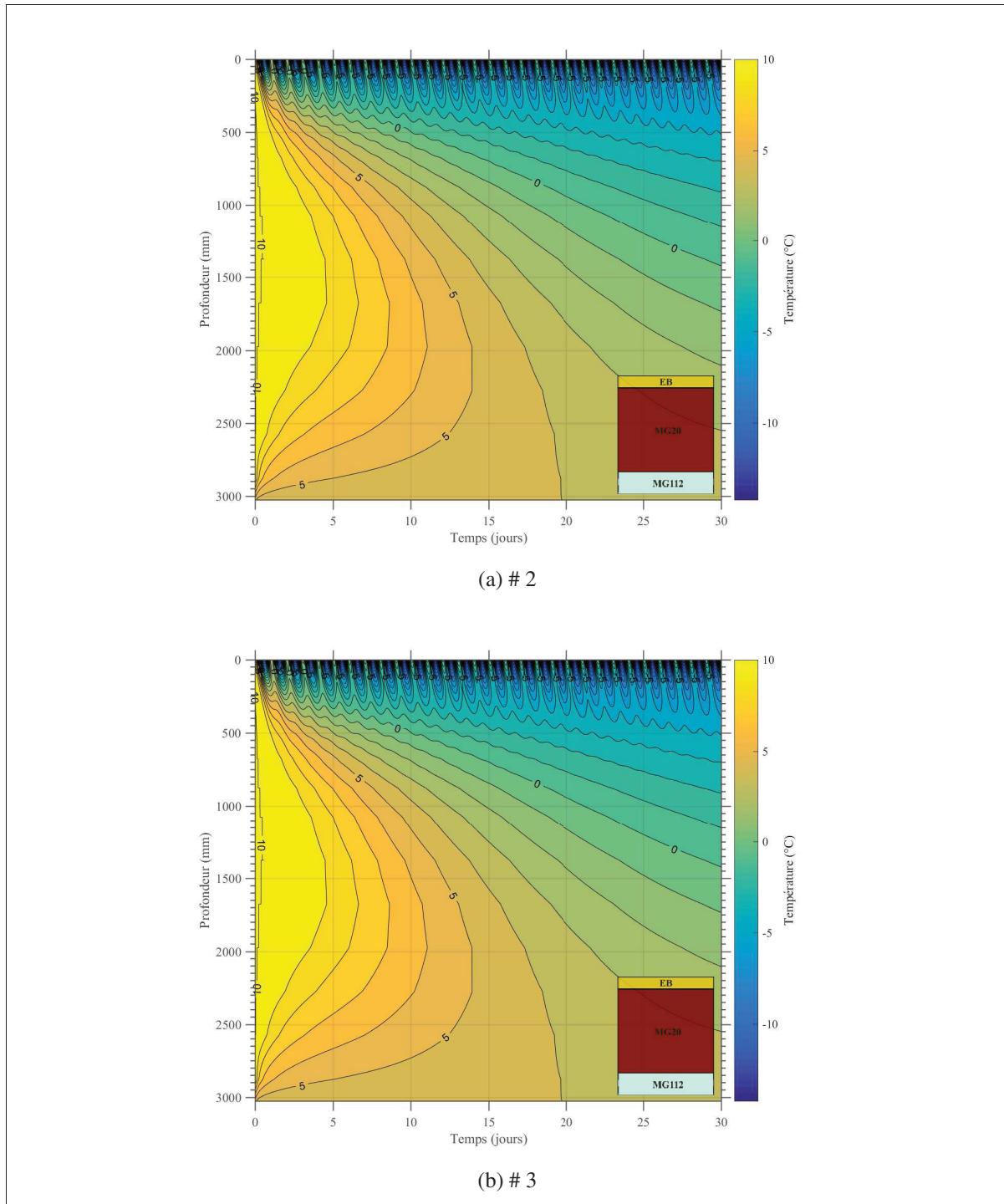


Figure-A VI-14 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #2 et #3 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{sin})

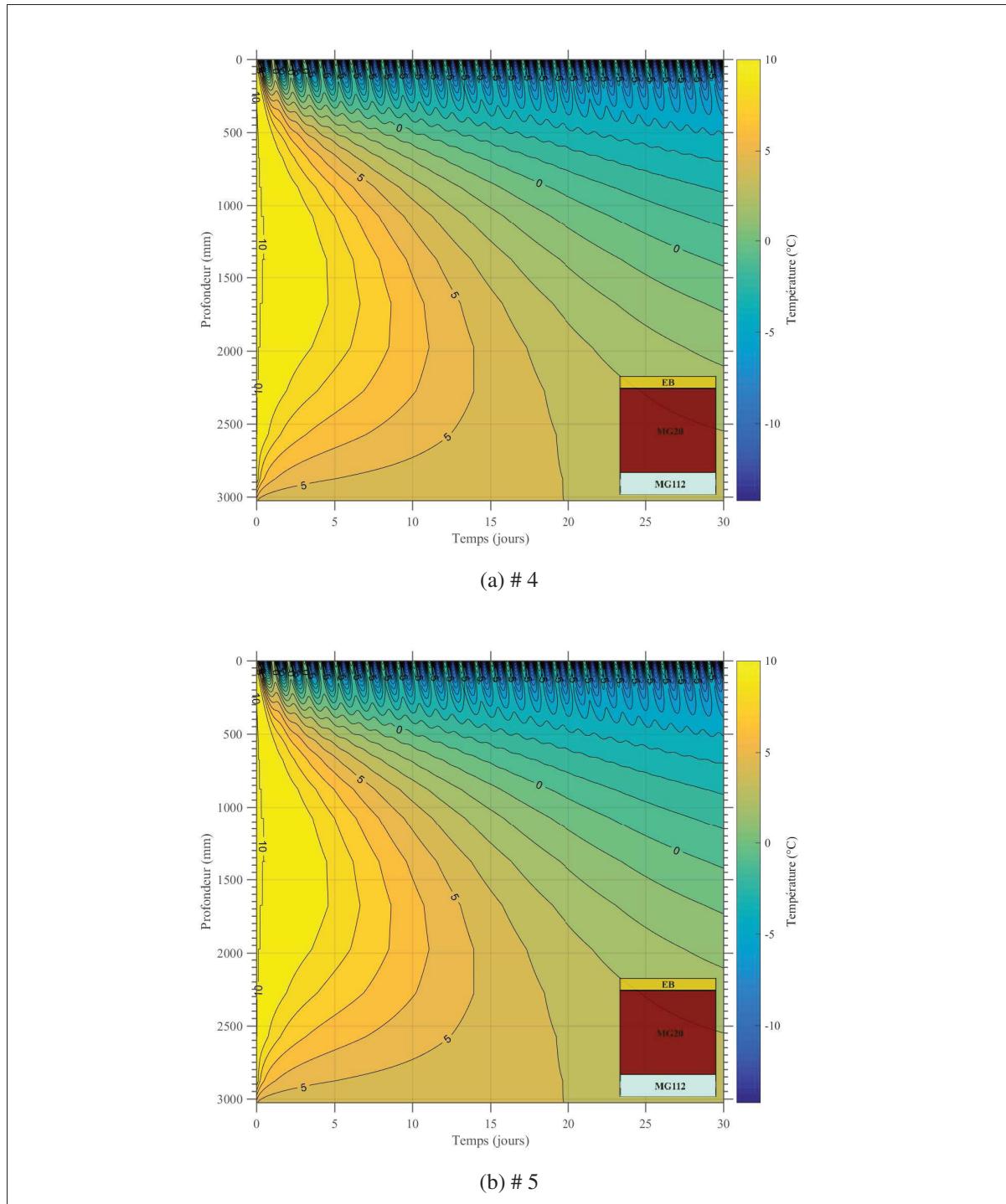


Figure-A VI-15 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #4 et #5 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{sin})

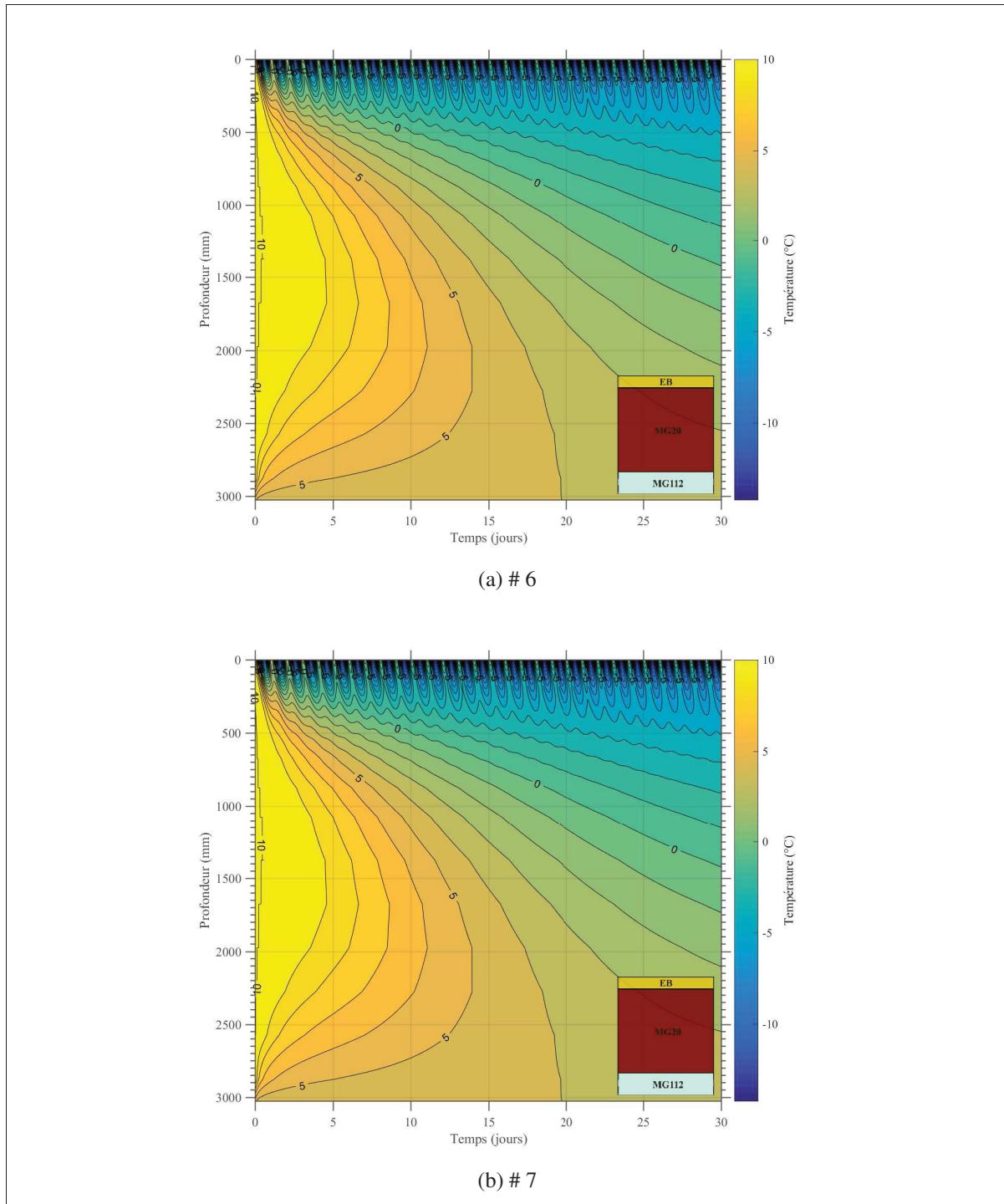


Figure-A VI-16 Profil complet de l'évolution de la température en fonction temps et de la profondeur dans les cas d'étude #6 et #7 ($\theta = 10\%$, T_{air}^{sin})

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems engineering*, 86(1), 97–102. doi : 10.1016/S1537-5110(03)00112-0.
- Al Nakshabandi, G. & Kohnke, H. (1965). Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural meteorology*, 2(4), 271–279. doi : 10.1016/0002-1571(65)90013-0.
- Arnold, G., Werkmeister, S., Alabaster, D. & NZ Transport Agency. (2008). *The effect of adding recycled glass on the performance of basecourse aggregate*. Wellington, N.Z. : NZ Transport Agency.
- ASTM International. (2014). *Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. Repéré à <http://www.astm.org/doiLink.cgi?D5334>.
- Baver, L. D., Gardner, W. H. & Gardner, W. R. (1972). *Soil physics* (éd. 4th ed). New York : Wiley.
- Bernard, W. (2014). *Etude et caractérisation du granulat de verre de postconsommation comme matériaux du corps de chaussées*. Montréal.
- Beskow, G. (1947). *Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, with a special supplement for the English translation of progress from 1935 to 1946*. Evanston, Ill. : Technological Institute, Northwestern University. Repéré à [//catalog.hathitrust.org/Record/001514128](http://catalog.hathitrust.org/Record/001514128).
- Bhardwaj, R., Phelan, P. E., Golden, J. & Kaloush, K. (2006). An Urban Energy Balance for the Phoenix, Arizona USA Metropolitan Area. 367–376. doi : 10.1115/IMECE2006-15308.
- Boutonnet, M., Savard, Y., Lerat, P., St-Laurent, D. & Pouliot, N. (2003). Thermal Aspect of Frost-Thaw Pavement Dimensioning : In Situ Measurement and Numerical Modeling. *Transportation research record : Journal of the transportation research board*, 1821, 3–12. doi : 10.3141/1821-01.
- Bouyoucos, G. (1915). Effect of temperature on the movement of water vapor and capillarity moisture in soils. *Journal of agricultural research*, p. 141–172.
- Carlson, J. D., Bhardwaj, R., Phelan, P. E., Kaloush, K. E. & Golden, J. S. (2010). Determining Thermal Conductivity of Paving Materials Using Cylindrical Sample Geometry. *Journal of materials in civil engineering*, 22(2), 186–195. doi : 10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:2(186).
- Carslaw, H. & Jaeger, J. (1986). *Conduction of Heat in Solids* (éd. 2 edition). Oxford Oxfordshire : New York : Oxford University Press.

- Chen, F., Li, L. & Du, J. (2006). Study on properties of asphalt mixture with waste glass. *Journal of building materials*.
- Chen, S. X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and mass transfer*, 44(10), 1241–1246. doi : 10.1007/s00231-007-0357-1.
- Chesner, W. H., Collins, R. J. & MacKay, M. H. (1998). *User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction* (Rapport n°Rept. No. 480017). Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=483842>.
- Corlew, J. S. & Dickson, P. F. (1968). Methods for calculating temperature profiles of hot-mix asphalt concrete as related to the construction of asphalt pavements. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=100902>.
- Côté, J. & Konrad, J. M. (2002). A field study of hoarfrost formation on insulated pavements. *Can. geotech. j.*, 39(3), 547–560. doi : 10.1139/t02-007.
- Côté, J. & Konrad, J.-M. (2006). Granular protection design to minimize differential icing on insulated pavements. *Can. geotech. j.*, 43(3), 260–272. doi : 10.1139/t06-002.
- Czeratzki, W. & Frese, H. (1958). Importance of water in formation of soil structure. *Highway Research Board Special Report*. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=127448>.
- Dames and Moores, I. (1993). *Glass Feedstock Evaluation Project* (Rapport n°B6). Seattle.
- Dang, L. (2013). *Theoretical and Experimental Study of Single-Needle Thermal Conductivity Probe*. (Thèse de doctorat, Ryerson University).
- De Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. *Amsterdam : North-holland publishing company*.
- De Vries, D. & Peck, A. (1958). On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils. I. Extension of Theory and Discussion of Probe Characteristics. *Aust. j. phys.*, 11(2), 255–271. Repéré à <http://www.publish.csiro.au/paper/PH580255>.
- Defer, D., Belattar, S. & Duthoit, B. (1993). Contrôle non destructif d'une paroi in situ par impédance thermique. *Materials and structures*, 26(1), 3–7. doi : 10.1007/BF02472231.
- Degiovanni, A. (1994). *Conductivité et diffusivité thermique de solides* (Rapport n°R 2850). Repéré à <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-des-grandeurs-thermophysiques-42544210/conductivite-et-diffusivite-thermique-des-solides-r2850/>.
- Dempsey, B. J. & Thompson, M. R. (1970a). A heat transfer model for evaluating frost action and temperature-related effects in multilayered pavement systems. *Highway research record*. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=102331>.

- Dempsey, B. J. & Thompson, M. R. (1970b). A heat transfer model for evaluating frost action and temperature-related effects in multilayered pavement systems. *Highway Research Record*. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=102331>.
- Desjarlais, C. & Blondlot, A. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques. Ouranos. Repéré à http://biblio.ville.blainville.qc.ca/in/faces/details.xhtml?id=p%3A%3Ausmarcdef_0000114694&.
- Dickson, P. F. (1973). Cold weather paving with glasphalt. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=94534>.
- Doré, G. (1997). *Détérioration des chaussées en conditions de gel ; une nouvelle approche prévisionnelle*. (Thèse de doctorat, Université Laval).
- Doucet, F. (2014). *Détermination du module réversible des matériaux granulaires au ministère des transports du Québec [ressource électronique] / Félix Doucet et Bruno Auger*. – (Rapport n°RTQ-15-01 Québec (Province). Ministère des transports).
- Dysli, M. (1991). *Le gel et son action sur les sols et les fondations*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Dysli, M. (2007). *Étude expérimentale du dégel d'un limon argileux : application aux chaussées et pergélisol alpins*. (Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne). Repéré à <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-3792>.
- Dysli, M. & Pfister, R. (1980). *Tentative de quantification de la perte de portance au dégel*. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoires de mécanique des sols et des roches.
- Dysli, M., Pfister, R. & Ecole polytechnique fédérale (Lausanne). (1982). *Test of bearing capacity during thaw*. Lausanne : Ecole polytechnique fédérale.
- Farouki, O. (1981). *Thermal properties of soils*. Hanover (N.H.) : U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Forum, G. P. S. (2008). *The use of Crushed Glass as both an Aggregate Substitute in Road Base and in Asphalt in Australia*. Sydney, NSW, Australia.
- Gauthier, S. (2012). *Caractérisation thermique de la matière par la méthode 3w*. (phdthesis, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc).
- Giordanengo, M. (2010). *L'influence des bâtiments et de l'inclinaison des forages sur le dimensionnement des systèmes géothermiques*. (masters, École Polytechnique de Montréal). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/316/>.
- Golden, J. & Kaloush, K. (2006). Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects - International Journal of Pavement Engineering - Volume 7, Issue 1. Repéré à <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298430500505325#.Vv1zNvnBpg>.

- Golden, J. S., Guthrie, P. M., Kaloush, K. E. & Britter, R. E. (2005). Summertime urban heat island hysteresis lag complexity. *Proceedings of the institution of civil engineers - engineering sustainability*, 158(4), 197–210. doi : 10.1680/ensu.2005.158.4.197.
- Goncalves, E. (2005). Discretisation des équations aux dérivées partielles. Dans *Résolution numérique discréétisation des edp et edo* (pp. 9–37). Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Gui, J., Phelan, P., Kaloush, K. & Golden, J. (2007). Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures. *Journal of materials in civil engineering*, 19(8), 683–690. doi : 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(683).
- Hachem, S. (2008). *Cartographie des températures de surface, des indices de gel et de dégel et de la répartition spatiale du pergélisol à l'aide du Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)*. (Thèse de doctorat, Université Laval). Repéré à <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/25601/25601.html>.
- Hanson, J. L. & Neuhaeuser, S. (2004). Development and Calibration of a Large-Scale Thermal Conductivity Probe. *Astm geotechnical testing journal*, (4), 393–403. Repéré à <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=952030>.
- Highter, W. H. & Wall, D. J. (1984). Thermal properties of some asphaltic concrete mixes. *Transportation research record*, (968). Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=216827>.
- Horai, K.-i. & Simmons, G. (1969). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Earth and planetary science letters*, 6, 359–368. doi : 10.1016/0012-821X(69)90186-1.
- Hütter, E. S. & Kömle, N. I. (2012). Performance of thermal conductivity probes for planetary applications. *Geoscientific instrumentation, methods and data systems*, 1(1), 53–75. doi : 10.5194/gi-1-53-2012.
- Hughes, C. S. (1990). *Feasibility of using recycled glass in asphalt*. Virginia Transportation Research Council.,
- Hui, W. (2014). *Historical and Homogenized surface wind speeds for Canada*.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J. & Ingersoll, A. C. (1945). Heat Conduction with Engineering, Geological, and Other Applications. *Physics today*, 8(3), 17–17. doi : 10.1063/1.3061951.
- Jackson, K. W. (1976). *Development of a guarded hot plate thermal conductivity measuring apparatus for thermoplastic materials*. (Thesis, Georgia Institute of Technology).
- Jannot, Y. (2011). Théorie et pratique de la métrologie thermique. Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée.

- Jordan, P. G. & Thomas, M. E. (1976). Prediction of cooling curves for hot-mix paving materials by a computer program. *Publication of : Transport and road research laboratory*. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=66511>.
- Kavianipour, A. & Beck, J. V. (1977). Thermal property estimation utilizing the Laplace transform with application to asphaltic pavement. *International journal of heat and mass transfer*, 20(3), 259–267. doi : 10.1016/0017-9310(77)90212-5.
- Kersten, M. S. (1949). Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. Repéré à <https://infoscience.epfl.ch/record/27207?of=HB>.
- Kömle, N. I., Macher, W., Kargl, G. & Bentley, M. S. (2013). Calibration of non-ideal thermal conductivity sensors. *Geoscientific instrumentation, methods and data systems*, 2(1), 151–156. doi : 10.5194/gi-2-151-2013.
- Kurt, R. (2012). Soil Heat. Dans *Soil Physics Lecture Notes* (pp. 241–287). Germany : Institute of Environmental Physics.
- Larsen, D. A. (1989). Feasibility of utilizing waste glass in pavements. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=349153>.
- Lolias, Y., Cameron, L., Cielo, A., Cordelia, M., Gethin, B., Josefa, T., Kenneth, K. & Matthew, S. (2012). *Research Report on the Recycling and Reuse of Materials within Civil Construction*. Palmerston, Northern Territory.
- Low, J., Loveridge, F. A. & Powrie, W. (2014). Thermal conductivity of soils by the needle probe method, for energy foundation applications [conference]. Repéré à <http://eprints.soton.ac.uk/364338/>.
- Lu, H., Huang, W., Li, K., Liu, L. & Sun, L. (2011). Glaphalt Mixtures' Performance Research and Analysis. pp. 1427–1432. doi : 10.1061/41184(419)236.
- Mamlouk, M. S. & Zaniewski, J. P. (1999). *Materials for civil and construction engineers*. Menlo Park, Calif. : Addison-Wesley.
- Mammeri, A., Ulmet, L., Petit, C. & Mokhtari, A. M. (2015). Temperature modelling in pavements : the effect of long- and short-wave radiation. *International journal of pavement engineering*, 16(3), 198–213. doi : 10.1080/10298436.2014.937809.
- Mitchell, M. R., Link, R. E. & Zarr, R. R. (2010). Uncertainty Analysis of Thermal Transmission Properties Determined by ASTM C177-04. *Journal of testing and evaluation*, 38(2), 102462. doi : 10.1520/JTE102462.
- Mrawira, D. & Luca, J. (2002). Thermal Properties and Transient Temperature Response of Full-Depth Asphalt Pavements. *Transportation research record : Journal of the transportation research board*, 1809, 160–171. doi : 10.3141/1809-18.

- Murphy, K., West, R. & Page, G. (1991). *Evaluation of Crushed Glass in Asphalt Paving Mixtures*. (Rapport n°FL/DOT/SMO/91-388).
- Nagasaki, Y. & Nagashima, A. (1981). Absolute measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method. Repéré à <https://keio.pure.elsevier.com/en/publications/absolute-measurement-of-the-thermal-conductivity-of-electrically--2>.
- Nan Su, J. S. C. (2002). Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. *Resour Conserv Recycl. Resources, conservation and recycling*, 35(4), 259–274. doi : 10.1016/S0921-3449(02)00007-1.
- Ogolo, N. A., Akinboro, O. G., Inam, J. E., Akpokere, F. E. & Onyekonwu, M. O. (2015). Effect of Grain Size on Porosity Revisited. doi : 10.2118/178296-MS.
- Patten, H. E. (1909). *Heat transference in soils*. Washington : Government Printing Office. Repéré à <http://archive.org/details/heattransference59patt>.
- Paxton, J. A. & Hutcheon, N. B. (1952). Moisture Migration in a Closed Guarded Hot Plate. *Ashve transactions*, 58, 301.
- Perrot, O. (2011). Cours de rayonnement. I.U.T de Saint-Omer Dunkerque.
- Perry, R. A. & Goodall, D. W. (1979). *Arid Land Ecosystems : Structure, Functioning and Management* (éd. Division of Land Resources Management, CSIRO). Wembley, Western Australia : CUP Archive.
- Phukan, A. (1991). Foundations in Cold Regions. Dans Fang, H.-Y. (Éd.), *Foundation Engineering Handbook* (pp. 735–749). Springer US. Repéré à http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-5271-7_19.
- Pilate, O. (2006). Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée. *Compte rendu de recherche c.r.r.* Repéré à <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=18996130>.
- Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H. & Chang, S.-C. (2000). The effect of pavements' temperatures on air temperatures in large cities.
- Qin, Y. & Hiller, J. E. (2011). Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs : Impact of air temperature. *Construction and building materials*, 25(9), 3753–3761. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.015.
- Recktenwald, G. W. (2011). *Finite difference approximations to the heat equation*.
- Saint-Laurent, D. (2006). CHAUSSÉE 2 : Logiciel de dimensionnement des chaussées souples. Guide de l'utilisateur. Ministère des Transport du Québec.
- Savard, Y. (1994). Techniques de drainage des chaussées.

- Shaopeng Wu, W. Y. (2004). Preparation and Properties of Glass-asphalt Concrete. *Key laboratory for silicate materials science and engineering of ministry of education.*
- Simonsen, E. & Isacsson, U. (1999). Thaw weakening of pavement structures in cold regions. *Cold regions science and technology*, 29(2), 135–151. doi : 10.1016/S0165-232X(99)00020-8.
- Speyer, R. F. (1994). *Thermal analysis of materials*. New York : Marcel Dekker.
- Strambu, V. (2012). Influences in thermal conductivity evaluation using the thermal probe method ; some practical aspects.
- Tan, S.-A., Low, B.-H. & Fwa, T.-F. (1992). Determination of thermal conductivity and diffusivity by transient heating of a thin slab. *Building and environment*, 27(1), 71–76. doi : 10.1016/0360-1323(92)90010-M.
- Tarnawski, V.-R. & Leong, W. H. (2000). Thermal Conductivity of Soils at Very Low Moisture Content and Moderate Temperatures. *Transport in porous media*, 41(2), 137–147. doi : 10.1023/A:1006738727206.
- Tarnawski, V. R., Momose, T. & Leong, W. H. (2011). Thermal Conductivity of Standard Sands II. Saturated Conditions. *Int j thermophys*, 32(5), 984–1005. doi : 10.1007/s10765-011-0975-1.
- Tarnawski, V. R., Momose, T., Leong, W. H., Bovesecchi, G. & Coppa, P. (2009). Thermal Conductivity of Standard Sands. Part I. Dry-State Conditions. *Int j thermophys*, 30(3), 949–968. doi : 10.1007/s10765-009-0596-0.
- Terzaghi, K. (1952). Permafrost. *Boston society of civil engineers*, 39(1), 1–50. Repéré à <http://link.bu.edu/portal/Permafrost-by-Karl-Terzaghi/ReyhArK5KXg/>.
- Ukrainczyk, N. (2009). Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1d heat conduction. *International journal of heat and mass transfer*, 52(25–26), 5675–5681. doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.029.
- Valéry Mauduit, C. M. (2013). Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 279, 47–63.
- Van, R. M. & Winterkorn, H. F. (1959). Structural and textural influences on thermal conductivity of soils. *Highway research board proceedings*, 38. Repéré à <https://trid.trb.org/view.aspx?id=121613>.
- Vargaftik, N. B. (1975). *Tables on the thermophysical properties of liquids and gases : in normal and dissociated states*. Washington : New York : Hemisphere Pub. Corp. ; distributed by Halsted Press. Repéré à [//catalog.hathitrust.org/Record/000042729](https://catalog.hathitrust.org/Record/000042729).

- Wartman, J., Grubb, D. G. & Nasim, A. S. M. (2004). Select Engineering Characteristics of Crushed Glass. *Journal of materials in civil engineering*, 16(6), 526–539. doi : 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(526).
- Winterkorn, H. F., Eyring, H., Hogentogler, C. A., Bollen, R. E. & Campen, W. H. (1946). Theoretical aspects of water accumulation in cohesive subgrade soils. *Highway research board proceedings*, 25. Repéré à <https://trid.trb.org/view.aspx?id=127605>.
- Wolfe, R. K., Heath, G. L. & Colony, D. C. (1980). Time-temperature model laboratory and field validation. Repéré à <http://trid.trb.org/view.aspx?id=164351>.
- Xie, H. & Cheng, S. (2001). A fine needle probe for determining the thermal conductivity of penetrable materials. *Meas. sci. technol.*, 12(1), 58. doi : 10.1088/0957-0233/12/1/307.
- XUN, M. (2007). International and domestic recycling of waste glass. *Development guide to building materials*.
- Yezou, R. (1988). Thermique du Bâtiment. Document de Stage CAST. INSA Lyon.
- Zhang, M., Che, Z., Chen, J., Zhao, H., Yang, L., Zhong, Z. & Lu, J. (2011). Experimental Determination of Thermal Conductivity of Water Agar Gel at Different Concentrations and Temperatures. *J. chem. eng. data*, 56(4), 859–864. doi : 10.1021/je100570h.