



Évaluation des revêtements routiers à albédo élevé en contexte nordique

Mémoire

Simon Dumais

Maîtrise en génie civil
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Simon Dumais, 2014

Résumé

Les revêtements routiers à albédo élevé peuvent être utilisés afin de réduire la quantité de chaleur absorbée par les surfaces revêtues ce qui permet de limiter la dégradation du pergélisol sous les remblais routiers. Ce projet a pour but de proposer une méthode d'évaluation efficace des revêtements à albédo élevé en contexte nordique. Le premier objectif est de développer des outils permettant de rapidement évaluer les bénéfices thermiques liés à l'utilisation des revêtements à albédo élevé. Un modèle de calcul a été développé afin de calculer les températures superficielles des revêtements routiers en fonction de leur albédo. Ce modèle a été validé en utilisant les données provenant d'une planche expérimentale réalisée à Beaver Creek au Yukon. Enfin, des outils simples de calcul basé sur ce modèle ont été proposés. Le deuxième objectif est d'offrir un cadre d'évaluation de propriétés techniques des revêtements à albédo élevés. Pour ce faire, les propriétés les plus importantes des revêtements à albédo élevé ont été ciblées : la réflectivité solaire, l'adhérence et la durabilité. Des méthodes d'essais ont ensuite été choisies afin de permettre d'évaluer ces propriétés.

Abstract

High albedo surfaces can be used to reduce heat absorption by road pavement for limiting the degradation of the permafrost underlying road embankments. This project aims at proposing an efficient method to evaluate the use of high albedo surfaces in northern environments. The first objective is to provide tools to evaluate quickly the thermal benefits of high albedo surfaces. A model has been developed to calculate surface temperature of pavements as a function of the albedo of the surface. The model has been validated using data from a test section built in Beaver Cree, Yukon. Simple calculation tools based on the model have been proposed. The second objective is to provide a way to evaluate the technical properties of high albedo surfaces. The most important properties targeted are reflectivity, skid resistance and durability. Testing methods have been chosen in order to test these properties. Observations made on the field and in the laboratory allowed to draw recommendations in order to assure a durable, efficient and safe usage of high albedo surfaces.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des matières	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	xi
Liste des équations.....	xv
Liste des symboles et abréviations.....	xvii
Remerciements.....	xix
1 Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs du projet de recherche	1
1.3 Organisation du document	2
2 État des connaissances	3
2.1 Pergélisol.....	3
2.2 Revêtement à albédo élevé.....	9
2.3 Principaux modes de transfert de chaleur.....	29
2.4 Bilan de chaleur à la surface d'un revêtement routier.....	31
2.5 Modèles de calcul des températures superficielles des revêtements routiers.....	33
2.6 Paramètres d'ingénierie	33
2.7 Pertinence du projet de recherche	36
3 Description des sites expérimentaux	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Planche d'essai de Beaver Creek, Yukon.....	39
3.3 Section expérimentale du SERUL.....	44
3.4 Conclusion.....	44
4 Données thermiques de Beaver Creek	45
4.1 Introduction.....	45
4.2 Albédo	45
4.3 Présentation et analyse des données	46
4.4 Évolution de l'albédo	56
4.5 Conclusion.....	56
5 Modèle de calcul des températures superficielles des revêtements routiers	59
5.1 Introduction.....	59
5.2 Équations constitutives et paramètres d'utilisation	59
5.3 Validation du modèle.....	66
5.4 Utilisations du modèle	73
5.5 Profondeur de dégel.....	84

5.6	Évolution de l'albédo	87
5.7	Conclusion	90
6	Propriétés des revêtements à albédo élevé	91
6.1	Introduction	91
6.2	Propriétés ciblées	91
6.3	Description du programme d'essais	92
6.4	Réflectivité	94
6.5	Adhérence	99
6.6	Durabilité.....	104
6.7	Conclusion	120
7	Discussion	121
7.1	Planche d'essai de Beaver Creek	121
7.2	Modèle de calcul de température superficielle	123
7.3	Propriétés des revêtements routiers à albédo élevé	126
8	Recommandations et conclusion.....	129
8.1	Recommandations et perspectives	129
8.2	Conclusion	130
	Bibliographie	133
	Annexe A.....	139
	Annexe B.....	155
	Annexe C	157

Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Albédo des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek en mai 2013	45
Tableau 4.2 : Données obtenues à la planche expérimentales de Beaver Creek	49
Tableau 4.3: Indices pour la planche expérimentale de Beaver Creek pour la période de gel (d'octobre 2012 à avril 2013)	53
Tableau 4.4: Indices pour la planche expérimentale de Beaver Creek pour la période sans gel (juillet et septembre 2012 et de mai à juillet 2013)	53
Tableau 4.5 : Température superficielle de la planche expérimentale de Beaver Creek le 27 juin 2013 à 17h24	55
Tableau 4.6: Température superficielle de la planche expérimentale de Beaver Creek le 12 décembre 2012 à 9h24	56
Tableau 5.1: Flux de conduction au site de Beaver Creek	65
Tableau 5.2 : Paramètres utilisés pour la validation du modèle	67
Tableau 5.3 : Indices de gel et de dégel mesurés et calculés par le modèle à partir des valeurs mensuelles moyennes.....	69
Tableau 5.4: Indices de gel et de dégel mesurés et calculés par le modèle à partir des valeurs quotidiennes moyennes.....	71
Tableau 5.5 : Indices de gel et de dégel mesurés et calculés, avec et sans conduction	72
Tableau 5.6: Nombre (n) correspondant à la radiation mensuelle moyenne (Klein, 1977)	75
Tableau 5.7 : Données théoriques de profondeur de dégel sous un revêtement routier	86
Tableau 6.1: Albédos des échantillons de laboratoire	96
Tableau 6.2: Dimensions et facteur de forme pour les surfaces de Beaver Creek	97
Tableau 6.3: Albédo des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek	97
Tableau 6.4: Macro texture des revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek	102
Tableau 6.5: Macro texture des échantillons de laboratoire	102
Tableau 6.6: Adhérence des revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek	103
Tableau 6.7: Adhérence des échantillons de laboratoire.....	103
Tableau 6.8: Résultats des essais de résistance à l'abrasion par projection.....	113
Tableau A.1: Description des sections de la planche d'essai du SERUL	140
Tableau A.2: Résumé des relevés d'albédo de Dawson City	158

Liste des figures

Figure 2.1 : Schématisation du profil thermique du pergélisol (Robitaille et Allard, 1996)	3
Figure 2.2: Carte représentant l'étendue du pergélisol au Canada (Modifié de Ressources naturelles Canada, 1993).....	5
Figure 2.3: Influence de la végétation sur la profondeur de dégel (Linell, 1973 tel que cité par Andersland et Ladanyi, 2004).....	7
Figure 2.4: Modification du régime thermique du pergélisol lors de la construction d'un remblai sur pergélisol (Doré 2011 tel que cité par Gravel Gaumond 2014)	8
Figure 2.5: Comportement du pergélisol riche en glace lors d'une modification des conditions de surface (Mackay 1970 tel que cité par Gravel Gaumond, 2014)	9
Figure 2.6: Schématisation de l'utilisation de revêtement à albédo élevé (Doré et Zubeck, 2004).....	9
Figure 2.7 : Schématisation de la variation de la valeur de la masse d'air traversé par le rayonnement solaire (Modifié de Newport, 2014)	11
Figure 2.8 : Contenu spectral de la radiation solaire pour différentes valeurs de masse d'air (Mecherikunnel et Richmond, 1980).....	11
Figure 2.9 Schématisation de l'intensité de la radiation solaire pour une journée dégagée (a) et pour une journée avec passages nuageux (b) (Modifié de Newport, 2014)	12
Figure 2.10: Réflectivité spectrale du Perfect Cool (Iwama et coll., 2011)	16
Figure 2.11: Schématisation du principe de fonctionnement de l'enduit de Nippo (Iwama et coll., 2011)	17
Figure 2.12: Effet de l'enduit de Nippo sur les températures du surface (Iwama et collé, 2011)	17
Figure 2.13: Évolution des températures de surface pour différents taux de pose de chaux hydratée (Emery et coll., 2013).....	18
Figure 2.14 : Vue aérienne de la piste d'atterrissage de Thule en 1989 (Schading, 1989)	19
Figure 2.15 : Profondeur de dégel sous le revêtement en fonction de l'albédo de surface (Bjella, 2013)	20
Figure 2.16 : Flux de chaleur cumulatif au sol d'infrastructure (ADOTPF, 1985).....	21
Figure 2.17 : Section d'essai près de Fairbanks durant l'application de la peinture à gauche et après 30 ans à droite (Beaulac et Doré, 2006)	22
Figure 2.18 : Effet de la granulométrie des granulats utilisés pour le traitement de surface sur les températures superficielles (Berg, 1985).....	23
Figure 2.19 : Effet du volume de trafic sur le facteur n de la surface (Berg, 1985).....	24
Figure 2.20 Influence de l'albédo sur le facteur n de dégel de surface (Berg, 1985).....	24
Figure 2.21 : Relevé de géoradar sous une surface peinte en blanc (Jorgensen et Ingeman-Nielsen, 2008).....	25
Figure 2.22 : Pénétration du dégel sous les revêtements (Jorgensen et Ingeman-Nielsen, 2008).....	25
Figure 2.23 : Planche d'essai de Salluit (Voyer, 2009).....	26
Figure 2.24 : Vue aérienne de la Front Street (Walsh et coll., 2009).....	27
Figure 2.25: Schématisation de la conduction (Thirumaleshwar, 2009)	29
Figure 2.26: Schématisation de la convection entre un fluide et un corps (Thirumaleshwar, 2009)	30
Figure 2.27 : Schématisation du bilan d'énergie simplifié à la surface d'un revêtement routier.....	32
Figure 2.28: Schématisation de l'indice de gel et de dégel (Modifié de Doré et Zubeck, 2004)	34
Figure 3.1: Localisation de Beaver Creek.....	40
Figure 3.2 : Préparation de l'enduit Perfect Cool A (Photo: Yukon Highways and Public Works)	41
Figure 3.3: Installation de l'enduit Perfect Cool A de Nippo (Photo: Yukon Highways and Public Works).....	41
Figure 3.4: Planche d'essai complétée en août 2012, surfaces du bas vers le haut: Perfect Cool A - Nippo, Lafrentz, enrobé froid et traitement de surface à granulats clairs (L-BST) (Photo: Yukon Highways and Public Works).....	42
Figure 3.5: Enduit Perfect Cool A à gauche et l'enduit de Lafrentz à droite; la section instrumentée en arrière-plan	42
Figure 3.6: Position de l'enregistreur de données en bordure de route	43
Figure 3.7: Enregistreur de données de marque HOBO micro-station utilisé à Beaver Creek (Photo : Benoît Loranger).....	43
Figure 4.1:Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 9 juin au 18 juin 2013	46
Figure 4.2: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 12 décembre 2012 au 3 janvier 2014.....	47
Figure 4.3: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 8 avril au 17 avril 2013	48
Figure 4.4 : Températures superficielles, température de l'air et radiation solaire à la planche expérimentale de Beaver Creek	49
Figure 4.5: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois d'octobre 2012	50
Figure 4.6: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois de décembre 2012.....	51
Figure 4.7: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois de mars 2013	52
Figure 4.8 : Effet de l'albédo sur le facteur n pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek	54

Figure 4.9: Effet de l'albédo sur l'indice de radiation pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek	54
Figure 4.10: Effet de l'albédo sur les températures superficielles pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek.....	54
Figure 5.1: Flux de conduction vers le sol pour la section témoin du site de Beaver Creek	65
Figure 5.2 : Validation du modèle de calcul - valeurs mensuelles moyennes.....	68
Figure 5.3 : Écart entre les températures calculées par le modèle et les températures mesurées - valeurs mensuelles moyennes.....	68
Figure 5.4: Validation du modèle de calcul - valeurs quotidiennes moyennes.....	70
Figure 5.5: Écart entre les températures calculées par le modèle et les températures mesurées - valeurs quotidiennes moyennes.....	70
Figure 5.6 : Évolution des températures de la surface de Lafrentz pour les températures mesurées et pour les températures calculées avec et sans conduction	73
Figure 5.7 : Radiation solaire incidente extraterrestre moyenne mensuelle en fonction de la latitude.....	76
Figure 5.8: Radiation solaire extraterrestre en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de dégel	77
Figure 5.9: Radiation solaire extraterrestre en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de gel.....	78
Figure 5.10: Capture d'écran de l'utilitaire de calcul des températures superficielles des revêtements routiers.....	80
Figure 5.11: Abaque de calcul de l'indice de radiation des revêtements routiers pour température de l'air supérieure à 0°C	82
Figure 5.12: Abaque de calcul de l'indice de radiation des revêtements routiers pour température de l'air inférieure à 0°C	83
Figure 5.13 : Profondeur de dégel sous un revêtement routier (exemple théorique de Beaver Creek)	85
Figure 5.14: Profondeur de dégel sous un revêtement routier (exemple théorique de Thule)	85
Figure 5.15 : Évolution de l'albédo en fonction du temps de trois revêtements différents	89
Figure 6.1: Échantillon de PerfectCool A (vue de dessus).....	93
Figure 6.2: Échantillon de PerfectCool A (vue de côté)	94
Figure 6.3: Schématisation du facteur de forme entre deux surfaces circulaires.....	96
Figure 6.4: Surface de l'enduit de Lafrentz en mai 2013	98
Figure 6.5: Essai de la tache de sable sur la surface d'enrobé froid à Beaver Creek en mai 2013	100
Figure 6.6: Pendule britannique pour mesurer la micro texture d'un revêtement (ASTM E303).....	101
Figure 6.7: Essai de pendule britannique réalisé sur la surface de PerfectCool A	101
Figure 6.8: Schématisation d'un cycle de balayage d'abrasion par projection.....	105
Figure 6.9: Échantillon après 5 cycles d'abrasion par projection	106
Figure 6.10: Rondelle métallique collée à l'époxy à la surface du PerfectCool M.....	106
Figure 6.11: Carottage superficiel autour de la rondelle métallique.....	107
Figure 6.12: Échantillon de PerfectCool M suite au carottage superficiel	107
Figure 6.13: Échantillon de PerfectCool A soumis à l'essai de tension direct.....	107
Figure 6.14: Surface de l'échantillon de PerfectCool M suite à l'essai.....	108
Figure 6.15: Surface de la rondelle de métal suite à l'essai.....	108
Figure 6.16: Essai de <i>Wet Track Abrasion</i> en cours.....	109
Figure 6.17: Type de support utilisé pour l'essai d'abrasion	109
Figure 6.18: Échantillon avec enduit PerfectCool AP avant l'essai d'abrasion	110
Figure 6.19: Échantillon avec enduit PerfectCool A après l'essai d'abrasion	110
Figure 6.20: Échantillon de PerfectCool AP avant le début de l'essai à l'orniéreur.....	111
Figure 6.21: Plaque de PerfectCool A sans sable après 5 cycles	112
Figure 6.22: Plaque de PerfectCool A sans sable après 20 cycles	112
Figure 6.23: Plaque de PerfectCool A sans sable après 30 cycles	112
Figure 6.24: Plaque de PerfectCool A avec sable après 20 cycles	113
Figure 6.25: Plaque de PerfectCool A avec sable après 30 cycles	113
Figure 6.26: Masse totale de l'enduit sur la plaque lors de l'essai de résistance à l'abrasion par projection.....	114
Figure 6.27: Perte de masse cumulative de l'enduit sur la plaque lors de l'essai de résistance à l'abrasion par projection.....	114
Figure 6.28: Échantillon de PerfectCool A après 72 cycles de gel et de dégel.....	116
Figure 6.29: Échantillon de PerfectCool AP après 72 cycles de gel et de dégel	116
Figure 6.30: Échantillon de PerfectCool M après 72 cycles de gel et de dégel	117
Figure 6.31 : État des surfaces, à gauche en 2012 suite à la mise en place de la planche expérimentale, à droite en mai 2013.....	117
Figure 6.32 : État de la surface de PerfectCool A en mai 2013	118
Figure 6.33 : État de la surface de Lafrentz en mai 2013	119
Figure 6.34: État des traces d'enduit effectuées sur un support de BST.....	120
Figure A.1: Photo aérienne des environs du SERUL.....	139

Figure A.2: Schématisation de la planche d'essai du SERUL	140
Figure A.3: Macro texture de la section en enrobé bitumineux.....	141
Figure A.4: Macro texture de la section en traitement bitumineux de surface	141
Figure A.5: Thermistance Onset.....	142
Figure A.6: Tube vide de polycarbonate avec thermistances aux positions approximatives où elles seront installées	142
Figure A.7: Sondes remplies lors de la prise de l'époxy	142
Figure A.8: Forage d'un trou pour accueillir une sonde	143
Figure A.9: Sciage d'une entaille à la surface du revêtement.....	144
Figure A.10: Section d'enrobé bitumineux suite à la pose des sondes et des thermistances avant l'enfouissement des câbles	144
Figure A.11: Vue globale du site suite à la pose complète de l'instrumentation	145
Figure A.12: Enregistreur de données de marque HOBO U30.....	145
Figure A.13: Programmation de l'enregistreur de données	145
Figure A.14: Pose de l'enduit Colas-A sur la section de traitement de surface (section BST-3)	146
Figure A.15: Texture à la surface de la section BST-3 durant la cure	146
Figure A.16: Texture à la surface de la section A durant la cure	147
Figure A.17: Texture à la surface de la section G-0 durant la cure	147
Figure A.18: Délimitation et nettoyage de la surface de traitement bitumineux de surface	148
Figure A.19: Mesure de la peinture à l'aide d'une balance	148
Figure A.20: Mesure du sable à l'aide d'une balance	149
Figure A.21: Mélange de la peinture et du sable à l'aide d'un mélangeur à peinture	149
Figure A.22: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool A sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (section D).....	149
Figure A.23: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool AP sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (section E).....	150
Figure A.24: Section E (Perfect Cool AP) à gauche et section D (Perfect Cool A) à droite suite à la pose de la première couche.....	150
Figure A.25: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool AP sur traitement de surface à l'aide d'un balai (Section BST-1).....	151
Figure A.26: Pose de la deuxième couche de l'enduit Perfect Cool A sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (Section D)	151
Figure A.27: Texture de la section de Perfect Cool AP (en haut – section E) et de Perfect Cool A (en bas – section D) posé sur enrobé bitumineux	152
Figure A.28: Texture de la section de Perfect Cool A posé sur traitement bitumineux de surface (section BST-1).....	152
Figure A.29: Planche d'essai du SERUL complétée.....	153
Figure A.30: Radiation solaire extraterrestre moyenne mensuelle pour différentes latitudes	156
Figure A.31: Carte de l'emplacement des mesures d'albédo à Dawson City	157
Figure A.32: Emplacement 1, surface de gravier au coin de la Fifth Avenue et de la Princess Street	158
Figure A.33: Emplacement 2, surface de gravier sur la Sixth Avenue.....	159
Figure A.34: Emplacement 3, surface de BST à gauche et d'enrobé coloré à droite, voie vers Dawson City en avant-plan et vers Whitehorse en arrière-plan	159
Figure A.35: Emplacement 4, surface d'enrobé coloré, voie vers Whitehorse en avant-plan et vers Dawson City en avant-plan	160
Figure A.36: Emplacement 5, trottoir de bois sur la Fifth Avenue.....	160
Figure A.37: Début de la Front Street, voie vers Dawson City à gauche et vers Whitehorse à droite	161
Figure A.38: Intersection de la Front Street et de la Fifth Avenue à Dawson City	162

Liste des équations

Équation 2.1: Loi de Fourier pour la conduction	29
Équation 2.2: Loi de Newton pour les fluides	30
Équation 2.3: Radiation émise par un corps	30
Équation 2.4 : Bilan d'énergie à la surface d'un revêtement	31
Équation 2.5 : Bilan d'énergie simplifiée à la surface d'un revêtement.....	32
Équation 2.6 : Flux de chaleur dû à la radiation solaire.....	32
Équation 2.7 : Flux de chaleur dû à la convection	32
Équation 2.8 : Flux de chaleur dû à la radiation infrarouge	33
Équation 2.9: Facteur n de gel	34
Équation 2.10: Facteur n de dégel	35
Équation 2.11: Définition de l'indice de radiation de gel	35
Équation 2.12: Définition de l'indice de radiation de dégel	35
Équation 2.13: Relation entre le facteur n de gel et l'indice de radiation de gel	36
Équation 2.14: Relation entre le facteur n de dégel et l'indice de radiation de dégel	36
Équation 5.1: Bilan d'énergie simplifié à la surface d'un revêtement.....	60
Équation 5.2 : Flux de chaleur dû à la radiation solaire.....	60
Équation 5.3: Relation entre l'albédo d'été et l'albédo d'hiver	61
Équation 5.4 : Flux de chaleur dû à la radiation infrarouge	62
Équation 5.5 : Bilan de chaleur dû à la convection.....	62
Équation 5.6: Coefficient de convection	63
Équation 5.7: Flux de chaleur dû à la conduction.....	64
Équation 5.8 : Équation complète du modèle simplifié	66
Équation 5.9: Déclinaison en fonction du jour de l'année	74
Équation 5.10: Angle horaire en fonction de la latitude et de la déclinaison.....	74
Équation 5.11: Nombre d'heures d'ensoleillement en fonction de l'angle horaire du lever du soleil.....	74
Équation 5.12: Radiation solaire extraterrestre	74
Équation 5.13: Radiation solaire quotidienne extraterrestre moyenne	74
Équation 5.14: Radiation solaire extraterrestre pour une période de temps définie	76
Équation 5.15: Radiation solaire à la surface de la Terre en fonction du facteur d'enneigement	78
Équation 5.16: Radiation solaire absorbée par une surface.....	80
Équation 5.17: Température moyenne de l'air à partir de l'indice de dégel ou de gel de l'air	80
Équation 5.18: Indice de radiation totale	81
Équation 5.19: Indice de dégel de la surface	81
Équation 5.20: Indice de gel de la surface	81
Équation 5.21: Température moyenne de surface	81
Équation 6.1: Facteur de forme entre deux surfaces circulaires	95
Équation 6.2: Albédo des échantillons en laboratoire.....	96
Équation 6.3: Calcul de l'albédo de l'enduit de Lafrentz pour l'année 2012.....	98
Équation 6.4: Profondeur moyenne de la texture	99
Équation A.1: Radiation solaire à la surface de la Terre en fonction du facteur d'enneigement.....	156

Liste des symboles et abréviations

a	Albédo
BPN	Nombre du pendule britannique
BST	Traitement bitumineux de surface
D	Diamètre
dT/dx	Gradient thermique dans la direction de x
F	Facteur de forme
G	Radiation solaire à la surface de la Terre
G _{SC}	Constante solaire
G ₀	Radiation solaire extraterrestre
h _c	Coefficient de convection
ID	Indice de dégel
ID _a	Indice de dégel de l'air
ID _s	Indice de dégel de surface
IG	Indice de dégel
IG _a	Indice de gel de l'air
IG _s	Indice de gel de surface
IR	Indice de radiation
k	Conductivité thermique
k _f	Conductivité thermique du sol gelé
k _u	Conductivité thermique du sol non gelé
L _s	Chaleur latente du sol
L _w	Chaleur latente de l'eau
L-BST	Traitement bitumineux de surface à granulats clairs
m	Nombre du mois
M	Masse
M _g	Masse de gaz
M _i	Masse de glace
M _s	Masse solide
M _{uw}	Masse d'eau non gelée
MTD	Profondeur texturale moyenne
n	Nombre de la journée
N	Nombre d'heures maximales d'ensoleillement
n/N	Facteur d'ennuagement
q _c	Flux de convection
q _g	Flux de conduction vers le sol
q _h	Flux dû à l'infiltration d'humidité dans le sol
q _i	Flux de radiation solaire incidente
q _l	Flux dû aux changements de phase de l'eau
q _m	Flux dû aux précipitations
q _r	Flux de radiation solaire réfléchi

q_s	Flux de radiation infrarouge émise par la surface
q_u	Flux de conduction vers l'air
q_w	Flux de radiation infrarouge émise par l'atmosphère
q_x	Flux de conduction dans la direction de x
t	Temps
T	Température
T_a	Température de l'air
T_f	Température du fluide
T_s	Température de la surface
T_{so}	Température du solide
U	Vitesse du vent
V	Volume
V_0	Volume initial
V_g	Volume gaz
V_i	Volume de glace
V_s	Volume solide
V_t	volume total
V_{uw}	Volume d'eau non gelée
V_v	Volume vide
w	Teneur en eau
w_u	Teneur en eau non gelée
X	Profondeur de pénétration du dégel
T_f	Température du fluide
δ	Déclinaison
$\Delta V/V_0$	Contrainte volumétrique
ε	Émissivité
ε_s	Émissivité de surface
ε_{ciel}	Émissivité du ciel
ρ_d	Masse volumique sèche du sol,
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
φ	Latitude
ω_s	Angle horaire du coucher du soleil

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur Guy Doré de m'avoir confié ce projet de recherche. Je le remercie de la confiance qu'il m'a témoignée durant la réalisation de ce projet et de la qualité de l'encadrement qu'il m'a offert. La maîtrise a été grâce à lui un premier contact avec le monde de la recherche scientifique extrêmement enrichissant.

Ce projet a été réalisé grâce à l'intérêt et à la participation financière de tous les partenaires du projet de recherche ARQULUK. Je tiens donc à les remercier. Je remercie particulièrement Monsieur Masahiko Iwama de Nippo Corporation et Monsieur Frédéric Noël de Colas Canada pour leur intérêt et leur support tout au long de la réalisation du projet.

J'aimerais remercier Chantal Lemieux pour son aide et pour son support.

J'aimerais aussi remercier les professeurs du département de génie civil de l'Université Laval grâce à qui j'ai pu recevoir une formation académique d'une qualité exceptionnelle durant ma maîtrise.

J'aimerais remercier mes collègues étudiants. Grâce à eux, la maîtrise n'a pas été qu'une simple expérience académique, mais aussi une expérience sociale très agréable. J'aimerais particulièrement remercier trois amis dont j'ai fait la connaissance durant la réalisation de ma maîtrise : François Perron-Drolet, Dejan Gradbunzija et Loriane Perier. J'espère sincèrement avoir la chance de vivre avec vous d'aussi belles aventures que celles que nous avons partagées durant ces deux dernières années.

Enfin, je remercie tous les membres de ma famille pour leur soutien inconditionnel à tout ce que j'entreprends. Je remercie mes parents de m'avoir inculqué des valeurs de dépassement de soi et d'ardeur au travail qui m'ont permis de mener à bien ce projet de maîtrise.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

La construction d'infrastructures nordiques nécessite des techniques adaptées aux conditions particulières que présente un sol d'infrastructure constitué de pergélisol. Le programme de recherche ARQULUK sur l'ingénierie nordique vise à développer des solutions techniques liées à la performance des infrastructures nordiques construites sur pergélisol. Les solutions proposées doivent tenir compte du coût, de la faisabilité et de l'efficacité de la mise en place de celles-ci.

La phase 1 du projet vise à l'amélioration des connaissances actuelles sur la dégradation du pergélisol et des effets de cette dégradation sur les infrastructures de transport. L'effet de la pente du talus du remblai, le comportement des remblais avec surface revêtue, l'apport de chaleur par écoulement advectif, le comportement en fluage des sols gelés près de 0°C et les remblais construits sur till glaciaire riche en glace seront des aspects étudiés dans la phase 1 du programme ARQULUK.

La phase 2 concerne la détection et la caractérisation des sols sensibles au dégel. Les aspects suivants seront donc étudiés : les méthodes géophysiques utilisant la micro gravimétrie et le profilage thermique, l'analyse de profils longitudinaux et transversaux de chaussées existantes de l'Alaska Highway, la conception d'un carottier effectuant des essais de consolidation du sol in situ et le fluage des sols marginalement gelés.

Enfin, la phase 3 concerne le développement de techniques de stabilisation et d'entretien applicables aux infrastructures de transport construites sur pergélisol instable. En plus du projet présenté dans ce mémoire, deux autres projets s'inscrivent dans la phase 3 : l'amélioration et le développement des techniques de stabilisation thermique par modélisation numérique et en laboratoire, et le développement de critères de conception et des procédures d'entretien des réseaux routiers et des infrastructures aéroportuaires.

Le projet de maîtrise présenté ici s'inscrit dans la phase 3 du programme ARQULUK et vise à faire l'évaluation des revêtements à albédo élevé comme technique de stabilisation des remblais routiers construits sur pergélisol. Le projet cherche à favoriser l'implémentation des revêtements à albédo élevé en proposant des outils d'ingénierie facilitant une conception adaptée au contexte nordique.

1.2 Objectifs du projet de recherche

Le projet portant sur l'«utilisation des revêtements routiers à albédo élevé dans un contexte nordique » a deux objectifs principaux : quantifier l'effet de l'albédo du revêtement sur sa température superficielle et définir une approche permettant d'évaluer adéquatement les propriétés

techniques assurant une utilisation efficace, durable et sécuritaire des revêtements à albédo élevés.

Ces deux objectifs s'inscrivent dans une démarche qui permettra de contribuer à faire l'évaluation de la pertinence de la mise en place des revêtements routiers à albédo élevé afin de stabiliser les remblais routiers construits sur pergélisol.

1.3 Organisation du document

Ce document se divise en huit chapitres dont les contenus respectifs sont décrits ci-dessous.

Le chapitre 2 présente un état de connaissance sur le pergélisol, sur les revêtements à albédo élevé et sur le bilan d'énergie à la surface d'un revêtement routier.

Le chapitre 3 décrit la mise en place des planches d'essai réalisées dans le cadre de ce projet dont les données serviront pour l'ensemble des analyses subséquentes.

Le chapitre 4 présente l'analyse des données recueillies à la planche d'essai de Beaver Creek au Yukon.

Le chapitre 5 présente un modèle de calcul des températures superficielles développé dans le cadre du projet. Des outils de calcul permettant la conception thermique d'un revêtement routier y sont aussi présentés. Enfin, l'impact des températures de surface sur la pénétration du gel et du dégel ainsi que l'évolution temporelle de l'albédo seront brièvement étudiés.

Le chapitre 6 présente l'étude des propriétés des revêtements à albédo élevé afin d'assurer une utilisation efficace, durable et sécuritaire de ceux-ci. Ce chapitre comprend la description des propriétés étudiées et des essais réalisés afin d'évaluer ces propriétés ainsi que les résultats des essais effectués dans le cadre du projet.

Le chapitre 7 présente une discussion des différents résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche.

Enfin, le chapitre 8 présente les recommandations et les conclusions tirées de l'analyse des résultats obtenus dans le cadre du projet.

2 État des connaissances

2.1 Pergélisol

Le pergélisol se définit comme un sol dont la température est inférieure à 0 °C durant au moins 2 années consécutives (Brown et Kupsch, 1974). Il s'agit donc d'une définition thermique seulement, ainsi le pergélisol n'est pas défini par le contenu en glace d'un sol. Cette section présente les concepts généraux du pergélisol ainsi que sa distribution à l'échelle du Canada et du Québec.

2.1.1 Concepts et définition

Le profil thermique du pergélisol permet de schématiser efficacement le comportement thermique du pergélisol. La figure 2.1 présente le profil thermique d'un pergélisol sous la forme d'une courbe trompette.

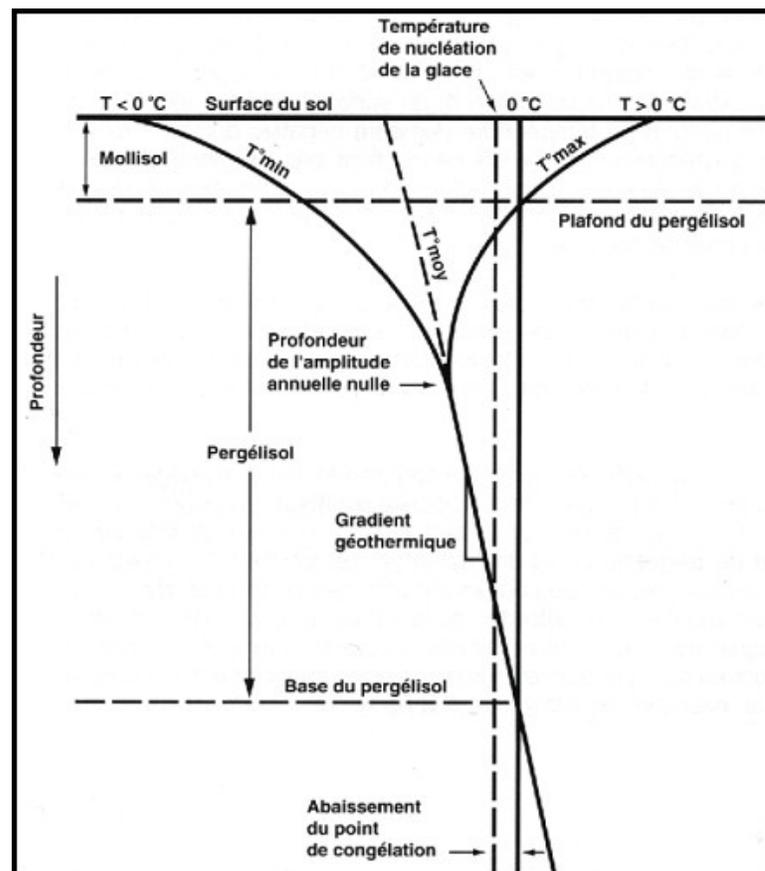


Figure 2.1 : Schématisation du profil thermique du pergélisol (Robitaille et Allard, 1996)

Ce type de graphique présente la température du sol en abscisse en fonction de la profondeur en ordonnée. Les valeurs extrêmes de températures sont représentées par les deux courbes de la partie supérieure du graphique. La courbe de gauche présente les températures minimales en fonction de la profondeur et la courbe de droite, les températures maximales. Les températures

superficielles extrêmes sont inscrites à l'endroit où ces courbes atteignent l'axe des températures. La température du sol durant l'année oscille donc entre des valeurs se trouvant entre les deux courbes extrêmes. La température moyenne du sol peut aussi y être représentée en fonction de la profondeur.

La couche au-dessus du pergélisol se nomme mollisol ou couche active. Il s'agit de la couche de sol qui gèle et dégèle chaque année. La profondeur où la courbe des températures maximales atteint 0 °C caractérise l'épaisseur du mollisol. L'interface entre le mollisol et le pergélisol se nomme le plafond du pergélisol.

L'endroit où les courbes de températures extrêmes se joignent se nomme la profondeur de l'amplitude annuelle nulle. Sous cette profondeur, la variation annuelle de température dans le sol est presque nulle, soit inférieure à 0,1°C.

Sous cette profondeur, la courbe de température en fonction de la profondeur est définie par une droite ayant une pente égale au gradient géothermique du sol. La base du pergélisol se trouve à l'endroit où cette droite est égale à 0 °C. Sous ce point, la température du sol est supérieure à 0 °C. L'épaisseur du pergélisol est définie par la différence de profondeur entre la base du pergélisol et le plafond du pergélisol.

2.1.2 Température du pergélisol

La température du pergélisol permet de déterminer sa sensibilité aux variations de conditions thermiques. Le pergélisol est dit « chaud » lorsque sa température se situe entre 0 et -2 °C alors que lorsque sa température est inférieure à -2 °C il s'agit d'un pergélisol froid (Smith et Burgess, 2004). Le pergélisol chaud est plus sensible aux variations de température, car il est composé de sol partiellement gelé dont les propriétés mécaniques varient grandement lors de variations mineures de température.

2.1.3 Distribution du pergélisol au Canada

La figure 2.2 présente la distribution du pergélisol sur le territoire canadien en fonction des différents types de pergélisol. Le pergélisol est dit « continu » lorsqu'il couvre plus de 90 % du territoire, « discontinu étendu » lorsqu'il couvre entre 50 et 90 % du territoire, « discontinu sporadique » lorsqu'il couvre entre 10 et 50 % du territoire. Le terme « îlots de pergélisol » caractérise un territoire couvert par moins de 10 % de pergélisol. Ainsi, environ 50 % du territoire canadien est couvert de pergélisol. Il s'agit principalement des régions nordiques peu densément peuplées.

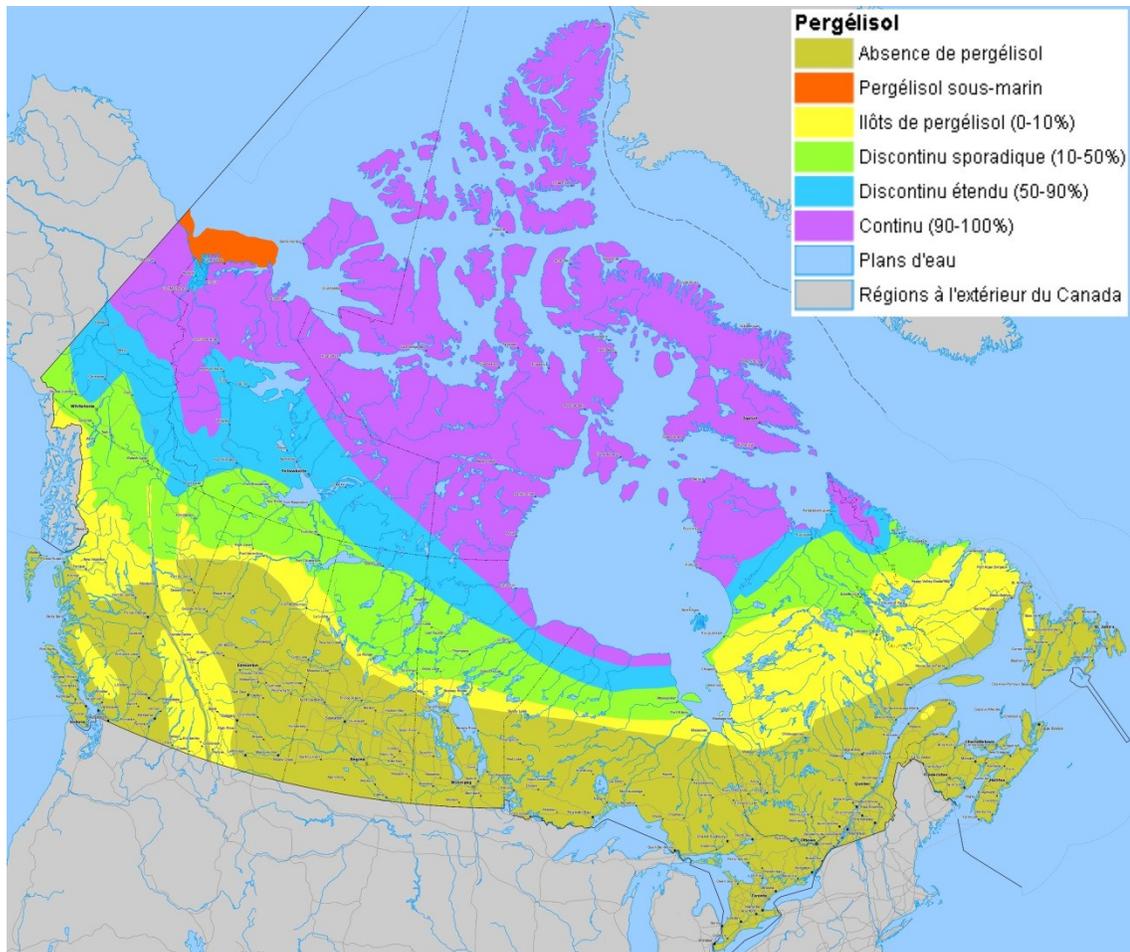


Figure 2.2: Carte représentant l'étendue du pergélisol au Canada (Modifié de Ressources naturelles Canada, 1993)

2.1.4 Épaisseur du pergélisol

L'épaisseur du pergélisol varie grandement sur l'ensemble du territoire. Le pergélisol peut avoir une épaisseur de quelques mètres dans les zones de pergélisol discontinu, alors qu'il atteint une épaisseur de quelques centaines de mètres à l'extrême nord du Canada. La couche active du pergélisol est moins épaisse à des latitudes plus élevées (Johnston, 1981).

2.1.5 Facteurs influençant le pergélisol

Plusieurs facteurs influencent le régime thermique du pergélisol. Ceux-ci ont principalement un impact sur les températures maximales et minimales à la surface du sol.

La température de l'air a un impact direct sur la température de surface. Lorsqu'elle augmente la courbe extrême des températures maximales se déplace vers la droite ce qui a pour impact

d'augmenter l'épaisseur du mollisol et d'abaisser le plafond du pergélisol. Éventuellement, le pergélisol peut disparaître lorsque son plafond rejoint sa base (Doré et Zubeck, 2009).

Le couvert de neige a aussi une grande influence sur la température de surface du pergélisol. Comme la neige possède une très faible conductivité thermique, celle-ci joue un rôle d'isolant ce qui a pour effet de ralentir l'extraction de chaleur du sol durant l'hiver. Ainsi, la courbe des températures minimales se déplace vers la droite ce qui peut entraîner une diminution de la profondeur du pergélisol (Williams et Smith, 1991).

Le couvert végétal a un effet bénéfique sur le pergélisol en diminuant sa température moyenne annuelle. La conductivité thermique du couvert végétal varie en fonction des saisons en raison de la quantité d'eau qu'il contient; elle est élevée l'hiver et faible durant l'été ce qui favorise l'extraction de chaleur durant l'hiver et la diminution de l'absorption de chaleur durant l'été. De plus, le couvert végétal permet l'extraction de la chaleur l'été par évaporation. Les courbes maximales de températures se déplacent alors vers la gauche ce qui a pour effet de diminuer l'épaisseur du mollisol et d'augmenter l'épaisseur du pergélisol. La végétation influence aussi l'accumulation de neige au sol. Généralement, moins de neige s'accumule en zone boisée. Enfin, la végétation diminue la radiation incidente atteignant la surface du sol ce qui diminue la température maximale de surface (Williams et Smith, 1991).

Le retrait de la végétation a donc pour effet de perturber le pergélisol ce qui peut entraîner des dégradations importantes. Une étude a été menée près de Fairbanks en Alaska où trois sections ont été aménagées. La première représente l'état naturel de la végétation, les arbres et arbustes ont été retirés sur la deuxième section, alors que le couvert végétal a complètement été décapé de la troisième section. La profondeur du plafond de pergélisol a été mesurée pendant plusieurs années. Une dégradation importante du pergélisol a été observée sous la deuxième et troisième section telle qu'illustrée à la figure 2.3 (Linell, 1973).

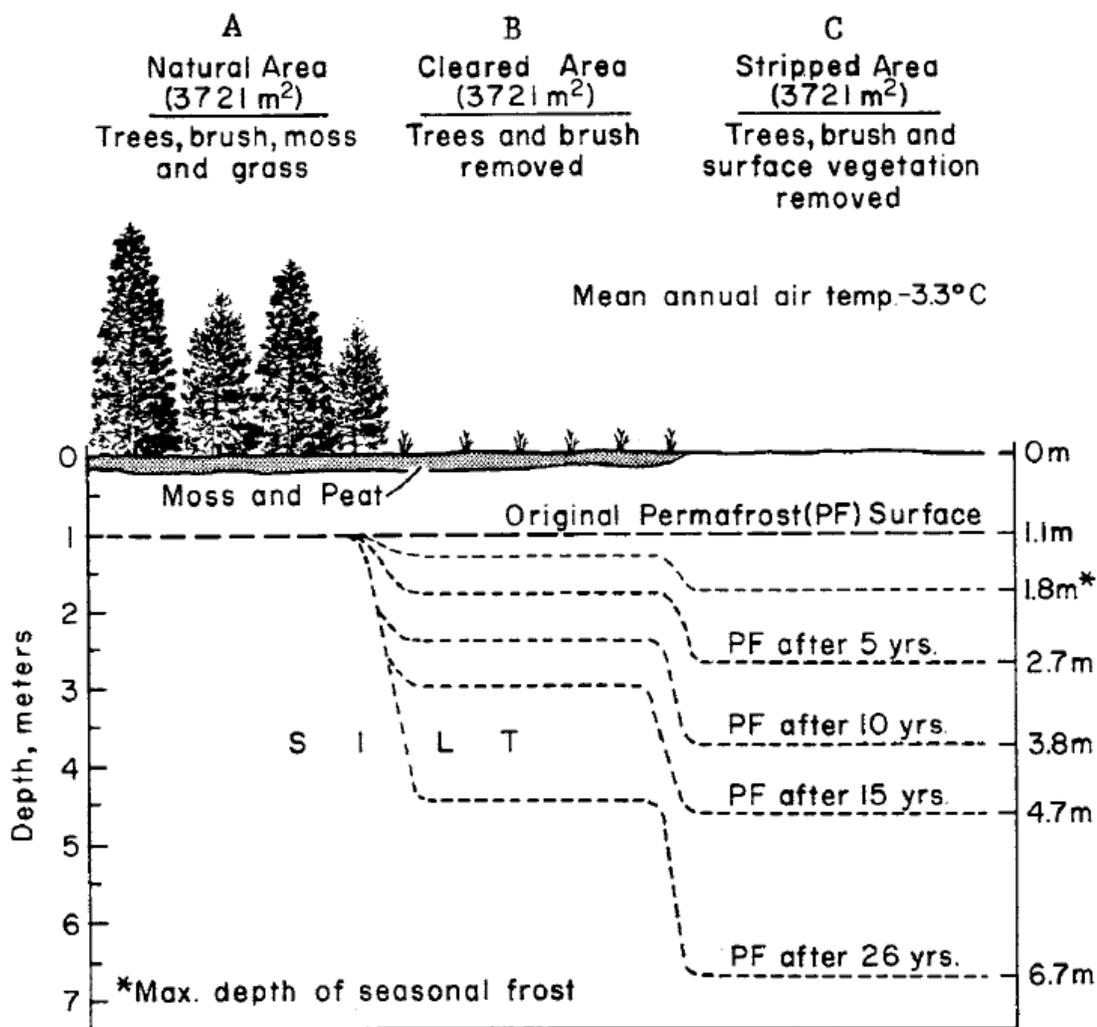


Figure 2.3: Influence de la végétation sur la profondeur de dégel (Linell, 1973 tel que cité par Andersland et Ladanyi, 2004)

2.1.6 Construction de remblai sur pergélisol

La construction de remblai routier en zone de pergélisol perturbe grandement le régime thermique de celui-ci tel qu'illustré à la figure 2.4. Avant la mise en place du remblai, la végétation et le couvert végétal sont parfois retirés ce qui affecte le pergélisol. Ce qui n'est pas une pratique recommandé, car ces changements ont pour effet d'augmenter l'épaisseur de la couche active ce qui peut entraîner la fonte de la partie supérieure du pergélisol et ce qui peut engendrer des tassements (Doré, 2011 tel que cité par Gravel Gaumond 2014).

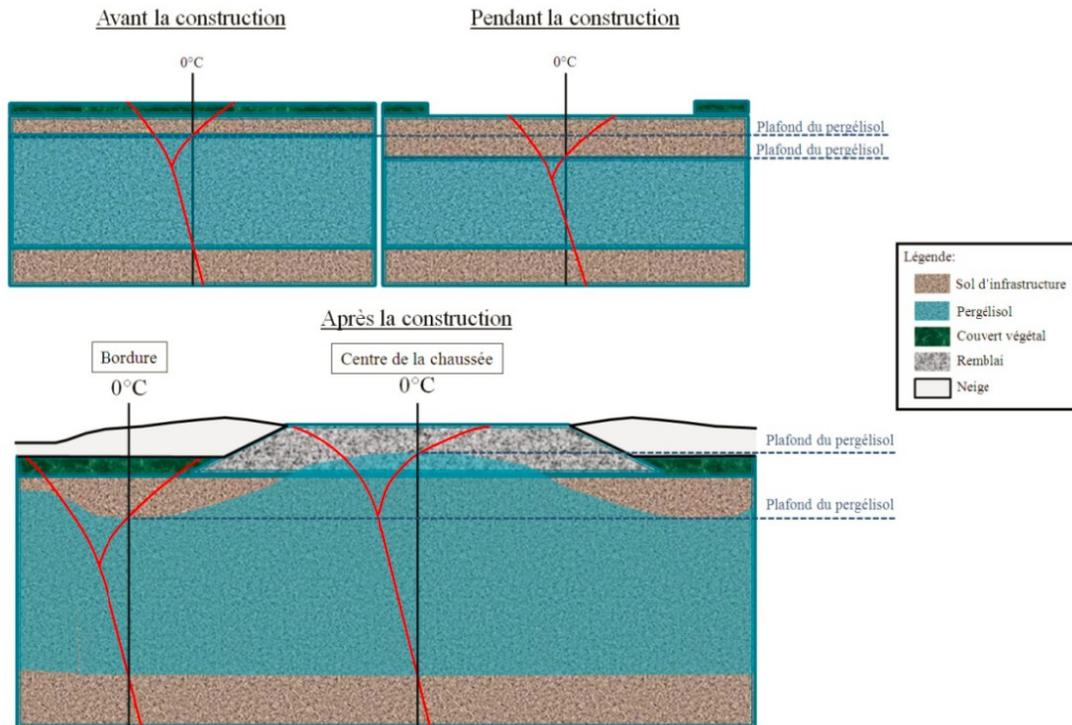


Figure 2.4: Modification du régime thermique du pergélisol lors de la construction d'un remblai sur pergélisol (Doré 2011 tel que cité par Gravel Gaumond 2014)

La mise en place d'un remblai en gravier affecte aussi le régime thermique et le plafond de pergélisol remonte généralement au sein du remblai. Comme la conductivité thermique des matériaux de remblais est relativement élevée et que leur teneur en eau est faible, l'épaisseur de la couche active au sein du remblai est généralement assez importante. De plus, lorsque la surface de roulement du remblai est revêtue par une surface foncée, la température maximale à la surface augmente et donc l'épaisseur de la couche active peut augmenter davantage (Doré et Zubeck, 2009). L'épaisseur de la couche active augmente sous les épaulements en raison de l'accumulation importante de neige et de la faible épaisseur du remblai ce qui peut engendrer une dégradation du pergélisol et créer des instabilités. En effet, si le pergélisol est riche en glace, il y aura une consolidation importante de la couche dégelée et un tassement associé à cette consolidation durant un état dit transitoire. Il y aura par la suite création d'un nouveau régime thermique avec une couche active généralement plus épaisse qu'initialement tel qu'illustré à la figure 2.5. Les tassements associés à la pénétration du dégel sous les remblais routiers peuvent créer des dépressions locales importantes au niveau de la surface de roulement.

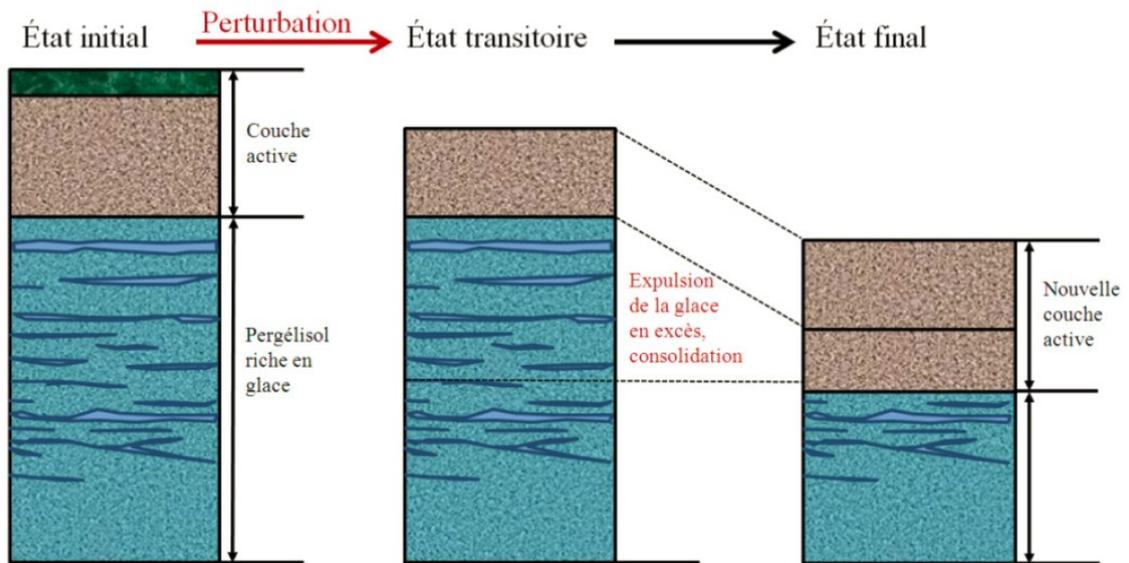


Figure 2.5: Comportement du pergélisol riche en glace lors d'une modification des conditions de surface (Mackay 1970 tel que cité par Gravel Gaumond, 2014)

2.2 Revêtement à albédo élevé

Les revêtements à albédo élevé présentent une solution intéressante afin de mieux adapter la conception de remblais routiers au contexte nordique. Cette technique qui cible principalement la partie centrale et revêtue du remblai permet de limiter l'absorption de chaleur sous le remblai (Doré et Zubeck, 2004). Cette technique cible principalement la partie centrale et revêtue du remblai. La figure 2.6 schématise l'intensité du bilan d'énergie résultant de l'utilisation d'un revêtement réfléchissant. Pour une radiation solaire incidente équivalente, la quantité d'énergie réfléchiée par la surface pâle est plus importante et la quantité de chaleur transmise vers le sol est donc moins importante.

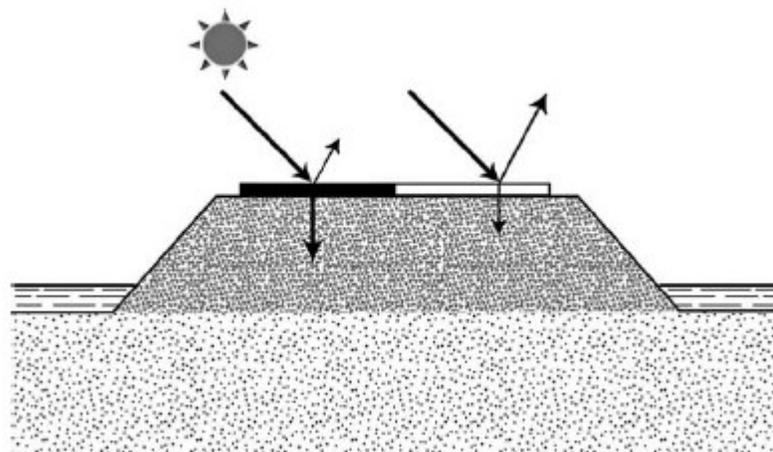


Figure 2.6: Schématisation de l'utilisation de revêtement à albédo élevé (Doré et Zubeck, 2004)

Les concepts généraux nécessaires à la compréhension du comportement thermique des revêtements à albédo élevé tels que la radiation solaire et l'albédo seront d'abord expliqués dans cette section. Ensuite, les différents types de revêtements à l'albédo élevés seront présentés. Enfin, les cas d'utilisations des revêtements à albédo élevé ainsi que les bénéfices liés à leur utilisation compléteront cette section.

2.2.1 Concepts généraux et mécanismes

Pour bien comprendre le concept de réflectivité solaire, il est important de définir convenablement la radiation solaire et l'albédo.

Radiation solaire

La radiation provenant du soleil s'apparente à la radiation émise par un corps noir chauffé à 5777 Kelvin (Nasa, 2011). Ce rayonnement demeure presque inchangé jusqu'à ce qu'il atteigne l'atmosphère entourant la terre. Suite à son passage dans l'atmosphère, une portion du rayonnement est absorbée par les gaz constituant l'atmosphère. Cette absorption n'est pas homogène à travers toutes les longueurs d'onde en raison de la composition chimique particulière de l'atmosphère. Lorsque le soleil est au zénith et que l'angle que le rayonnement forme avec la surface de la Terre est de 90° , le rayonnement solaire traverse une fois l'épaisseur totale de l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre. Ce rayonnement est donc défini comme ayant traversé une fois la masse d'air de l'atmosphère (AM-1). Ce rayonnement est composé d'un peu moins de 50 % de rayons visibles et d'un peu moins de 50 % de rayons infrarouges avec moins de 1 % de rayons ultraviolets. Par contre, lorsque la position du soleil forme un angle par rapport au zénith, la masse d'air traversé par le rayonnement solaire devient plus importante et une plus grande portion de certaines longueurs d'onde est absorbée par l'atmosphère alors que d'autres longueurs d'onde ne sont pas affectées. Le spectre solaire est donc défini comme ayant traversé un certain nombre de masse d'air; par exemple, si la distance traversée est deux fois plus importante que l'épaisseur de l'atmosphère, le rayonnement sera dénoté comme ayant une masse d'air de 2 (AM-2). La figure 2.7 schématise la variation de la masse d'air traversé par le rayonnement solaire par rapport à l'angle du soleil. La figure 2.8 présente le contenu spectral du rayonnement pour différentes valeurs de masse d'air incluant le rayonnement extraterrestre (AM-0).

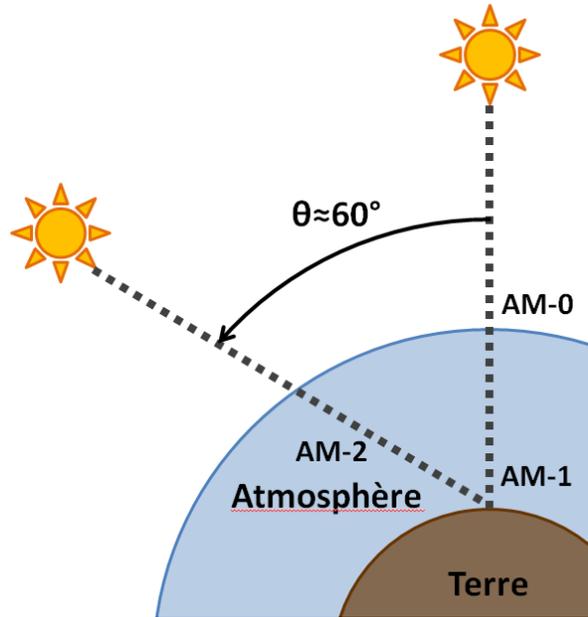


Figure 2.7 : Schématisation de la variation de la valeur de la masse d'air traversé par le rayonnement solaire (Modifié de Newport, 2014)

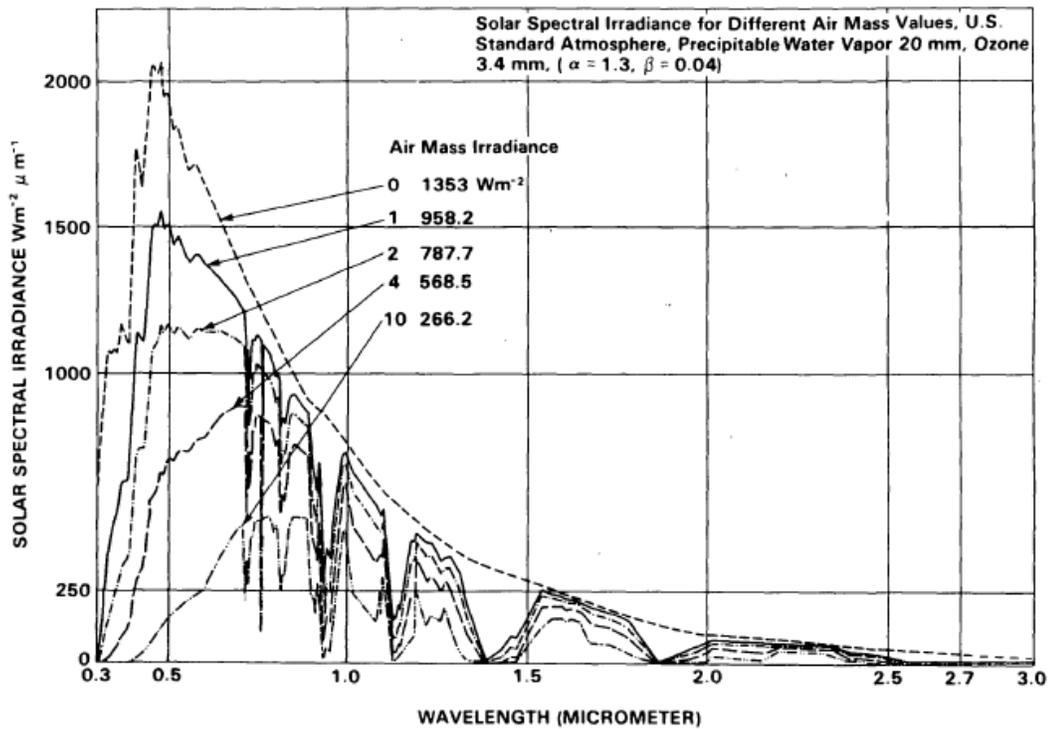


Figure 2.8 : Contenu spectral de la radiation solaire pour différentes valeurs de masse d'air (Mecherikunnel et Richmond, 1980)

De plus, une portion du rayonnement solaire est déviée lors de son passage dans l'atmosphère ce qui entraîne un rayonnement diffus. En raison du phénomène optique à l'origine de cette déviation,

le contenu spectral de la radiation diffuse est différent de celui du rayonnement direct. La proportion de rayonnement visible est plus importante pour le rayonnement diffus que pour le rayonnement direct.

Le spectre du rayonnement solaire qui atteint une surface horizontale à la surface de la Terre varie donc en fonction de l'angle du soleil et de la quantité de rayonnement direct et diffus, c'est-à-dire de la quantité d'ombre sur la surface.

Enfin, le rayonnement solaire incident à une surface horizontale n'est pas constant au cours d'une journée. Il atteint un maximum lorsque le soleil est au zénith et un minimum la nuit. La figure 2.9 a schématise cette variation diurne. Pour les journées nuageuses ou avec des passages nuageux, certains épisodes affectent le rayonnement incident tel qu'illustré à la figure 2.9b. Dans ce document, la plupart des valeurs de radiation solaire seront exprimées en moyennes quotidiennes ou en moyennes mensuelles. Les lignes rouges sur la figure 2.9 représentent la moyenne quotidienne de radiation. La moyenne mensuelle étant la moyenne des moyennes quotidiennes.

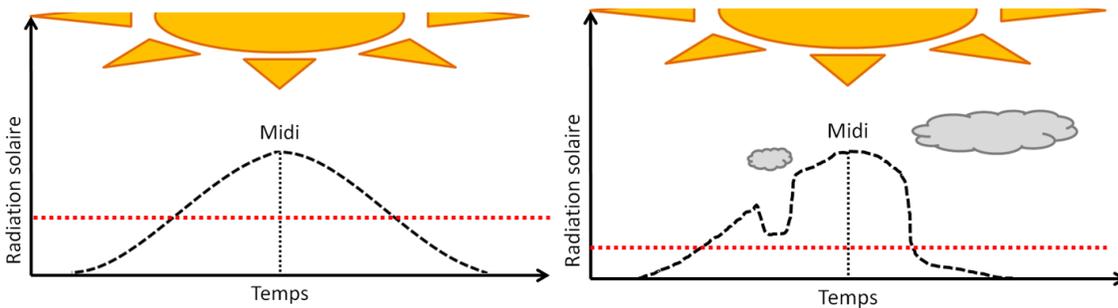


Figure 2.9 Schématisation de l'intensité de la radiation solaire pour une journée dégagée (a) et pour une journée avec passages nuageux (b) (Modifié de Newport, 2014)

Albédo

L'albédo (a) est défini comme la portion de la radiation solaire incidente à une surface qui est réfléchi par celle-ci. L'albédo est exprimé en décimale et représente le pourcentage de réflexion; par exemple, une surface ayant un albédo de 0,15 réfléchit 15 % du rayonnement incident et en absorbe 85 %. Ainsi, un corps noir parfait qui absorbe l'ensemble de la radiation incidente possède un albédo nul tandis qu'une surface capable de réfléchir l'ensemble de la radiation incidente possède un albédo égal à l'unité.

Il est possible qu'une surface réfléchisse mieux certaines longueurs d'onde que d'autres. Ces surfaces sont dites sélectives, car elles ne réfléchissent pas l'ensemble du spectre de radiation solaire également. La plupart des surfaces présentent ce genre de comportement à différentes échelles, par contre les surfaces dites sélectives sont généralement celles qui réfléchissent mieux le rayonnement infrarouge que le rayonnement visible. Ces surfaces présentent donc une couleur

foncée, mais un albédo global élevé. Dans le cadre de ce projet, l'albédo est présenté sous la forme de l'intégration de la réflexion sur l'ensemble des longueurs d'onde du spectre solaire pondérée par l'intensité de chaque longueur d'onde pour le rayonnement solaire AM-1. Une étude approfondie des différentes façons de définir la réflectivité solaire d'une surface a permis de déterminer que l'albédo défini de cette façon constitue le meilleur paramètre afin d'obtenir les variations de température provenant de l'exposition à la radiation solaire (Levinson et coll. 2010).

Tel que présenté précédemment, le spectre du rayonnement solaire incident à une surface varie en fonction de l'angle du soleil et de la quantité de rayonnement direct et diffus. L'albédo d'une surface sélective varie donc durant la journée en raison de la variation du contenu spectral du rayonnement solaire incident à la surface dû à l'angle d'incidence du soleil. De plus, les revêtements routiers présentent une texture de surface très rugueuse créant des zones ombragées à la surface du revêtement. Comme la quantité d'ombre à la surface varie en fonction de l'angle du soleil, l'albédo varie aussi durant la journée en raison de la texture de la surface du revêtement.

Un revêtement à albédo élevé est donc un revêtement routier capable de réfléchir une quantité plus importante de la radiation incidente que les revêtements conventionnels.

2.2.2 Type de revêtement à albédo élevé

Il existe plusieurs types de revêtements à albédo élevé. Ceux-ci ne sont pas tous adaptés au contexte nordique. Cette section décrira les différents types de revêtements à albédo élevé et comment les revêtements routiers conventionnels peuvent être adaptés pour présenter un albédo plus élevé.

Revêtement de béton de ciment

Les revêtements routiers en béton de ciment présentent généralement un albédo élevé. Leur albédo varie en fonction de la composition du béton, notamment en fonction du type de granulats utilisés qui sont exposés progressivement lorsque le revêtement s'use par abrasion (Levinson et Akbari, 2001). Il est aussi possible d'ajouter des additifs comme des scories ou des cendres volantes à la composition du ciment afin de modifier la couleur du ciment et augmenter davantage la réflectivité du béton. (Cool Pavement Report, 2005) Les revêtements en béton de ciment peuvent prendre la forme de dalles épaisses, de couche mince de surface ou de béton compacté au rouleau. (Cool Pavement Report, 2005) Toutes ces technologies sont peu adaptées au contexte nordique en raison de l'équipement important nécessaire à leur mise en place et à la quantité de matériau nécessaire à leur fabrication. L'albédo d'un revêtement de béton de ciment diminue généralement avec l'âge en raison des traces laissées par les roues des véhicules et à l'exposition progressive des granulats.

Enrobé bitumineux

Les enrobés bitumineux standards présentent un albédo très bas en raison de la couleur très foncée du bitume servant de liant. Il est possible d'augmenter leur albédo en adaptant leur composition et leur technique de mise en place. Les granulats utilisés pour fabriquer un enrobé bitumineux ont généralement un albédo supérieur au bitume. En exposant ces granulats, il est donc possible d'obtenir un revêtement ayant un albédo plus élevé. Cette exposition peut être le résultat de l'abrasion normal du film de bitume à la surface des granulats dû aux effets du trafic routier. Il est aussi possible d'accélérer cette dégradation en pulvérisant un jet abrasif à la surface de l'enrobé suite à sa mise en place (Cool Pavement Report, 2005). L'utilisation de granulats clairs favorise une meilleure réflectivité solaire. Si une source de granulats clairs se trouve à proximité du site de construction, les coûts supplémentaires sont presque nuls; s'il est nécessaire de transporter des granulats sur une grande distance, les coûts de transport deviennent rapidement prohibitifs.

Plusieurs liants ont été développés afin de remplacer le bitume dans la fabrication d'enrobés bitumineux. Ces liants peuvent être transparents ou pigmentés ce qui permet d'obtenir un enrobé présentant un albédo plus élevé. Le coût de ce type de liant est très élevé, c'est pourquoi leur utilisation se limite à des projets très particuliers et ponctuels.

Les enrobés bitumineux sont généralement peu utilisés sur les routes nordiques, car les sites de construction routière sont généralement trop éloignés des principales villes où se trouvent les usines d'enrobé bitumineux. Ils sont parfois utilisés dans les villes et villages nordiques.

Traitement bitumineux de surface

Le traitement bitumineux de surface est un revêtement fréquemment utilisé sur les routes nordiques. Ce procédé consiste à créer une couche de roulement en appliquant du bitume émulsifié à la surface d'une couche de granulat compactée, des granulats sont ensuite saupoudrés sur le bitume et le passage d'un rouleau compacteur assure par la suite que les granulats adhèrent bien au film de bitume. Il est possible d'appliquer une ou deux couches de traitement de surface. Cette technique a pour avantage d'améliorer grandement le confort au roulement des usagers tout en ayant un coût de mise en place limité. Comme il s'agit d'un revêtement capable de se déformer, le traitement bitumineux de surface permet de garder une surface de roulement sécuritaire suite à des déformations légères du remblai routier sur lequel il est appliqué. Les traitements de surface diminuent les problématiques liées à la poussière lors du passage des véhicules comme c'est le cas des routes de gravier.

Le traitement bitumineux de surface est un revêtement bien adapté aux routes à faibles volumes ne supportant pas de lourdes charges. Son utilisation en ville et particulièrement aux intersections

n'est pas recommandée, car la force de cisaillement provenant des pneus des véhicules lors des virages a pour effet de déloger les granulats ce qui entraîne une usure prématurée.

Le traitement bitumineux de surface neuf présente normalement un albédo légèrement plus élevé qu'un enrobé bitumineux neuf, car les agrégats de surface sont visibles dès sa mise en place. Comme l'albédo est fonction du type de granulats utilisés, les granulats clairs permettent d'augmenter l'albédo du revêtement. L'albédo d'un traitement de surface a tendance à diminuer avec l'âge. En effet, le bitume sous-jacent remonte vers la surface ce qui a pour effet de noircir la surface principalement vis-à-vis les sentiers de roues.

Enduit bitumineux superficiel

Les enduits bitumineux superficiels ou « chip and sand seals » sont des scellants de surface normalement utilisés pour colmater les revêtements existants. Leur mise en place est similaire aux traitements bitumineux de surface : une couche de liant est appliquée à la surface du revêtement existant, une couche de granulats ou de sable est ensuite appliquée en surface et les granulats sont compactés. En utilisant des granulats ou du sable ayant une couleur pâle, il est possible d'obtenir un revêtement à albédo élevé (Tran et coll., 2009). Ce type d'enduit peut parfois poser des problèmes pour les routes à trafic élevé.

Enrobé coulé à froid

Les enrobés coulés à froid ou « microsurfacing » sont des revêtements généralement appliqués sur des revêtements neufs ou existants. Il s'agit d'un enrobé composé d'un liant bitumineux émulsifié et de granulats qui sont mélangés et ensuite mis en place à l'aide d'un guide qui distribue l'enrobé à la surface du revêtement selon le taux de pose déterminé. Il est possible d'obtenir un revêtement à albédo élevé en utilisant un liant et des granulats pâles (Tran et coll., 2009).

Peinture ou enduit superficiel

Les peintures ou enduits superficiels permettent de traiter des revêtements neufs ou existants afin d'en augmenter leur albédo. Ces peintures permettent de traiter des endroits ponctuels aussi bien que de l'ensemble d'un revêtement. Du sable ou de petits granulats sont parfois ajoutés à ces peintures afin de les rendre plus adhérentes et plus sécuritaires. Comme la quantité de matériau utilisé est plus petite que pour la plupart des autres solutions décrites précédemment, les enduits représentent une solution intéressante pour les endroits éloignés où le transport de matériau peut faire augmenter considérablement les coûts de construction. Il est aussi généralement assez simple d'en faire la mise en place à l'aide d'outils manuels. Ces enduits peuvent être à base de bitume, de résines d'acrylique ou de polymères d'époxy. Il est parfois possible de modifier la

pigmentation de ces enduits pour obtenir la couleur et la réflectivité désirée. Un grand nombre de produits sont disponibles sur le marché, ceux-ci sont généralement conçus pour des usages à faible trafic comme des stationnements ou des pistes cyclables. Leur durabilité n'est donc pas garantie pour un niveau de trafic plus important.

Perfect Cool de Nippo Corporation (Iwama et coll., 2011)

La compagnie japonaise Nippo a développé une gamme d'enduit superficiel à albédo élevé. Ces enduits ont la particularité d'avoir une réflexion importante dans le spectre infrarouge tout en gardant une réflexion basse dans le spectre visible. La figure 2.10 présente le spectre de réflexion de l'enduit de Nippo en comparaison à un enrobé bitumineux standard et à une peinture grise. Ainsi, l'albédo de ce produit est relativement élevé (0,44 à 0,51) tout en gardant une couleur foncée ce qui est préférable pour les utilisations routières. Il est possible de pigmenter ce produit afin de lui donner la couleur désirée. Ce produit a été développé principalement afin de lutter contre le phénomène des îlots de chaleur urbain, mais son utilisation assez répandue au Japon permet de croire que cette technologie pourrait facilement être adaptée au contexte nordique.

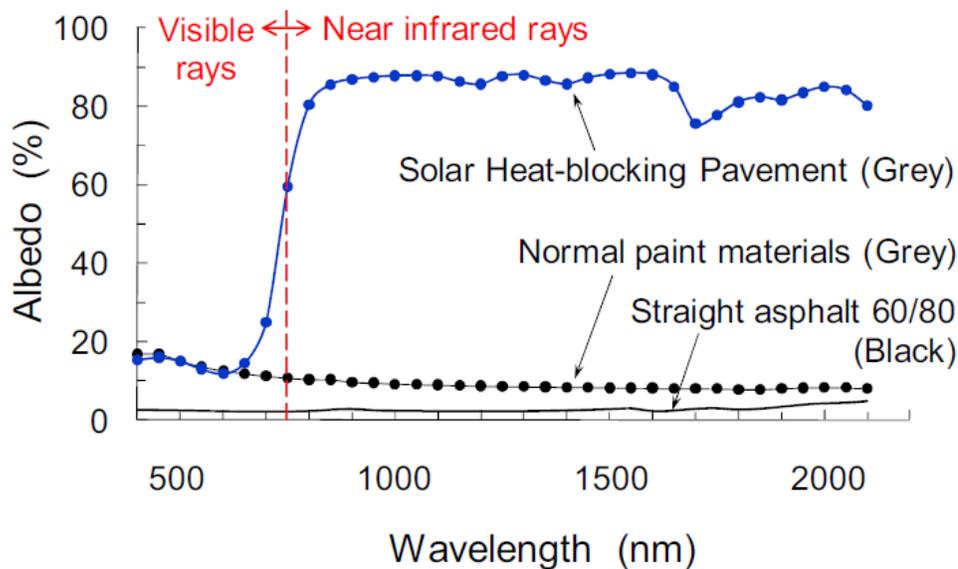


Figure 2.10: Réflectivité spectrale du Perfect Cool (Iwama et coll., 2011)

De fines particules creuses de céramique peuvent être ajoutées à l'enduit afin d'en augmenter la réflectivité directe. Une schématisation du concept des revêtements de Nippo est présentée à la figure 2.11. Ces particules ont la particularité de réfléchir de manière diffuse le rayonnement incident, ainsi la réflexion n'aveugle pas les usagers de la route. L'efficacité des particules de céramiques à diminuer les températures de surface n'a pas pu être confirmée en laboratoire.

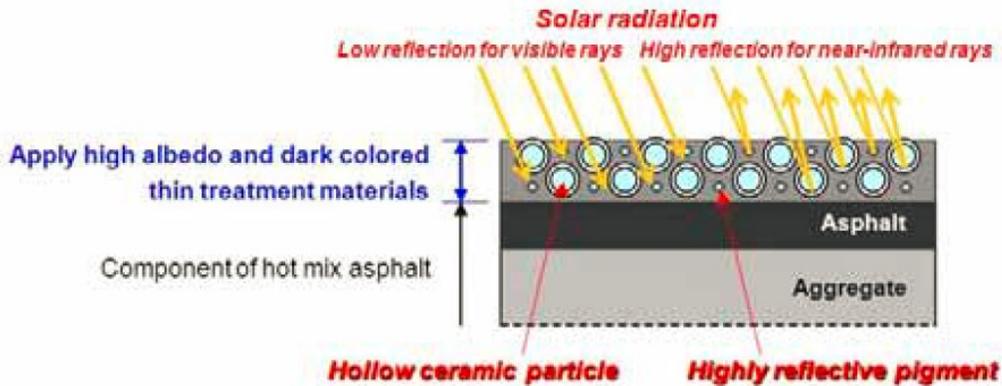


Figure 2.11: Schématisation du principe de fonctionnement de l'enduit de Nippo (Iwama et coll., 2011)

L'enduit Perfect Cool est disponible en trois versions : A, AP et M. Les versions A et AP sont destinés à des trafics légers et sont à base de résines acryliques. Ces enduits sont disponibles pré mélangés et peuvent être appliqués à l'aide d'un balai. L'enduit peut aussi être appliqué à l'aide d'un fusil à peinture pour un contrôle plus efficace du taux de pose. Il est possible de conserver ces produits pour une longue période de temps. La version M est quant à elle à base de résine MMA. Il s'agit d'un produit ayant une grande durabilité. Il s'agit d'un produit plus difficile à manipuler. Il doit être appliqué à l'aide d'un fusil à peinture capable de mélanger les deux composantes de la résine simultanément durant l'installation.

Des études menées par Nippo démontrent que l'enduit Perfect Cool permet de réduire les températures de surface efficacement. La figure 2.12 montre un graphique comparant les températures de surfaces d'un enrobé conventionnel et du Perfect Cool.

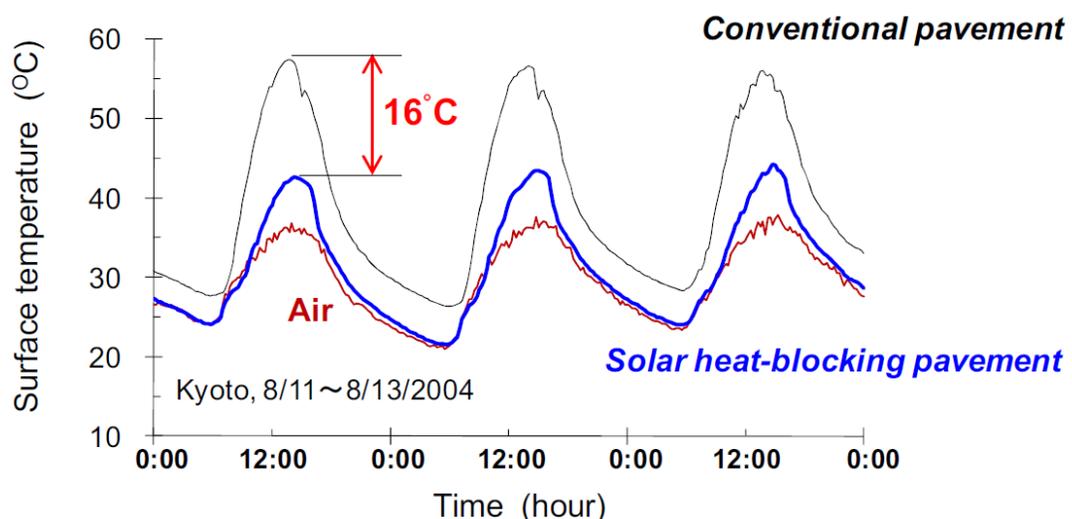


Figure 2.12: Effet de l'enduit de Nippo sur les températures du surface (Iwama et collé, 2011)

Grey Asphalt (Emery et coll., 2013)

Le Grey Asphalt est un enrobé bitumineux standard qui suite au compactage final de la couche de surface est saupoudré en surface de chaux hydratée selon un taux de pose de 100 à 150 g/m². La chaux hydratée adhère donc au bitume se trouvant à la surface du revêtement. Un rouleau compacteur à roues non ballasté peut être utilisé afin de faire pénétrer la chaux en surface. L'excédent de chaux est ensuite balayé. La chaux a pour effet de blanchir la surface et d'augmenter l'albédo. Le coût d'application de la chaux hydratée est relativement bas. L'évolution des températures de surface en fonction du temps pour différents taux d'application de la chaux hydratée est présentée à la figure 2.13 et démontre l'efficacité des surfaces traitées à la chaux hydratée. Le « Grey Asphalt » présente un albédo d'environ 0,35.

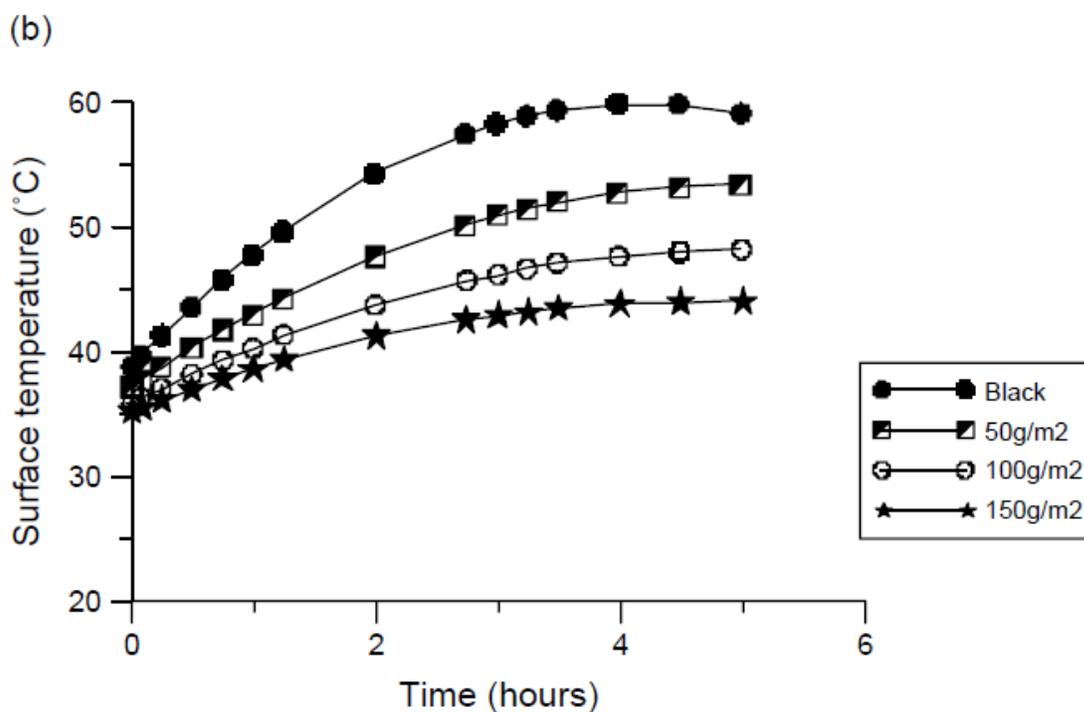


Figure 2.13: Évolution des températures de surface pour différents taux de pose de chaux hydratée (Emery et coll., 2013)

Autres revêtements « frais »

La réduction de l'albédo n'est pas le seul mécanisme permettant de réduire la température d'un revêtement routier. Par exemple, un revêtement composé d'une couche d'asphalte caoutchouté posée sur une base de béton de ciment permet un refroidissement par radiation durant la nuit. De plus, les revêtements perméables permettent à l'eau de s'infiltrer sous la surface. Un refroidissement provient de l'évaporation de l'eau et de la convection lorsque le revêtement est sec. Ces solutions ne sont pas adaptées aux conditions nordiques (Cool Pavement Report, 2005).

2.2.3 Utilisations nordiques des revêtements à albédo élevé

Bien que les utilisations nordiques à grande échelle des revêtements à albédo élevé soient peu nombreuses, plusieurs sections d'essai ont été réalisées afin d'évaluer leur efficacité. Celles-ci ont permis de vérifier l'efficacité des surfaces à albédo élevé à atténuer la fonte du pergélisol et de déterminer les problèmes techniques liés à leur utilisation.

Base aérienne de Thule, Groenland (Bjella, 2013)

À la fin des années 1950, un programme de recouvrement du terrain d'aviation de la base militaire de Thule au Groenland par de la peinture blanche a été initié afin de prévenir la fonte du pergélisol riche en glace sous-jacent. La base de Thule se trouve à une latitude de 76.53° Nord. Entre les années 1953 et 2011, la température annuelle moyenne de l'air est de -11 °C avec un indice de dégel de 428 °C*jour et un indice de gel de 4414 °C*jour. La profondeur de dégel est de 1,8 mètre sous le revêtement noir et de 1,2 mètre sous la peinture blanche. L'ensemble des infrastructures revêtues est recouvert de peinture telle qu'illustrée à la figure 2.14 et les surfaces sont peinturées aux 5 ans.



Figure 2.14 : Vue aérienne de la piste d'atterrissage de Thule en 1989 (Schading, 1989)

L'application fréquente de peinture a eu pour effet de lisser la micro texture du revêtement entraînant une diminution de la friction disponible pour le freinage en raison de l'aquaplanage suite aux épisodes de pluie durant l'été et du givre de surface durant l'hiver. Afin de libérer la piste du givre de surface, la surface est balayée quotidiennement, résultant en une dégradation importante de la peinture. La peinture représente donc un problème logistique important et engendre des coûts d'entretien substantiels.

En juillet 2011, l'albédo de quelques sections représentant bien les différents niveaux de dégradation de la peinture blanche a été mesuré. Aux mêmes endroits, la profondeur de dégel a été mesurée à l'aide d'un géoradar. La figure 2.15 présente l'albédo mesuré en fonction de la profondeur de dégel sous le revêtement. Lorsque la peinture blanche est en parfaite condition, celle-ci contribue à réduire la profondeur de la pénétration du dégel de plus de 2,5 pieds par rapport à une surface non recouverte. L'albédo de la surface diminue rapidement en raison de la dégradation de la peinture.

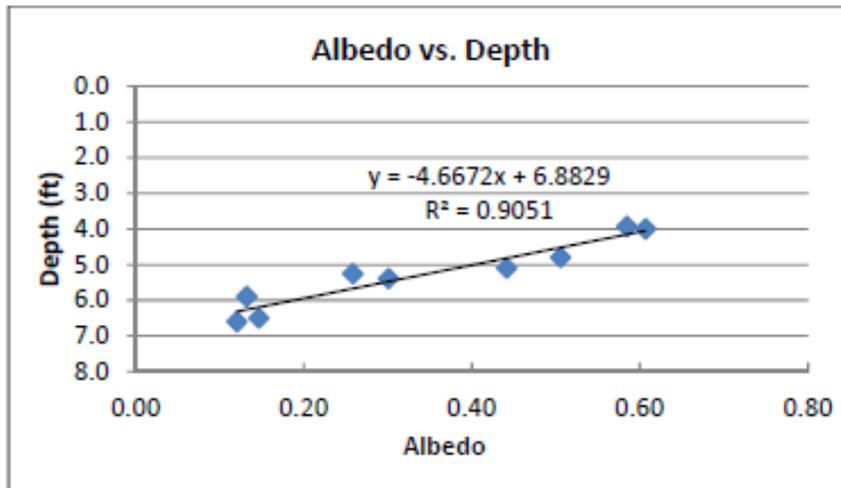


Figure 2.15 : Profondeur de dégel sous le revêtement en fonction de l'albédo de surface (Bjella, 2013)

À partir de 2008, une nouvelle technique d'application de la couleur blanche a commencé à être utilisée. Le revêtement a d'abord été fraisé afin de lui redonner la micro texture perdue en raison des applications répétées de peinture. Ensuite, la peinture a été remplacée par un lait de chaux appliqué en minces couches. Comme cette application s'est déroulée à la fin de l'été, l'ensemble du lait de chaux avait été décapé avant le début de l'été suivant en raison des passages des balais.

En 2013, le programme de peinture de Thule a été abandonné. Il n'était pas nécessaire de peindre l'ensemble de la piste, car seulement 18 % de celle-ci nécessitait des mesures d'atténuation de la fonte alors que moins de 2 % de celle-ci nécessitait des mesures d'intervention continues. L'installation localisée d'isolant lors de la reconstruction de la piste a remplacé l'utilisation de la peinture blanche.

Fairbanks, Alaska 1965

En 1965, une section d'essai utilisant de la peinture blanche a été effectuée à Fairbanks en Alaska. Une réduction de la pénétration du dégel de 30 % (3,5 pieds) y a été observée. Il s'agit d'une réduction similaire à celle observée à Thule. Deux études théoriques ont démontré que cette

réduction concorde avec les valeurs attendues en les évaluant à l'aide de l'équation modifiée de Berggren et du bilan d'énergie à la surface du sol. (Berg et Quinn, 1976, Miller, 1975)

Alaska Department of Transportation and Public Facilities – Alaska 1972 à 1985

L'ADOTPF of Alaska a produit un rapport (1985) effectuant une évaluation empirique de l'efficacité des surfaces à albédo élevé afin de réduire le tassement sous les remblais routiers et de l'efficacité économique d'une telle mesure. Les effets de la peinture sur la circulation routière ont aussi été étudiés. En plus des données d'études précédentes, cinq sections ont été instrumentées pour une durée de deux ans. Celles-ci se trouvent entre Fairbanks et Delta Junction en Alaska; il s'agit de deux sites à Johnson Road, d'un site à Shaw Creek et d'un site à Canyon Creek. L'efficacité des sections peinturées est évaluée en comparant le tassement sous chacune des sections.

Il est difficile d'analyser les résultats obtenus dans cette étude, car le tassement au dégel est fonction des propriétés du sol en place. La peinture blanche permet de réduire efficacement le tassement au dégel. Pour une période de 10 mois, la section peinturée de Johnson Road s'est affaissée de 40 % de moins que la section contrôle. Par contre, le tassement de la section peinturée est tout de même substantiel et a nécessité une réfection importante. La peinture a eu pour effet de ralentir la fonte. Pour la section de Canyon Creek les résultats sont très concluants comme le démontre la figure 2.16 indiquant que le flux de chaleur transmis au sol diminue significativement immédiatement suite à la pose de la peinture.

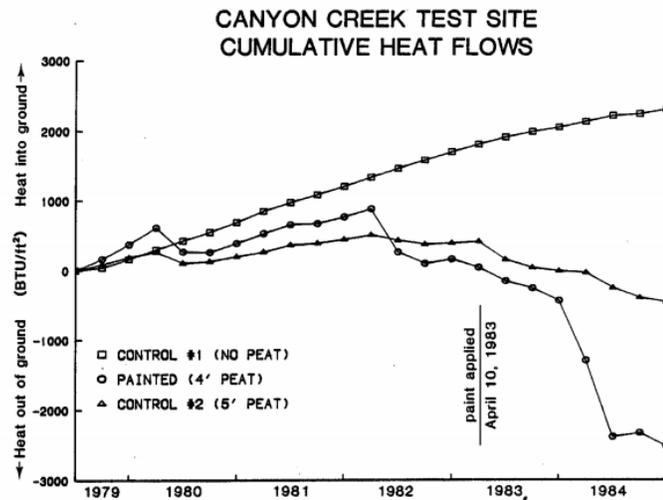


Figure 2.16 : Flux de chaleur cumulé au sol d'infrastructure (ADOTPF, 1985)

L'analyse des résultats a permis de déterminer que le tassement au dégel peut être réduit de manière significative suite à l'utilisation de peinture blanche ayant un albédo plus élevé. Les températures en profondeur sont significativement plus froides sous ces surfaces. Par contre, les coûts de l'utilisation de peinture sont potentiellement plus élevés que les coûts engendrés par la réparation de routes suite au tassement au dégel. La peinture blanche peut être utilisée pour les

sections très localisées où les tassements sont très sévères. Les endroits où le trafic est très important nécessitent un entretien supplémentaire en raison de la dégradation de la peinture. L'absorption de chaleur par l'épaulement du remblai rend l'utilisation de peinture moins efficace pour les remblais moins larges, une analyse en deux dimensions du remblai routier est recommandée afin de valider l'efficacité des surfaces à albédo élevé. L'adhérence diminue fortement suite à l'utilisation de peinture. De plus, du givrage localisé se produit en raison des températures superficielles plus froides des sections peinturées. Pour les endroits où le sol est riche en glace près de la surface, la peinture contribue seulement à ralentir la fonte. L'utilisation de peinture est plus favorable pour les endroits problématiques ponctuels que pour traiter l'ensemble d'une infrastructure.

Sur la figure 2.17, il est possible de constater que même 30 ans après l'installation de la surface réfléchissante, la section peinturée demeure dans un état acceptable alors que la section témoin présente une dégradation importante.

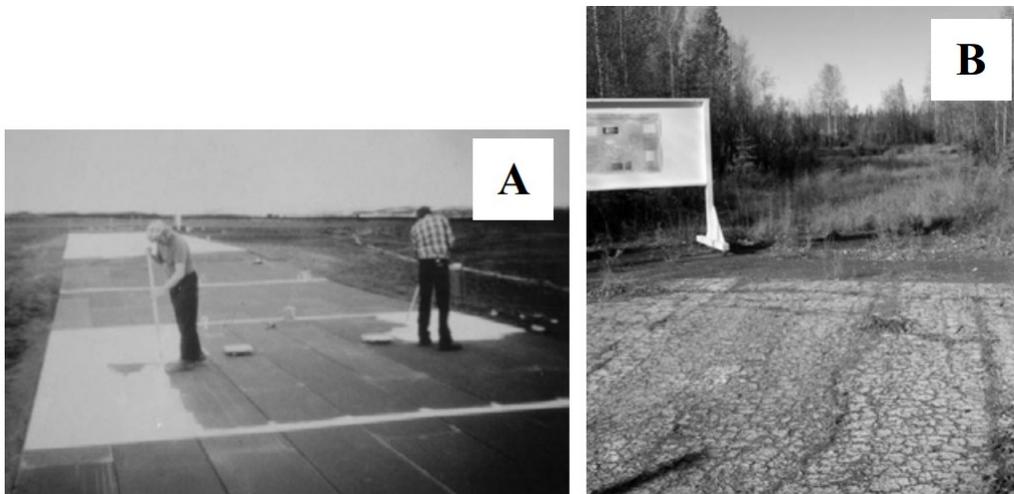


Figure 2.17 : Section d'essai près de Fairbanks durant l'application de la peinture à gauche et après 30 ans à droite (Beaulac et Doré, 2006)

Peger Road – Fairbanks, Alaska 1982 (Berg, 1985)

D'avril 1982 à octobre 1983, sept sections ont été installées afin de mesurer leur température superficielle à Peger Road à Fairbanks: une section d'asphalte, une recouverte de peinture blanche, une recouverte de peinture jaune, une de traitement de surface utilisant des granulats blancs, une de traitement de surface utilisant des granulats brun foncé et deux sections de traitement de surface utilisant des granulats gris de différentes granulométries. Ces sections ont permis d'évaluer l'effet de la couleur et de la texture sur les températures superficielles du revêtement. Les données récoltées à ces sections d'essai incluent le rayonnement à ondes courtes incident et réfléchi, le rayonnement à ondes longues incident et réfléchi, la vitesse et la direction du

vent et l'albédo des surfaces. La circulation sur la route Peger Roads est importante et l'effet du trafic sur l'usure des surfaces et sur la convection forcée a pu y être évalué. En plus de données de Peger Roads, les données d'un site autoroutier de l'Alaska (Berg et Aitken, 1973) et d'une étude précédente (Fulwider et Aitken, 1963) ont été utilisées pour l'analyse.

Suite au premier hiver, les traitements de surface et les sections peinturés avaient subi une dégradation importante en raison de l'abrasion provenant des pneus à clous et des pneus à chaînes et ont dû être réparés.

Les données de températures superficielles ont permis de déterminer que la radiation solaire avait un effet direct sur les températures superficielles. Ainsi, lorsque le couvert nuageux est plus important, la radiation solaire est plus basse et l'augmentation de température durant le jour est moins importante. Aussi, lors du passage momentané de nuages au courant de la journée, la radiation solaire incidente diminue et les températures superficielles aussi.

La granulométrie et la couleur des granulats utilisés pour le traitement de surface semblent avoir un effet sur la température superficielle. En effet, la figure 2.18 montre que la température superficielle augmente lorsque le D_{80} diminue et lorsque les granulats sont plus foncés.

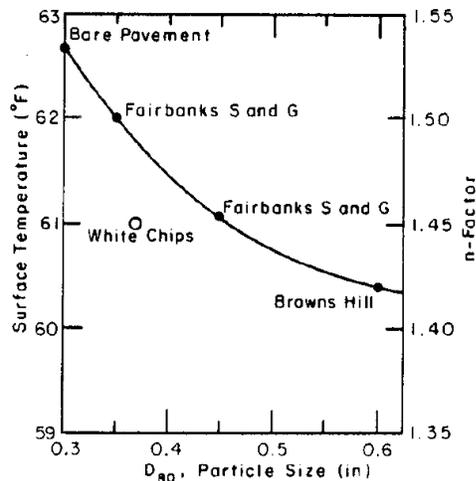


Figure 2.18 : Effet de la granulométrie des granulats utilisés pour le traitement de surface sur les températures superficielles (Berg, 1985)

Les données de températures démontrent aussi l'efficacité de la peinture blanche et jaune à réduire les températures superficielles.

De plus, il semble y avoir un effet du trafic sur les températures superficielles. La figure 2.19 présente un graphique montrant une diminution du facteur n lorsque le trafic journalier augmente.

Selon Berg, le passage des véhicules entraîne une convection forcée supplémentaire à la surface du revêtement ce qui contribue à réduire la température de surface.

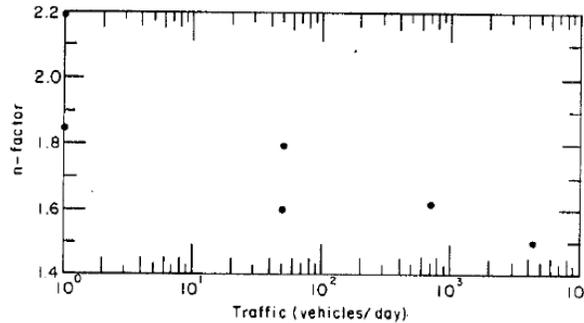


Figure 2.19 : Effet du volume de trafic sur le facteur n de la surface (Berg, 1985)

L'effet de l'albédo sur le facteur n a encore une fois été démontré. La figure 2.20 présente cette relation et semble suggérer que celle-ci est propre au site étudié. En effet, le couvert nuageux est significativement différent entre les deux sites ce qui affecte la radiation incidente et donc les températures superficielles. Les facteurs n de dégel présentés à la figure 2.20 ne sont pas ceux de la période complète de dégel.

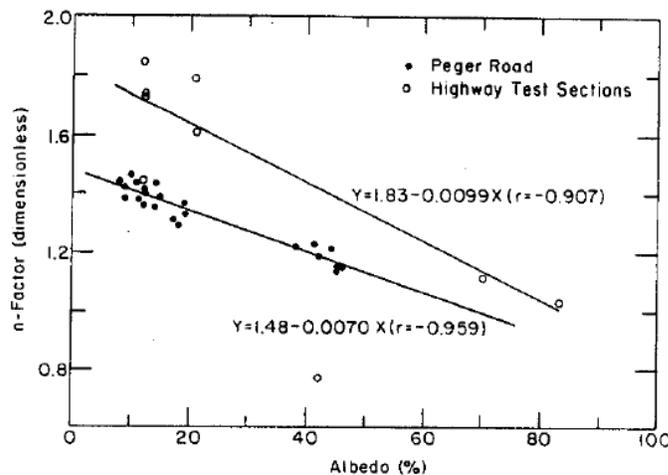


Figure 2.20 Influence de l'albédo sur le facteur n de dégel de surface (Berg, 1985)

Les données récoltées ont permis d'effectuer un bilan d'énergie à la surface du revêtement afin d'obtenir des relations linéaires entre l'albédo et le facteur n. Les relations obtenues ne sont pas valides pour la période de dégel complète, car Berg utilise des données quotidiennes pour quelques jours de l'année seulement.

Enfin, Berg indique qu'afin d'obtenir un rendement maximal des surfaces peinturées il faudrait peindre celles-ci annuellement immédiatement lorsque les surfaces sont découvertes de neige afin de pallier l'usure hivernale.

Piste d'atterrissage – Barrow, Alaska 1984

La piste d'atterrissage de Barrow en Alaska a été peinte en blanc durant l'été de 1984. Plusieurs pilotes ont déploré la chaussée très glissante même si du sable a été saupoudré sur la peinture avant qu'elle ne sèche afin d'en améliorer la texture de surface (Urbach tel que cité par Reckard, 1985).

Aéroport de Kangerlussuaq, Groenland 2000 (Jorgensen et Ingeman-Nielsen, 2008)

À l'automne 2000, trois sections carrées de 26 mètres de côté de peintures blanches ont été installées à l'aéroport de Kangerlussuaq au Groenland. À l'aide d'un relevé de géoradar, la profondeur de dégel sous ces planches d'essai a été déterminée. Les résultats de ce relevé sont illustrés à la figure 2.21. La figure 2.22 présente la position du front de dégel sous l'asphalte et sous la peinture blanche durant la période de dégel. La différence maximale entre le front de dégel sous la plaque de peinture blanche et le revêtement noir est de 0,9 mètre lorsque la pénétration du dégel est maximale un peu plus de 160 jours après le 1^{er} mai. Ces données démontrent clairement que les surfaces à albédo élevé sont en mesure de diminuer la profondeur de pénétration du dégel sous une surface revêtue.

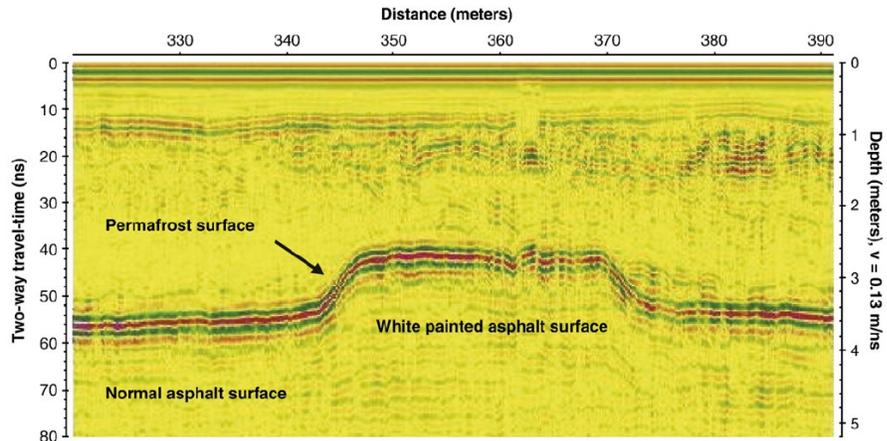


Fig. 5. Radargram showing the variations in the depth to the permafrost surface.

Figure 2.21 : Relevé de géoradar sous une surface peinte en blanc (Jorgensen et Ingeman-Nielsen, 2008)

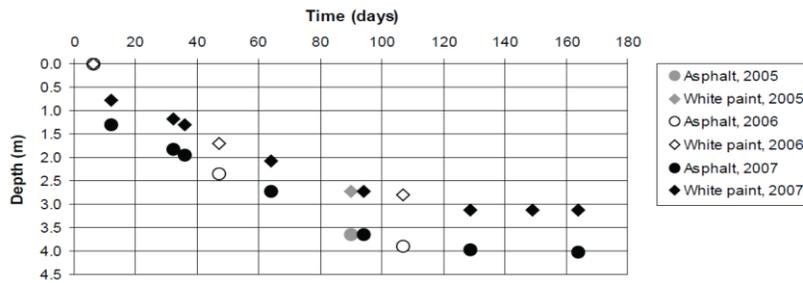


Figure 2.22 : Pénétration du dégel sous les revêtements (Jorgensen et Ingeman-Nielsen, 2008)

Projets de l'Université Laval, 2006

Dans le cadre d'un projet de maîtrise à l'Université Laval, quelques produits à albédo élevé ont été testés au site expérimental routier de l'université Laval (SERUL) à la Forêt Montmorency près de Québec (Beaulac et Doré, 2006). Six sections ont été installées et instrumentées de thermistances. Une différence de température atteignant 9 °C a été observée entre le produit ayant l'albédo le plus élevé et la surface de référence en enrobé bitumineux. Cette section d'essai avait été réalisée en prévision d'une l'installation à Salluit en juillet 2006.

Par la suite, une section d'essai de revêtement à albédo élevé a été réalisée à Salluit au Nunavik en juillet 2006 (Voyer, 2009). Cette section est illustrée à la figure 2.23. Le matériau utilisé comme surface réfléchissante est un coulis à base de ciment. Le coulis a été appliqué en deux couches afin d'éviter l'écaillage. Trois sections ont été réalisées pour vérifier l'efficacité de la surface seule, de la surface combinée à un drain thermique et de la surface combinée à un remblai à convection. En raison d'une dégradation prématurée des surfaces due à la présence d'huile sur la chaussée lors de l'installation, peu de données sont disponibles. Il n'a donc pas été possible de déterminer l'efficacité des surfaces réfléchissantes combinées au drain thermique et au remblai à convection. La surface réfléchissante seule semble avoir eu un effet de refroidissement sur la couche supérieure du remblai.



Figure 2.23 : Planche d'essai de Salluit (Voyer, 2009)

Front Street - Dawson City, Yukon 2008

En 2008, le gouvernement du Yukon a entrepris de revêtir la Front Street à Dawson City (Walsh et coll., 2009). Le traitement bitumineux de surface utilisé jusqu'alors offrait une performance inadéquate aux charges particulières des autobus touristiques et des véhicules récréatifs. De plus, les réfections fréquentes engendraient un problème de poussière pour les commerces. Comme Dawson City représente un héritage historique important, l'utilisation d'un revêtement en enrobé bitumineux noir a été écartée, car il ne respectait pas le caractère historique de la ville. De plus, comme la Front Street est supportée par un sol riche en glace, il a été jugé judicieux d'utiliser un

revêtement absorbant moins de chaleur qu'un enrobé bitumineux. L'option retenue a été l'utilisation d'un enrobé ayant un liant coloré. Ce type de revêtement permet de satisfaire toutes les contraintes associées au projet en offrant des performances comparables aux enrobés bitumineux en plus de présenter une couleur se mariant bien aux rues en gravier de Dawson City et de présenter un albédo élevé. Le coût de mise en place des enrobés colorés est très élevé en raison du coût du liant synthétique se chiffrant à 6000 \$/tonne en comparaison au liant d'asphalte standard de 1120 \$/tonne. Le coût unitaire d'une tonne de bitume est de l'ordre de 100\$ dans le sud du Québec (Bergeron, 2014). La performance thermique de l'enrobé coloré est suivi à l'aide de thermistances posées sous la route et de câbles à impédance électrique. La figure 2.24 présente une photographie de la Front Street à Dawson City.



Figure 2.24 : Vue aérienne de la Front Street (Walsh et coll., 2009)

Traitement de surface à granulats clairs – Beaver Creek, Yukon 2008

En avril 2008, douze sections expérimentales ont été construites sur l'Alaska Highway près de Beaver Creek afin d'évaluer les différentes techniques de mitigation de la fonte sous les remblais routiers. Une de ces sections est un traitement bitumineux de surface utilisant des granulats clairs. Une série de thermistance installée au centre de la route a permis de déterminer que l'apport de chaleur au sol naturel est significativement réduit pour la section de granulats clairs par rapport à la section de traitement de surface standard. (M-Lepage et coll., 2012)

2.2.4 Lutte aux ilots de chaleur urbains et autres bénéfices des revêtements à albédo élevé

Les revêtements à albédo élevé peuvent être utilisés afin de contrer le phénomène des ilots de chaleur urbains. Bien que les contraintes liées au climat et au type de trafic soient très différentes que pour les utilisations en contexte nordique, il est possible de tirer certaines conclusions de l'utilisation de surfaces réfléchissantes en milieux urbains. Cependant, les utilisations urbaines ont pour but de réduire la température de l'air ambiant, alors que les utilisations nordiques cherchent à diminuer les températures de surface. Ainsi, les températures superficielles sont rarement

mesurées à long terme lors de l'étude des surfaces à albédo élevé destinées aux utilisations urbaines.

Dans les grandes villes d'Amérique du Nord, la portion du sol recouverte de revêtements routiers représente environ 30 à 45 % (Rose et coll., 2003, Akbari et Rose, 1999, et Akbari et Rose, 2001). Modifier l'albédo de ces revêtements représente donc un énorme potentiel afin de diminuer les températures en ville. La température des enrobés bitumineux communément utilisés au Québec peut atteindre des températures de pointe de 48 à 67 °C (Pomerantz et coll., 2000). Cette chaleur est absorbée par la chaussée et réémise dans l'air durant la nuit ce qui a pour effet d'augmenter la température de l'air ambiant. Certains chercheurs estiment qu'une augmentation d'albédo de 0,10 permettrait de diminuer la température moyenne de surface d'environ 4 °C. De plus, il serait possible de réduire la température moyenne d'une ville de 0,6 °C en augmentant l'albédo de l'ensemble des revêtements routier d'une valeur à 0,10 à une valeur de 0,35 (Pomerantz et coll., 2000). Les bénéfices monétaires liés à une réduction de température de cet ordre dans une ville de la grandeur de Los Angeles pourraient se chiffrer à quelque 90 millions de dollars américains par année. Ces bénéfices se matérialisent principalement sous la forme d'économies relatives à la réduction du smog et aux économies d'énergie liée à l'utilisation de climatisation (Rosenfeld et coll., 1998). De plus, il y a plusieurs effets bénéfiques sur la santé des habitants des villes et de leur confort général.

Plusieurs autres bénéfices sont liés à l'utilisation de revêtement à albédo élevé particulièrement pour les utilisations urbaines notamment une meilleure performance des enrobés bitumineux, une amélioration de la qualité des eaux de ruissellement et une meilleure sécurité routière

Comportement mécanique des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux présentent un meilleur comportement en fluage lorsque leur température est réduite ce qui a pour effet de ralentir l'apparition d'ornières et d'allonger leur durée de vie surtout pour les chaussées sollicitées par les charges lourdes. De plus, en réduisant les températures maximales éprouvées par le revêtement bitumineux, il est possible de réduire l'écart entre les températures maximales et les températures minimales du revêtement ce qui pourrait entraîner des économies pour la construction de routes grâce à l'utilisation de bitume moins coûteux.

Eaux de ruissellement

Les températures de surface moindre des revêtements à albédo élevé diminuent la température des eaux de ruissellement de l'ordre de 2 à 4 °C ce qui a pour effet de diminuer le choc thermique lors de leur rejet dans les cours d'eau naturels (James, 2002).

Sécurité routière

En colorant les revêtements routiers, il est possible de délimiter des zones sur la chaussée. Par exemple, il serait possible de délimiter les voies cyclables et les traverses piétonnières en rouge afin d’alerter les automobilistes à la présence de cyclistes et de piétons. Ces techniques ont prouvé leur efficacité lors de leurs utilisations à plusieurs endroits dans le monde (St-Jacques et Brosseaud, 2013). De plus, ces surfaces plus claires nécessitent moins d’éclairage la nuit et offrent une meilleure visibilité aux usagers de la route.

2.3 Principaux modes de transfert de chaleur

Il convient d’introduire maintenant les principaux modes de transfert de chaleur qui influence le bilan thermique à la surface d’un revêtement routier. Ces modes de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et la radiation.

2.3.1 Conduction

La conduction est le principal mode de transfert de chaleur au sein d’un sol. Il s’agit d’un transfert d’énergie des particules ayant plus d’énergie vers les particules voisines ayant moins d’énergie (Thirumaleshwar, 2009). La conduction peut se produire aussi bien dans les solides que dans les liquides et les gaz. Le flux de transfert de chaleur par conduction est gouverné par la loi de Fourier représentée à la figure 2.25 et exprimé par l’équation 2.1.

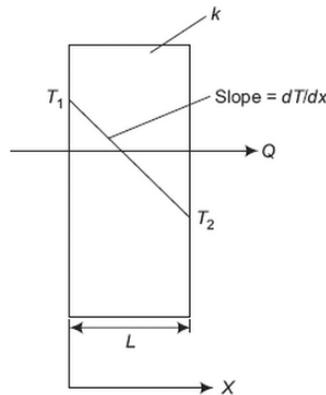


Figure 2.25: Schématisation de la conduction (Thirumaleshwar, 2009)

Équation 2.1: Loi de Fourier pour la conduction

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

Dans l’équation 2.1, q_x est le flux de conduction dans la direction de x , k , la conductivité thermique du solide et dT/dx , le gradient thermique dans la direction de x . La conductivité thermique d’un corps représente sa capacité de transmettre une quantité de chaleur par unité de temps lorsqu’il est soumis à un gradient thermique. Elle s’exprime généralement en $W/m^{\circ}C$.

2.3.2 Convection

La convection est un phénomène macroscopique de transfert de chaleur se produisant seulement dans les fluides (Thirumaleshwar, 2009). Il y a transfert de chaleur lorsqu'un fluide est en mouvement relatif par rapport à un corps ayant une température différente de celle du fluide. La convection libre se produit lorsque le mouvement du fluide provient de la différence de densité créée par le changement de température du fluide. La convection forcée quant à elle se produit lorsque le mouvement du fluide provient d'une force externe comme le vent. Le flux de transfert de chaleur par convection est représenté à la figure 2.26 et il est gouverné par la loi de Newton pour les fluides selon l'équation 2.2.

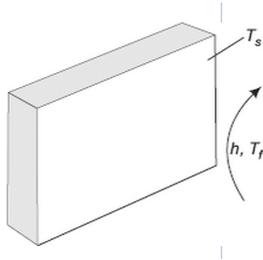


Figure 2.26: Schématisation de la convection entre un fluide et un corps (Thirumaleshwar, 2009)

Équation 2.2: Loi de Newton pour les fluides

$$q_c = h_c(T_{so} - T_f)$$

Dans l'équation 2.2, q_c est le flux de convection, h_c , le coefficient de convection, T_{so} , la température du solide et T_f la température du fluide.

Le coefficient de convection h_c n'est pas une propriété du solide ou du fluide. Il s'agit d'un paramètre complexe à déterminer, car il est fonction du type d'écoulement, de la géométrie et de l'orientation du solide, des propriétés thermiques du solide et de la température.

2.3.3 Radiation

Tous les corps dont la température est supérieure à 0 Kelvin émettent de la radiation sous la forme d'ondes électromagnétiques. La radiation émise par un corps est gouverné par l'équation 2.3.

Équation 2.3: Radiation émise par un corps

$$q_e = \varepsilon\sigma T^4$$

Dans l'équation 2.3, q_e est le flux de convection, ε , l'émissivité de la surface, σ , la constante de Stefan-Boltzmann dont la valeur est de $6,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ et T la température du corps en Kelvin. L'émissivité d'une surface est fonction de la température du corps et des propriétés de surface. Elle possède une valeur inférieure à l'unité.

2.4 Bilan de chaleur à la surface d'un revêtement routier

Afin de pouvoir modéliser adéquatement les températures superficielles d'un revêtement routier, il est important de comprendre le bilan d'énergie à sa surface.

L'équation 2.4 présente mathématiquement le bilan énergétique à la surface d'un revêtement routier (Berg, 1985). Les flux de chaleur de l'équation 2.4 sont exprimés en W/m².

Équation 2.4 : Bilan d'énergie à la surface d'un revêtement

$$0 = q_i - q_r + q_w - q_s + q_c + q_l + q_u + q_m + q_g + q_h$$

Avec,

q_i = radiation solaire incidente

q_r = radiation solaire réfléchie

q_w = radiation infrarouge émise par l'atmosphère

q_s = radiation infrarouge émise par la surface

q_c = convection

q_l = évaporation, condensation, sublimation et évapotranspiration

q_u = conduction vers l'air

q_m = précipitation

q_g = conduction vers le sol

q_h = infiltration d'humidité dans le sol

Comme la conductivité thermique de l'air est très petite, la conduction vers l'air est négligeable (Sellers, 1965). De plus, comme les revêtements routiers sont habituellement relativement imperméables, les échanges de chaleur provenant de l'infiltration d'eau peuvent être ignorés (Berg, 1985). Enfin, les revêtements routiers sont conçus afin d'évacuer l'eau rapidement afin d'assurer la sécurité des usagers. Ainsi, le temps nécessaire afin d'évacuer l'eau de la surface du revêtement n'est pas suffisant afin de permettre des échanges de chaleur significatifs entre la surface et l'eau de ruissellement par conduction. Aussi, l'eau qui ne ruisselle pas est en si faible quantité que l'apport de chaleur provenant de son évaporation est jugé négligeable (Berg, 1985, et Gui et coll., 2008). Enfin, les échanges de chaleur dus à la présence d'eau sur la chaussée sont très complexes à modéliser (Hermansson, 2004).

Le bilan d'énergie pour une surface revêtue peut donc être exprimé par l'équation 2.5 et schématisé par la figure 2.27 comprenant quatre flux de chaleur principaux : la radiation solaire, la radiation infrarouge, la convection et la conduction dans le sol.

Équation 2.5 : Bilan d'énergie simplifiée à la surface d'un revêtement

$$0 = q_s + q_e + q_c + q_g$$

Avec,

$$q_s = q_i - q_r$$

$$q_e = q_w - q_s$$

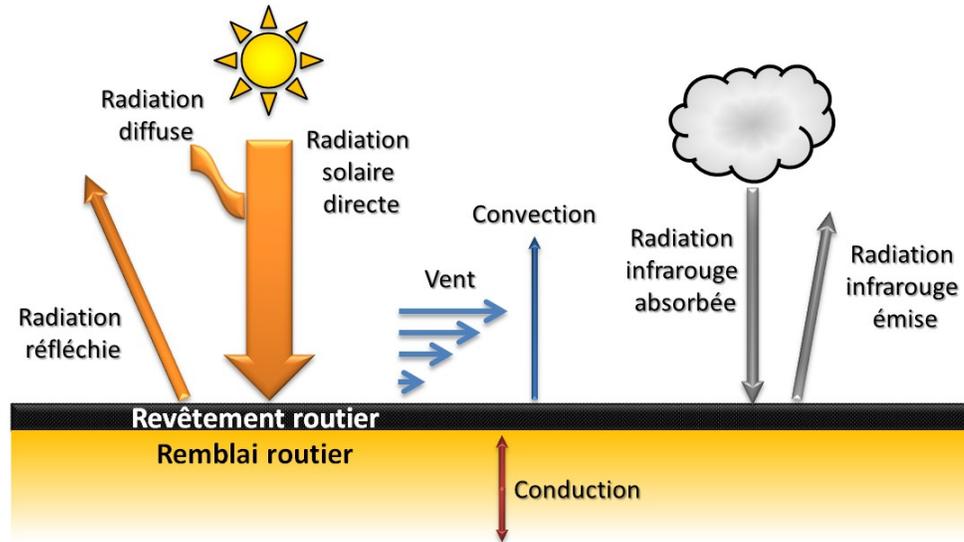


Figure 2.27 : Schématisation du bilan d'énergie simplifié à la surface d'un revêtement routier

Radiation solaire

Le flux de chaleur provenant de la radiation solaire peut s'exprimer à partir de la radiation solaire incidente et de l'albédo de la surface selon l'équation 2.6.

Équation 2.6 : Flux de chaleur dû à la radiation solaire

$$q_s = (1 - a)q_i$$

Avec,

$$a = \text{albédo}$$

Convection

La convection entre la surface et l'air s'exprime selon l'équation 2.7 à l'aide de la différence de température entre la surface et l'air ainsi qu'à l'aide d'un coefficient de convection qui prend en compte la convection forcée et la convection libre.

Équation 2.7 : Flux de chaleur dû à la convection

$$q_c = h_c(T_s - T_a)$$

Radiation infrarouge

Le flux de chaleur provenant du bilan entre la radiation infrarouge incidente à une surface et la radiation infrarouge émise par cette surface peut être exprimé par l'équation 2.8.

Équation 2.8 : Flux de chaleur dû à la radiation infrarouge

$$q_e = \sigma(\varepsilon_s T_s^4 - \varepsilon_{ciel} T_a^4)$$

Avec,

ε_s = émissivité de la surface

ε_{ciel} = émissivité du ciel

Conduction

La conduction au sein du sol sous le revêtement routier est fonction des paramètres thermiques des différents matériaux de remblais et du gradient thermique au sein du remblai et donc de la température de la surface et de la température des matériaux de remblais. Comme la température des matériaux de remblai est affectée par la capacité thermique de ceux-ci, il existe une inertie thermique et donc un facteur temps à prendre en considération dans l'analyse de la conduction. Il est donc hasardeux d'exprimer la conduction à l'aide d'une équation simple comme il est possible de le faire pour la radiation solaire, la convection et la radiation infrarouge.

2.5 Modèles de calcul des températures superficielles des revêtements routiers

Plusieurs modèles de calcul des températures de surface pour les revêtements routiers ont été proposés (Solaimanian et Kennedy 1993, Hermansson 2001, Hermansson 2004, Gui et al. 2008, Hall et al. 2012, Qin et al. 2013). Ces modèles sont souvent développés afin d'obtenir les températures maximales atteintes à l'intérieur d'un revêtement pour guider le dimensionnement thermique des enrobés bitumineux. Ils utilisent donc des données climatiques horaires. Leur utilisation est complexe et laborieuse en raison de l'utilisation de la résolution par éléments finis. Seul le modèle proposé par Hermansson (2004) inclut le calcul des températures durant la période hivernale. Ce modèle est une adaptation de celui proposé par Solaimanian et Kennedy (1993) afin de prendre en compte les particularités des conditions climatiques hivernales.

Le bilan d'énergie à la surface du revêtement routier présenté précédemment sert de base au modèle d'Hermansson. Les détails du modèle proposé par Hermansson seront décrits dans le chapitre 5 de ce document.

2.6 Paramètres d'ingénierie

Plusieurs paramètres d'ingénierie seront utilisés dans ce document, notamment l'indice de gel et de dégel, le facteur n et l'indice de radiation.

2.6.1 Indice de gel et de dégel

Les indices de gel et dégel permettent de décrire la sévérité du climat par rapport aux températures de l'air. L'indice de gel est la somme des températures quotidiennes inférieures à 0 °C en valeur absolue sur une période d'un an alors que l'indice de dégel est la somme des températures quotidiennes supérieures à 0 °C sur une période d'un an. La figure 2.28 illustre l'indice de gel et de dégel sur une période d'un an (Doré et Zubeck, 2004). L'indice de gel et de dégel s'exprime en °C*jour.

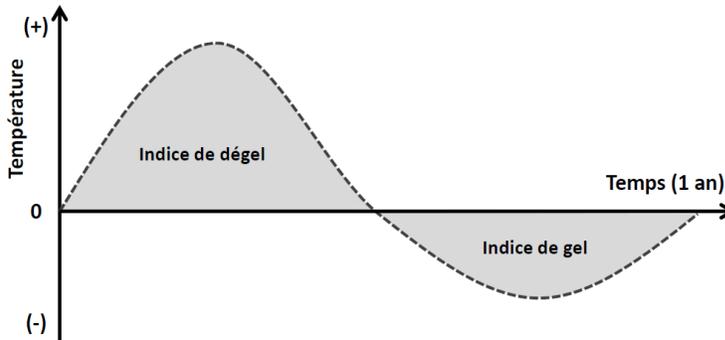


Figure 2.28: Schématisation de l'indice de gel et de dégel (Modifié de Doré et Zubeck, 2004)

Il est aussi possible d'utiliser les températures moyennes mensuelles pour définir les indices de gel et de dégel en les multipliant par le nombre de jours dans le mois. Comme la température de l'air est différente de la température de surface, il existe deux types d'indice : l'indice de surface et l'indice de l'air. L'indice de gel de la surface est utilisé dans le calcul de la pénétration du gel et du soulèvement au gel tandis que l'indice de dégel de la surface est utilisé dans le calcul de la pénétration du front de dégel et de la consolidation au dégel du pergélisol. Les quatre paramètres introduits ici sont donc l'indice de gel de l'air (IG_a), l'indice de gel de la surface (IG_s), l'indice de dégel de l'air (ID_a) et l'indice de dégel de la surface (ID_s).

2.6.2 Facteur n

La température de la surface est un paramètre plus important à connaître en conception d'ingénierie que la température de l'air. La température de l'air est souvent le paramètre le plus facile à obtenir. Le facteur n (n) est un paramètre communément utilisé afin d'obtenir la température de surface à partir de la température de l'air (Doré et Zubeck, 2004). Le facteur n est le rapport entre l'indice de température de la surface et l'indice de température de l'air. Ainsi, l'équation 2.9 décrit le facteur n de gel et l'équation 2.10 décrit le facteur n de dégel.

Équation 2.9: Facteur n de gel

$$n_g = \frac{IG_s}{IG_a}$$

Équation 2.10: Facteur n de dégel

$$n_d = \frac{ID_s}{ID_a}$$

Bien que l'utilisation du facteur n soit très répandue, ce facteur est souvent mal utilisé en ne tenant pas compte des conditions de surfaces et des conditions climatiques variables. De plus, comme le facteur n s'exprime en fonction de la température de l'air à un site spécifique, il est difficile d'évaluer le potentiel de « réchauffement » ou de « refroidissement » d'une surface par rapport à une autre si elles se trouvent à des endroits différents. Enfin, il est difficile de comparer les facteurs n de gel et de dégel entre eux. En effet, lorsqu'une surface se réchauffe le facteur n augmente durant le dégel, mais diminue durant le gel.

2.6.3 Indice de radiation

L'approche de l'indice de radiation (IR) proposée par Dysli en 1990 présente une alternative intéressante au facteur n. Cette approche très peu utilisée dans la pratique permet de relier l'indice de gel de surface à l'indice de gel de l'air en soustrayant un indice de radiation à l'indice de gel de l'air tel que présenté à l'équation 2.11. Dysli suggère que l'indice de radiation soit calculé en fonction de la radiation solaire incidente au site.

Bien que Dysli ait proposé l'approche de l'indice de radiation pour l'indice de gel seulement, la même approche peut être utilisée pour l'indice de dégel. Ainsi, deux nouveaux paramètres sont introduits ici : l'indice de radiation de gel et l'indice de radiation de dégel. Dans le cas du dégel, l'indice de radiation n'est pas soustrait, mais bien ajouté à l'indice de dégel de l'air tel que démontré à l'équation 2.12.

Équation 2.11: Définition de l'indice de radiation de gel

$$IG_s = IG_a - IR_g$$

Équation 2.12: Définition de l'indice de radiation de dégel

$$ID_s = ID_a + IR_d$$

Les avantages de l'indice de radiation par rapport au facteur n sont nombreux. Tout d'abord, le réchauffement d'une surface par rapport à l'air ambiant ne se modélise pas physiquement comme une fraction de la température de l'air, mais plutôt par une addition à la température de l'air. Ainsi, l'indice de radiation présente un meilleur sens physique que le facteur n (Dysli, 1990). Il est aussi plus facile de comparer les indices de radiation provenant de sites différents, car l'indice de radiation est exprimé indépendamment de la température de l'air. Ainsi, même si les températures de l'air sont très différentes les « réchauffements » de surface par rapport à l'air peuvent se comparer entre eux. De plus, l'indice de radiation de gel et l'indice de radiation de dégel peuvent

facilement se comparer entre eux. Ainsi, lorsque la surface se réchauffe l'indice de radiation augmente, et ce au gel comme au dégel. Il est d'ailleurs possible d'additionner les indices de radiation de gel et de dégel afin de considérer le réchauffement total qu'offre une surface durant une année complète. Cet indice de radiation annuel peut permettre de comparer l'efficacité de différents revêtements à albédo élevé. Enfin, tout comme les indices de gel et de dégel expriment la sévérité des conditions de température, l'indice de radiation permet d'exprimer la sévérité d'un « réchauffement » d'une surface.

Pour toutes ces raisons, l'indice de radiation sera l'approche privilégiée afin d'exprimer le réchauffement d'une surface dans ce document. Il est facile de relier l'indice de radiation au facteur n à l'aide des équations 2.13 et 2.14.

Équation 2.13: Relation entre le facteur n de gel et l'indice de radiation de gel

$$n_g = \frac{IG_a - IR_g}{IG_a}$$

Équation 2.14: Relation entre le facteur n de dégel et l'indice de radiation de dégel

$$n_d = \frac{ID_a - IR_d}{ID_a}$$

2.7 Pertinence du projet de recherche

2.7.1 Lacunes des connaissances

Les études portant sur les revêtements à albédo élevé démontrent qu'il existe deux principales raisons qui expliquent que leur utilisation soit peu répandue en contexte nordique.

Tout d'abord, le gain thermique lié à leur utilisation n'a pas été adéquatement quantifié. En effet, les relations empiriques proposées pour relier l'albédo d'une surface à des paramètres comme le facteur n présentent d'excellentes corrélations. Par contre, celles-ci sont spécifiques aux sites étudiés et ne peuvent être utilisées pour faire l'évaluation des températures superficielles pour des conditions climatiques différentes. De plus, bien que plusieurs modèles de calcul des températures superficielles des revêtements routiers existent, la plupart font appel à la résolution par éléments finis. Ces modèles sont donc complexes et nécessitent une connaissance approfondie de la problématique des échanges de chaleur à la surface d'un revêtement routier. À la connaissance de l'auteur, il n'existe pas d'outils de calcul simples permettant d'évaluer l'effet de la variation de l'albédo d'un revêtement routier sur les températures superficielles et donc sur la profondeur de dégel sous le revêtement.

De plus, les revêtements à albédo élevé sont généralement peu durables et peuvent présenter un danger pour les usagers de la route. En effet, les problèmes de durabilité entraînent des coûts d'exploitation importants et diminuent considérablement l'efficacité des surfaces à albédo élevé. La sécurité des usagers est aussi mise en péril en raison de leur faible adhérence lorsqu'ils sont mouillés et leur couleur pâle qui n'offre pas un bon contraste avec le marquage routier ou avec la neige. Il est donc primordial de circonscrire les propriétés nécessaires à une utilisation viable des revêtements à albédo élevé et d'identifier des méthodes d'essai capable d'évaluer ces propriétés autant en laboratoire que sur le terrain.

2.7.2 Pertinence et objectifs du projet

L'utilisation des revêtements à albédo élevé représente une solution intéressante pour plusieurs problématiques liées au génie routier. En l'absence de cadre assurant une utilisation efficace et sécuritaire des revêtements à albédo élevé, les agences de transport et les acteurs de l'industrie hésitent à en faire une utilisation à grande échelle. Il est donc pertinent de définir un cadre qui permet de quantifier les gains réalisés grâce aux revêtements à albédo élevé et de définir les propriétés permettant une utilisation viable de ceux-ci. Ce projet de recherche comporte donc deux objectifs principaux.

Le premier objectif est d'être en mesure de prédire l'efficacité des surfaces à albédo élevé afin de déterminer si leur utilisation permet de faire une stabilisation thermique efficace d'un remblai revêtu. Pour ce faire, un modèle de calcul des températures superficielles des surfaces revêtues a été développé. Ce modèle a été développé en considérant qu'il se doit d'être précis, simple à utiliser et qu'un nombre limité de paramètres doit entrer dans sa résolution. Des outils simples de calcul supportés par le modèle ont aussi été proposés. En utilisant le modèle proposé et les outils de calcul, il est possible d'obtenir les températures superficielles d'un revêtement et de calculer la profondeur de pénétration du gel et du dégel sous le revêtement.

Le deuxième objectif est de définir les propriétés permettant d'assurer une utilisation efficace, durable et sécuritaire des enduits superficiels à albédo élevé. Pour ce faire, une série de propriétés concernant la réflectivité, la durabilité et l'adhérence des revêtements à albédo élevé été définie. Enfin, des méthodes d'essai permettant d'évaluer ces propriétés en laboratoire ou sur le terrain ont été proposées.

3 Description des sites expérimentaux

3.1 Introduction

Afin d'évaluer l'efficacité des revêtements à albédo élevé, deux planches d'essai ont été réalisées dans le cadre du projet. La première composée de quatre surfaces différentes se trouve à Beaver Creek au Yukon. La deuxième se trouve au SERUL à la Forêt Montmorency où différentes surfaces ont été évaluées. En plus de fournir des données de températures superficielles, la planche de Beaver Creek a aussi permis d'étudier les différentes propriétés techniques des revêtements routiers à albédo élevé. Ce chapitre contient une description du site expérimental et de la mise en place de la planche d'essai de Beaver Creek, ainsi qu'une brève description de la planche expérimentale du SERUL.

3.2 Planche d'essai de Beaver Creek, Yukon

Une planche expérimentale a été réalisée au site expérimental de Beaver Creek au Yukon en août 2012 afin d'évaluer l'efficacité des revêtements à albédo élevé. L'installation a été réalisée par le Yukon Highways and Public Works sous la supervision de M. Paul Murchisson.

3.2.1 Description du site

Le site expérimental de Beaver Creek au Yukon se trouve le long de l'Alaska Highway près de la communauté du même nom tel qu'illustré à la figure 3.1. Le site expérimental se trouve à la latitude de 62,34° Nord et à la longitude de -140,83° Ouest. La température annuelle moyenne de l'air est de -5,5°C entre 1971 et 2000 et de -3,8°C entre 2009 et 2011 (M-Lepage et coll., 2012). Entre 1985 et 2011, le trafic journalier moyen s'est situé entre 250 et 325 véhicules à la frontière entre Beaver Creek et Alcan (Yukon Highways and Public Works, 2011).

En 2008, un site d'essai y a été construit afin d'évaluer l'efficacité de différentes techniques d'atténuation des impacts de la fonte du pergélisol sous les remblais routiers. Le site est divisé en douze sections ayant une dimension de 50 mètres de longueur chacune. Une des sections d'essai vise à évaluer l'efficacité des revêtements à albédo élevé. En effet, une section de traitement de surface a été réalisée en utilisant des granulats clairs (L-BST). Le reste du remblai est revêtu de traitement bitumineux de surface standard. Des câbles de thermistances ont été installés verticalement dans le sol afin de mesurer les températures du sol en profondeur à différents endroits du site. Dans le cadre de ce projet, les données provenant des câbles de thermistances installées au centre du remblai sous la section de traitement bitumineux à granulats clairs et sous la

section contrôle de traitement bitumineux standard seront utilisées. Les températures sont enregistrées et transmises par satellite six fois par jour.

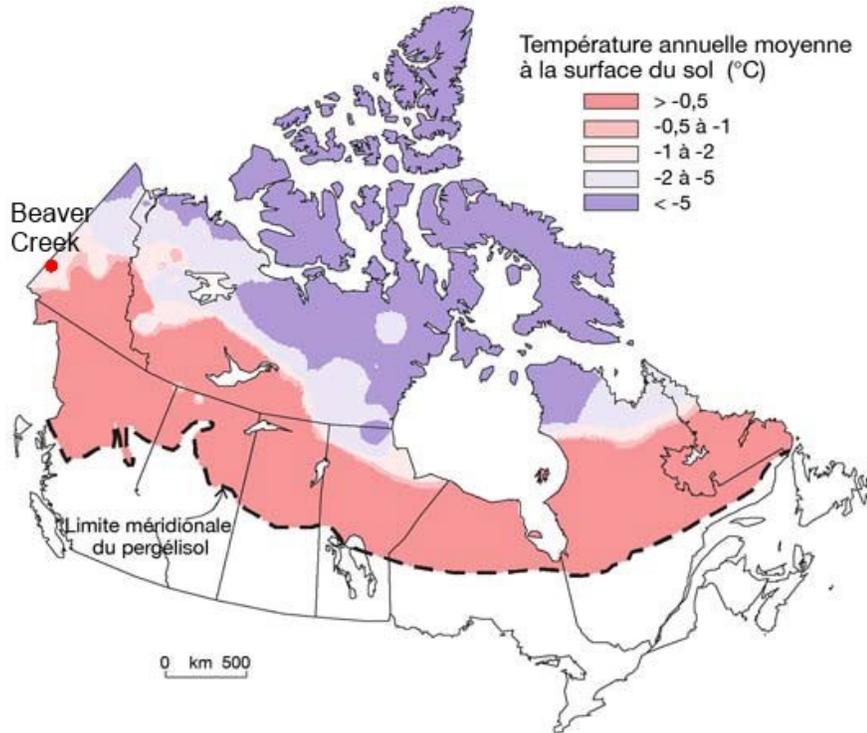


Figure 3.1: Localisation de Beaver Creek

3.2.2 Mise en place des surfaces à albédo élevé

En plus de la surface existante de traitement bitumineux de surface à granulats clairs présente sur le site depuis 2008, trois nouvelles surfaces ont été installées en août 2012 : un enduit superficiel nommé PerfectCool A de la compagnie japonaise Nippo Corporation sur une surface de 4,1 par 4,3 mètres, un enduit superficiel de la compagnie Lafrentz sur une surface de 3 par 2,88 mètres et une section de de Cold Mix, un enrobé bitumineux à froid utilisé pour le rapiéçage des revêtements asphalté, ayant une dimension de 3 par 3 mètres. Le PerfectCool A possède une couleur bleu-grise et l'enduit de Lafrentz est blanc. Une couche d'enrobé froid a d'abord été mise en place à la surface du traitement bitumineux de surface sur une surface d'environ 3 mètres par 9 mètres. Les enduits Perfect Cool A et Lafrentz ont ensuite été appliqués directement à la surface de l'enrobé froid. Une section de l'enrobé froid n'a pas été recouverte et sert de témoin. Ces trois surfaces ont été instrumentées à l'aide d'une thermistance placée à 5 cm sous chacune des surfaces. Pour la section existante de traitement de surface à granulats clairs, une entaille a été effectuée à la surface afin d'y placer une thermistance à 5 cm de profondeur. La thermistance et le fil ont alors été recouverts de scellant à asphalté et de roches de couleur similaire au reste de la section de traitement de surface à granulats clairs afin de conserver une surface de couleur uniforme.

L'installation des enduits de Lafrentz et du Perfect Cool A de Nippo Corporation a été effectuée à l'aide d'une raclette à caoutchouc. Tel que spécifié par la compagnie Nippo Corporation, du sable a été ajouté au produit afin d'améliorer la rugosité de la surface. Suite à l'analyse des photographies prises durant l'installation, M. Masahiko Iwama, ingénieur de Nippo Corporation, a indiqué que le taux de pose semblait trop élevé et que l'installation aurait dû être réalisée à l'aide d'un balai et non d'une raclette à caoutchouc afin de mieux contrôler le taux de pose. Les figures 3.2 à 3.4 illustrent les différentes étapes de mise en place des enduits superficiels.



Figure 3.2 : Préparation de l'enduit Perfect Cool A (Photo: Yukon Highways and Public Works)



Figure 3.3: Installation de l'enduit Perfect Cool A de Nippo (Photo: Yukon Highways and Public Works)



Figure 3.4: Planche d'essai complétée en août 2012, surfaces du bas vers le haut: Perfect Cool A - Nippo, Lafrentz, enrobé froid et traitement de surface à granulats clairs (L-BST) (Photo: Yukon Highways and Public Works)

Suite à l'installation des sections instrumentées, l'enduit excédentaire a été appliqué sur le traitement de surface standard vis-à-vis sur les sentiers de roues en amont de la planche expérimentale. La figure 3.5 illustre ces marques qui serviront à évaluer l'usure du produit lorsque les enduits sont appliqués sur une surface présentant une macro texture plus importante que l'enrobé froid.



Figure 3.5: Enduit Perfect Cool A à gauche et l'enduit de Lafrentz à droite; la section instrumentée en arrière-plan

Les données provenant des thermistances sont enregistrées à l'aide d'un enregistreur de données de marque HOBO micro-station tel qu'illustré aux figures 3.6 et 3.7. Les données provenant des thermistances sont enregistrées toutes les quatre heures soit à 1 h 24, 5 h 24, 9 h 24, 13 h 24, 17 h 24 et 21 h 24 (GMT-07 :00). L'enregistrement des données a débuté le 15 août 2012 à 13 h 24 (GMT-07 :00) et elles sont disponibles en continu jusqu'au 25 septembre 2013 à 17 h 24 (GMT-07 :00). Deux stations météorologiques installées en bordure du site d'essai fournissent les données climatiques au site chaque heure. La radiation solaire incidente, la température de l'air et la vitesse du vent seront notamment utilisées dans le cadre de ce projet.



Figure 3.6: Position de l'enregistreur de données en bordure de route



Figure 3.7: Enregistreur de données de marque HOBO micro-station utilisé à Beaver Creek (Photo : Benoît Loranger)

Deux visites ont été réalisées sur le site lors de l'été 2013, la première en mai et la seconde à la fin du mois d'août. Ces visites ont permis d'évaluer et de mesurer les différentes propriétés des surfaces notamment l'albédo, l'adhérence et l'usure. Une visite additionnelle a été réalisée en mai 2014 afin d'évaluer l'état de la planche expérimentale et de mesurer l'albédo. Un nouveau revêtement de traitement bitumineux de surface a été appliqué sur l'ensemble du site expérimental de Beaver Creek durant l'été 2014. Les sections à albédo élevé du site ont donc été détruites. Les détails des essais réalisés et des résultats obtenus lors de ces visites sont présentés au chapitre 6 de ce document.

3.3 Section expérimentale du SERUL

Une planche expérimentale a été réalisée dans le cadre du projet à l'automne 2013. Plusieurs enduits superficiels fournis par les partenaires du projet, Nippo Corporation et Colas Canada, ont été appliqués au SERUL à la forêt Montmorency près de Québec. Cette planche avait pour but de récolter des données de températures provenant de surfaces à albédo élevé additionnelles et d'évaluer la mise en place des différents enduits en prévision d'une planche expérimentale qui devait être réalisée au Nunavik.

En raison de divers problèmes techniques, cette planche d'essai n'a pas permis d'obtenir des résultats permettant de tirer des conclusions dans le cadre du projet. Tout d'abord, l'enregistrement des données de température a été impossible en raison d'une déficience au niveau de l'instrumentation. De plus, les conditions climatiques hivernales hâtives n'ont pas permis l'évaluation des propriétés techniques des enduits avant les premières chutes de neige. La planche d'essai du SERUL sera réhabilitée afin de pouvoir évaluer les enduits utilisés et ne fera donc pas l'objet d'analyse dans le cadre de ce projet.

Une description de la planche d'essai du SERUL et de sa mise en place se trouve à l'annexe A de ce document.

3.4 Conclusion

Deux planches d'essai ont été réalisées dans le cadre du projet. La planche d'essai de Beaver Creek au Yukon fournit des données de température superficielle et des données climatiques afin d'évaluer l'efficacité des revêtements à albédo élevé. Cette planche d'essai a aussi permis d'évaluer différentes propriétés techniques des revêtements à albédo élevé. En raison de problème technique, la planche du SERUL est quant à elle inutilisable dans le cadre de ce projet.

4 Données thermiques de Beaver Creek

4.1 Introduction

La planche expérimentale de Beaver Creek a fourni des données de températures superficielles pour des surfaces ayant des réflectivités solaires différentes. En plus de permettre de faire des observations importantes quant au comportement thermique des revêtements à albédo élevé, ces données seront utilisées ultérieurement afin de calibrer le modèle développé dans le cadre du projet permettant de calculer les températures superficielles des revêtements routiers. Dans ce chapitre, les valeurs d'albédo des surfaces de la planche de Beaver Creek mesurées en mai 2013 seront présentées. Ensuite, les données de températures superficielles obtenues à Beaver Creek seront présentées. Une analyse de ces données et une brève conclusion compléteront ce chapitre.

4.2 Albédo

Les valeurs d'albédo telles que mesurées lors de la visite de mai 2013 sur le site de Beaver Creek sont présentées au tableau 4.1. Ces valeurs seront utilisées dans ce chapitre pour alléger la présentation des données de température provenant de la planche de Beaver Creek afin de permettre au lecteur de différencier les surfaces. Il ne s'agit pas des valeurs d'albédo utilisées pour la modélisation des températures superficielles. L'albédo des surfaces à l'état neuf n'ayant pas été mesuré, les données de températures pour l'été 2012 sont présentées en fonction de l'albédo mesuré au site en mai 2013. Par contre, la dégradation des trois surfaces un hiver après leur mise en place a affecté significativement l'albédo de celles-ci par rapport à la valeur qui aurait pu être mesurée en août 2012. De plus, les valeurs d'albédo des surfaces durant l'hiver, lorsqu'elles sont couvertes de neiges et de glace, sont différentes des valeurs mesurées en mai 2013. L'albédo du traitement bitumineux de surface (BST) est présenté bien qu'aucune donnée de température superficielle ne soit disponible. Une description complète de l'évolution de l'albédo depuis la mise en place de la planche d'essai est disponible au chapitre 5 alors que la méthode de mesure de l'albédo est décrite en détail au chapitre 6.

Tableau 4.1 : Albédo des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek en mai 2013

Surfaces	Enrobé froid	L-BST	Nippo	Lafrentz	BST
Albédo	0,14	0,23	0,29	0,55	0,14

4.3 Présentation et analyse des données

4.3.1 Données horaires

Les données climatiques sont disponibles en données horaires et les températures superficielles sont enregistrées aux quatre heures. Les figures 4.1 à 4.3 présentent des données horaires provenant de la planche expérimentale de Beaver Creek. La température de l'air et la radiation solaire y sont représentées en plus des températures superficielles de la surface d'enrobé froid et de l'enduit de Lafrentz. L'échelle de radiation solaire sur chacune des figures est la même afin de pouvoir comparer l'influence de la radiation solaire pour différents moments de l'année; les échelles de température sont différentes pour faciliter la lecture des graphiques. La figure 4.1 représente des conditions estivales, la figure 4.2 des conditions hivernales et la figure 4.3 des conditions durant la période de dégel.

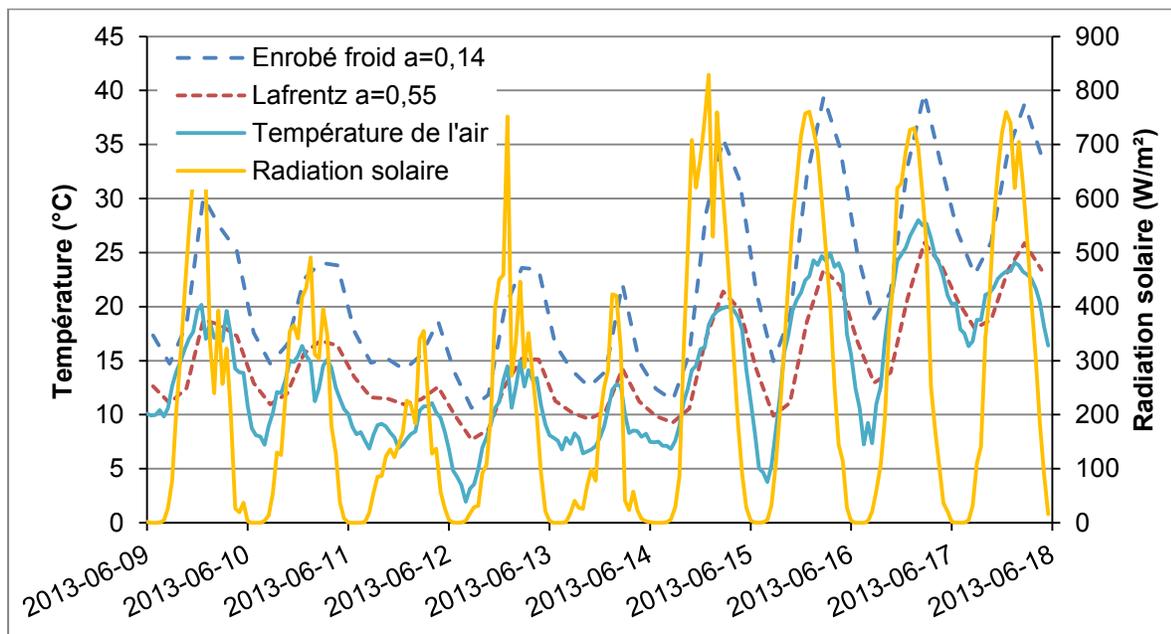


Figure 4.1: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 9 juin au 18 juin 2013

La figure 4.1 démontre très bien l'influence de la radiation solaire sur les températures superficielles. Ainsi, lors de journées couvertes comme le 10 et le 11 juin, l'écart entre les températures de surface et la température de l'air est moindre que lors de journées ensoleillées comme le 15, 16 et 17 juin. Le graphique de la figure 4.1 permet aussi d'observer le décalage entre les cycles de la radiation solaire, de la température de l'air et des températures de surfaces. La valeur maximale de radiation solaire est enregistrée environ trois heures avant la température de l'air maximale. La température du revêtement est maximale environ une heure après la température maximale de l'air. Il en est de même pour les valeurs minimales.

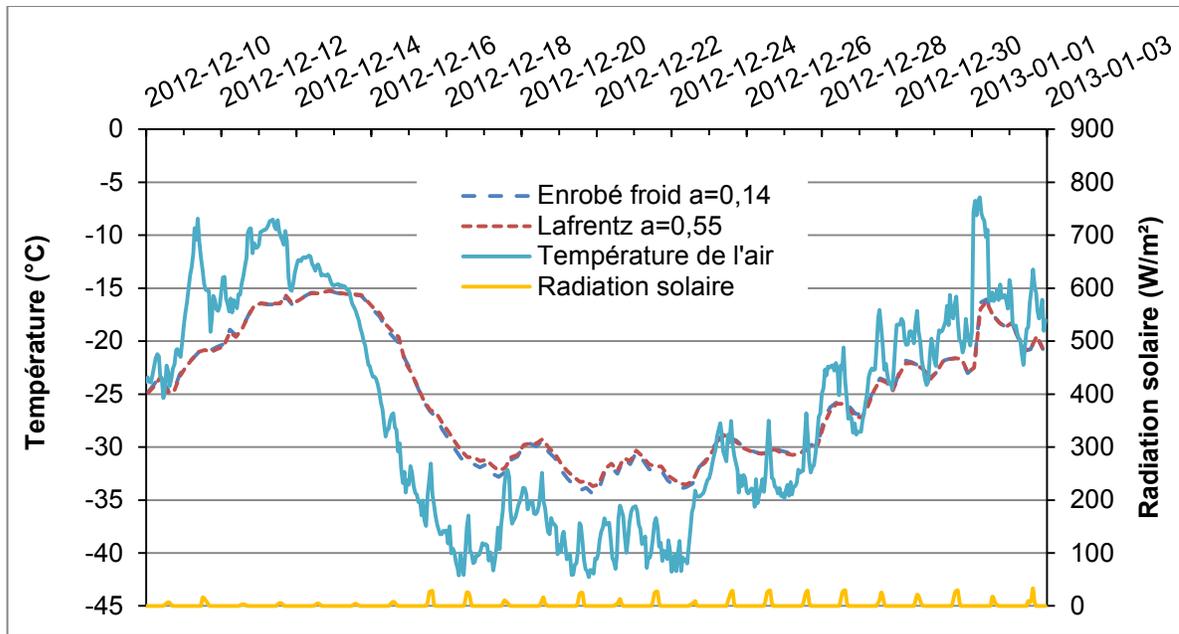


Figure 4.2: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 12 décembre 2012 au 3 janvier 2014

La figure 4.2 permet d'observer le comportement des températures des revêtements lorsque la radiation solaire est très basse et qu'elle n'a pas un impact important sur celles-ci. Les températures superficielles ne suivent pas un cycle aussi bien défini qu'à la figure 4.1. L'effet de l'inertie thermique dû à la capacité calorifique des revêtements est clairement notable sur la figure 4.2. En effet, lorsque la température de l'air chute drastiquement à partir du 15 décembre, les températures des revêtements baissent aussi, mais moins rapidement et avec un certain délai. Lorsque la température de l'air se stabilise entre -35 et -40 °C du 19 au 24 décembre, les températures des revêtements ne baissent pas sous -35 °C. Ainsi, comme la radiation solaire ne peut être responsable de cette différence de température entre l'air et les surfaces, il doit y avoir une autre source de chaleur qui permet de réchauffer la surface. Cette source de chaleur pourrait être la chaleur latente qui se dégage lorsque l'eau gèle. En effet, lorsque les températures de l'air sont très froides, la vitesse de pénétration du gel augmente au sein du remblai et une grande quantité de sols gèle. L'eau contenue dans le sol dégage de la chaleur lorsqu'elle gèle et cette chaleur atteint la surface ce qui peut expliquer que la température de surface est légèrement supérieure à la température de l'air. Enfin, lorsque la température de l'air augmente après le 27 décembre, les températures de surface augmentent presque au même rythme en accusant un léger délai. Il y a donc aussi un effet d'inertie thermique lors du réchauffement qui semble un peu moins important.

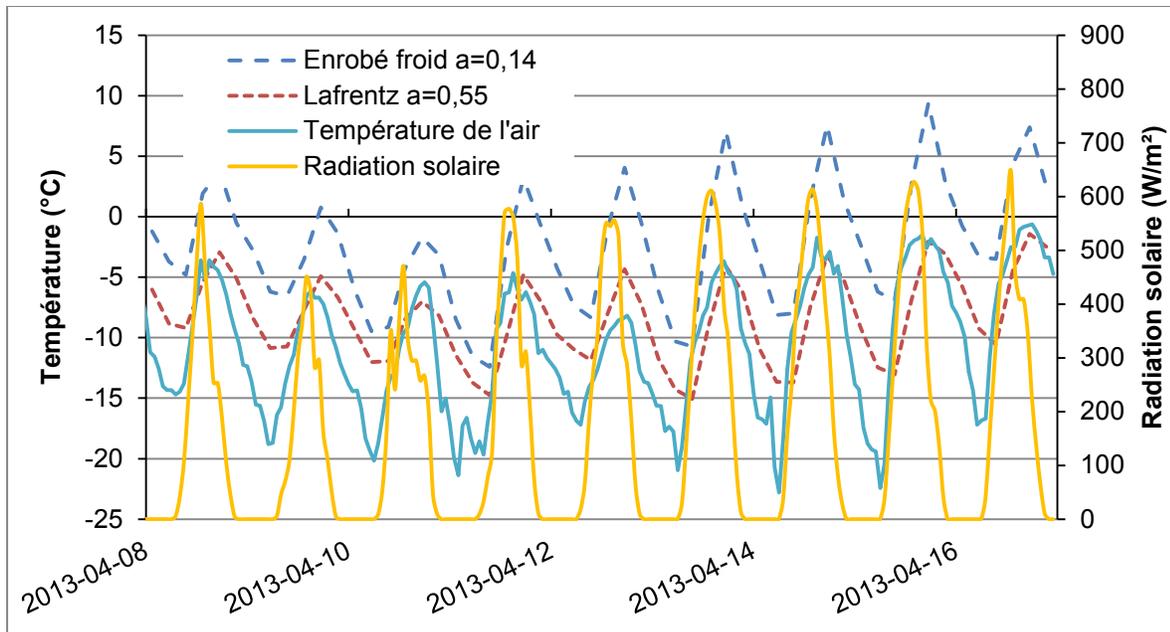


Figure 4.3: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du 8 avril au 17 avril 2013

La figure 4.3 permet d'observer le comportement des surfaces lors de la période de dégel. La radiation solaire est plus élevée que lors de l'hiver et donc l'écart de température entre la surface et l'air est important. Les températures des deux revêtements représentés sont très différentes. Ainsi, il est possible de croire que les surfaces sont probablement partiellement dégagées de neige et de glace et que leur albédo ne soit pas semblable. Cette observation permet de justifier que des conditions de surfaces dites « estivales » peuvent être présentes même si les températures de l'air sont inférieures à la température de l'air. Les conditions de surface estivales sont présentes environ un mois avant que les températures mensuelles moyennes de l'air atteignent 0 °C.

4.3.2 Données mensuelles

Les données seront maintenant présentées en valeurs mensuelles moyennes qui permettent un traitement plus clair et qui serviront à développer le modèle de calcul des températures superficielles présenté dans le chapitre suivant. Les données en valeurs moyennes quotidiennes seront aussi utilisées pour la validation du modèle. Les valeurs maximales et minimales de température superficielle seront aussi présentées afin de pouvoir offrir un comparatif aux études utilisant ce type de valeurs.

Le tableau 4.2 présente les températures superficielles enregistrées sous forme de moyennes mensuelles. La température de l'air, la radiation solaire et la vitesse du vent y sont aussi présentées. La figure 4.4 présente les mêmes données sous forme graphique ce qui permet d'analyser visuellement l'évolution des températures.

Tableau 4.2 : Données obtenues à la planche expérimentales de Beaver Creek

	Température superficielle (°C)				Température de l'air (°C)	Radiation solaire (W/m ²)	Vitesse du vent (km/h)
	Enrobé a=0,14	L-BST a=0,23	Nippo a=0,29	Lafrentz a=0,55			
août-12	19,2	16,1	16,3	13,1	11,2	154,9	5,0
sept-12	10,0	8,8	8,2	6,3	7,0	95,5	8,3
oct-12	-4,1	-4,6	-4,3	-5,0	-7,3	27,9	2,2
nov-12	-18,9	-19,6	-18,7	-18,7	-22,6	6,6	1,3
déc-12	-27,5	-28,6	-27,3	-27,5	-29,7	2,6	0,7
janv-13	-19,8	-20,3	-19,7	-19,8	-20,0	6,9	2,4
févr-13	-16,3	-16,4	-16,2	-16,3	-15,9	34,9	2,6
mars-13	-11,1	-11,5	-12,0	-13,0	-13,0	106,3	4,0
avr-13	0,0	-1,6	-2,1	-5,6	-7,5	187,1	5,3
mai-13	13,9	11,6	11,2	6,8	6,2	219,7	6,2
juin-13	24,6	22,0	21,9	17,1	15,4	244,3	6,0
juil-13	21,8	19,7	19,7	16,1	14,0	180,3	5,3

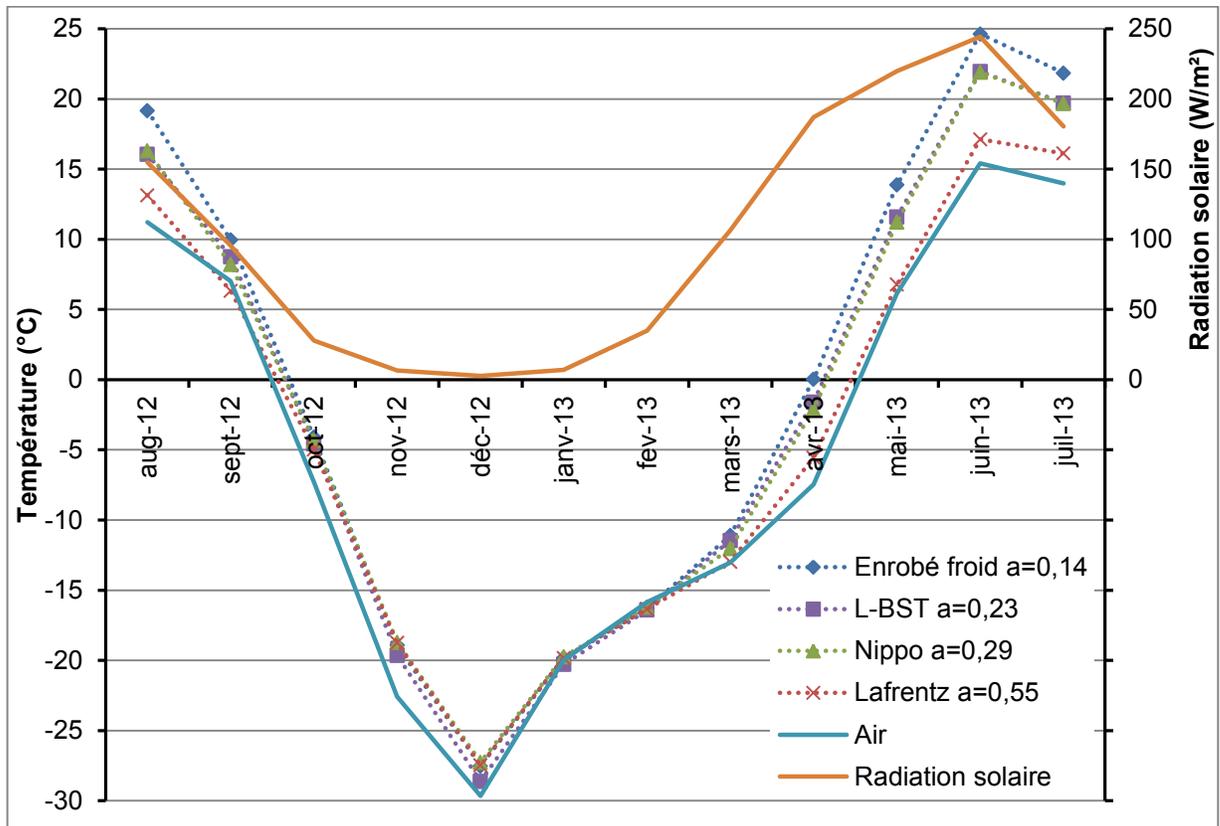


Figure 4.4 : Températures superficielles, température de l'air et radiation solaire à la planche expérimentale de Beaver Creek

À partir des données présentées au tableau 4.2 et à la figure 4.4, il est possible de faire de nombreuses observations quant au comportement thermique des différentes surfaces.

Tout d'abord, les températures superficielles des revêtements suivent la même tendance générale que la température de l'air. Ainsi, les températures mensuelles minimales de l'air et des quatre revêtements sont toutes observées au mois de décembre 2012. Les températures mensuelles maximales de l'air et des quatre revêtements sont quant à elles observées au mois de juin 2013.

L'écart de température entre les différents revêtements est fonction de la radiation solaire moyenne absorbée. Ainsi lorsque la radiation mensuelle est maximale au mois de juin 2013, l'écart de température superficielle entre les revêtements est maximal. L'écart de température superficielle entre les revêtements est presque nul lorsque la radiation solaire mensuelle se trouve sous 50 W/m^2 d'octobre 2012 à février 2013. Durant cette période, l'accumulation de neige et de glace à la surface des revêtements a aussi l'effet d'homogénéiser l'albédo de celles-ci.

Comme la radiation solaire ne semble plus être un facteur pour les mois de l'hiver. Il est difficile d'expliquer l'écart de température entre l'air et la surface avec les données mensuelles. Les données horaires permettent de mieux analyser le comportement des températures superficielles des mois d'octobre à mars. Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 présentent les données horaires complètes des mois d'octobre, de décembre et de mars respectivement.

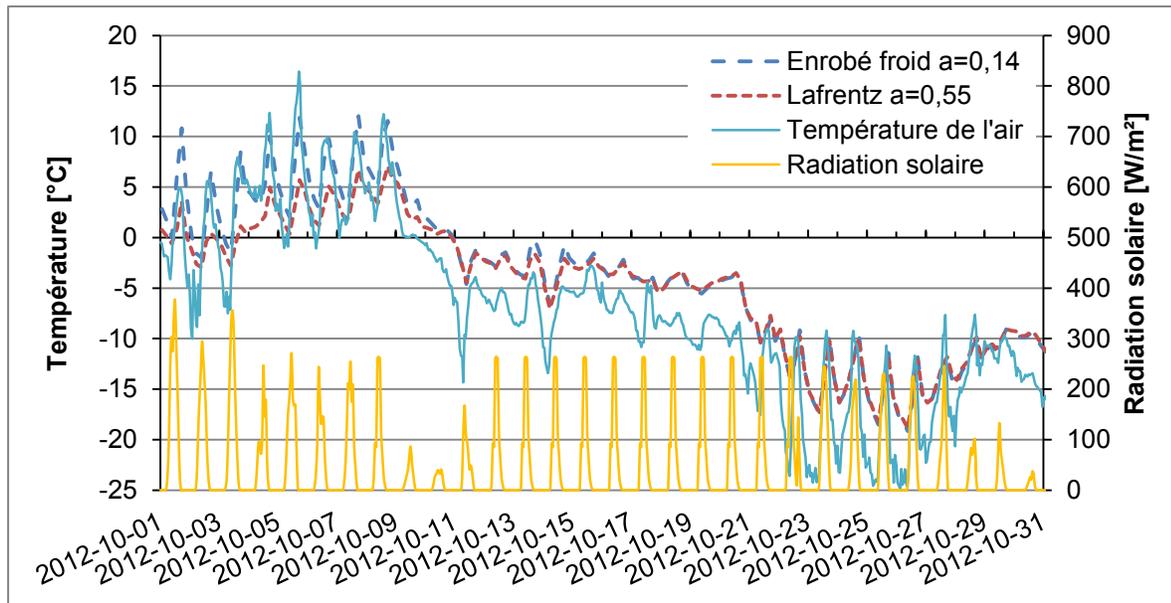


Figure 4.5: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois d'octobre 2012

Durant le mois d'octobre, la radiation solaire est beaucoup plus faible que durant l'été, mais elle demeure un facteur important au bilan d'énergie à la surface. Jusqu'au 9 octobre, le comportement

des températures est semblable au comportement estival. Cependant, à partir du 9 octobre, les températures de l'air chutent sous 0°C et le comportement des températures superficielles est drastiquement différent. En effet, les températures des deux revêtements sont presque égales, mais demeurent supérieures à la température de l'air. Ce comportement peut probablement s'expliquer par le fait que lorsque les températures de l'air sont sous 0°C, les précipitations sont sous forme de neige. Cette neige a pour effet d'homogénéiser l'albédo des revêtements. Ainsi, il y a toujours un réchauffement dû à la radiation solaire, mais ce réchauffement est le même, peu importe la surface.

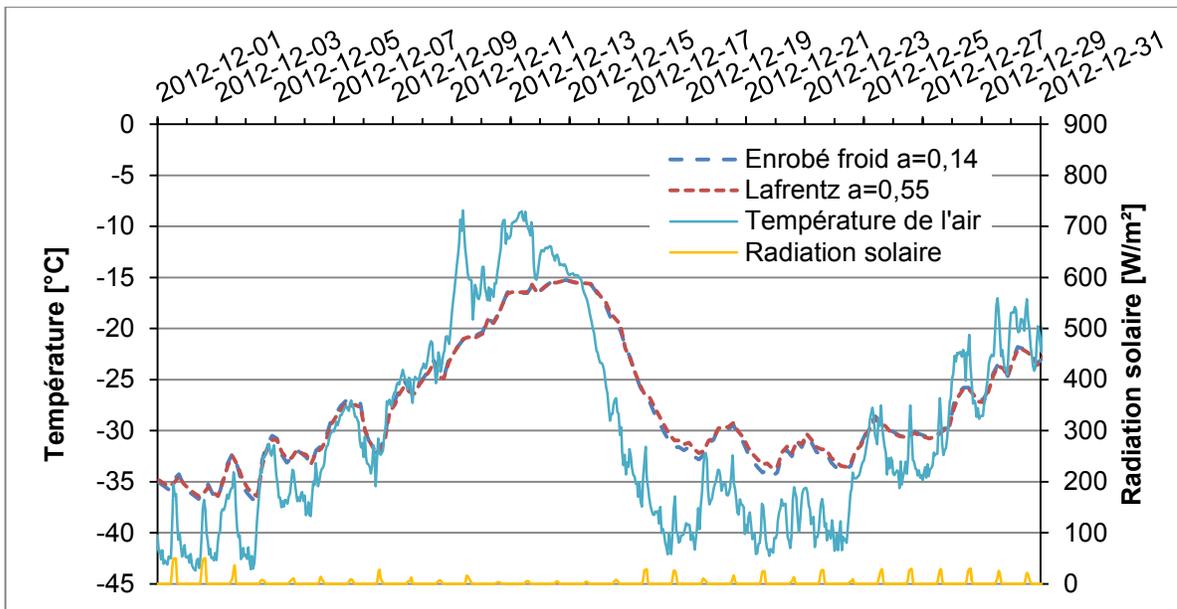


Figure 4.6: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois de décembre 2012

Durant le mois de décembre, la radiation solaire est très faible et ne peut expliquer que les températures des surfaces soient plus élevées que celle de l'air. À ce moment, l'écart des températures s'explique principalement par les facteurs énumérés à la section 4.3.1. Tel que mentionné précédemment, l'inertie thermique semble avoir un impact plus important lorsque les températures de l'air chutent que lorsqu'elles augmentent. Ce phénomène peut expliquer pourquoi les températures mensuelles des surfaces sont plus élevées que les températures de l'air au mois de novembre et de décembre, mais qu'elles sont presque égales pour les mois de janvier et de février lorsque les températures de l'air commencent à augmenter.

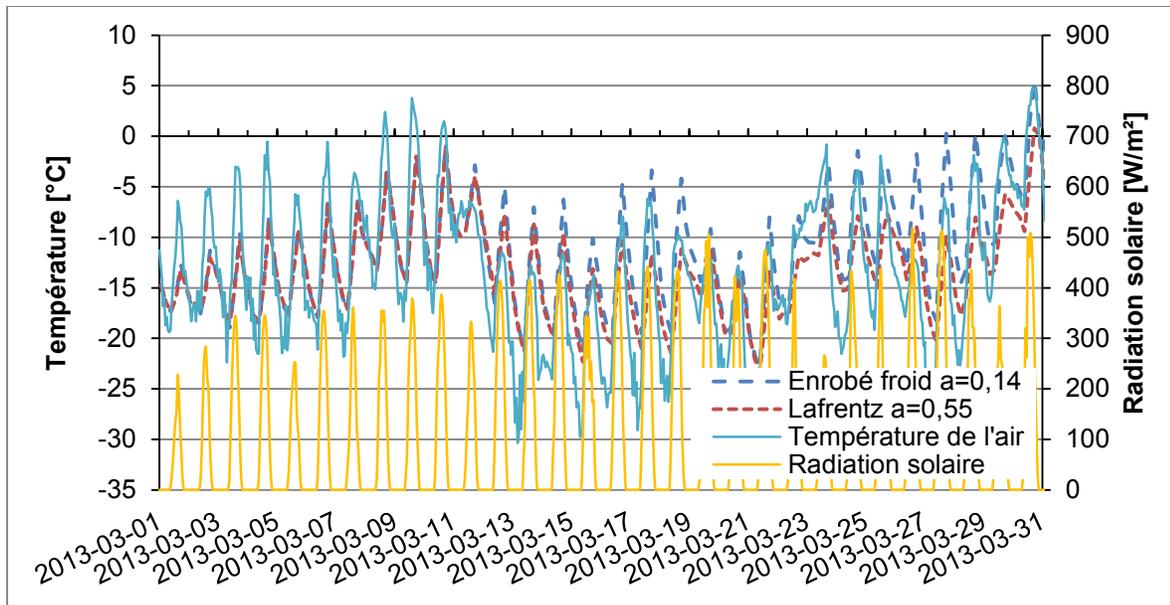


Figure 4.7: Données horaires de la planche d'essai de Beaver Creek du mois de mars 2013

À partir du mois de février et de mars 2013, la radiation solaire et la température de l'air commencent à augmenter considérablement. Les températures des revêtements augmentent aussi et les écarts de températures entre les différents revêtements se creusent. Pour la période de l'année sans gel, de mai à septembre, il est difficile d'observer l'effet de la conduction au sein du sol de remblai à l'aide des données présentées.

Le réchauffement d'un revêtement routier par rapport à l'air peut donc intuitivement être représenté comme une addition par rapport à la température de l'air. Ainsi, l'indice de radiation semble être un paramètre représentant adéquatement le phénomène de réchauffement.

4.3.3 Indices

Les tableaux 4.3 et 4.4 présentent les données de la planche expérimentale de Beaver Creek, Yukon à l'aide d'indices pour la période de gel (d'octobre 2012 à avril 2013) et pour la période de dégel (juillet et septembre 2012 et, de mai à juillet 2013). Il s'agit de la période de gel lorsque la température mensuelle moyenne de l'air est sous 0 °C et de la période de dégel lorsque la température mensuelle moyenne de l'air est au-dessus de 0 °C. La période de dégel correspond en fait à la période de l'année sans gel. Ces indices permettent d'évaluer la performance générale des revêtements et la sévérité des conditions climatiques. Ils seront d'ailleurs utilisés pour présenter les résultats du modèle de calcul des températures superficielles des revêtements routiers.

Tableau 4.3: Indices pour la planche expérimentale de Beaver Creek pour la période de gel (d'octobre 2012 à avril 2013)

		Enrobé a=0,14	L-BST a=0,23	Nippo a=0,29	Lafrentz a=0,55
Indice de gel de l'air	°C*jour	3509	3509	3509	3509
Indice de gel de surface	°C*jour	2961	3106	3041	3206
Facteur-n de gel	-	0,84	0,89	0,87	0,91
Indice de radiation de gel	°C*jour	548	403	468	303
Température moyenne de l'air	°C	-16,6	-16,6	-16,6	-16,6
Température moyenne	°C	-14,0	-14,7	-14,3	-15,1

Tableau 4.4: Indices pour la planche expérimentale de Beaver Creek pour la période sans gel (juillet et septembre 2012 et de mai à juillet 2013)

		Enrobé a=0,14	L-BST a=0,23	Nippo a=0,29	Lafrentz a=0,55
Indice de dégel de l'air	°C*jour	1646	1646	1646	1646
Indice de dégel	°C*jour	2738	2389	2366	1820
Facteur-n de dégel	-	1,66	1,45	1,44	1,11
Indice de radiation de dégel	°C*jour	1092	743	720	174
Température moyenne de l'air	°C	10,8	10,8	10,8	10,8
Température moyenne	°C	17,9	15,6	15,5	11,9

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 présentent les différents indices présentés aux tableaux 4.3 et 4.4 en fonction de l'albédo de surface. Tel que mentionné précédemment, les valeurs d'albédo utilisées pour produire ces figures sont celles mesurées en mai 2013, comme il ne s'agit pas de l'albédo réel les relations affichées sont simplement à titre indicatif. La figure 4.5 présente donc la variation du facteur n en fonction de l'albédo de surface pour les périodes de gel et de dégel. La figure 4.6 présente la variation de l'indice de radiation en fonction de l'albédo de surface pour les périodes de gel et de dégel. Enfin, la figure 4.7 présente la variation de la température superficielle moyenne en fonction de l'albédo de surface pour les périodes de gel et de dégel.

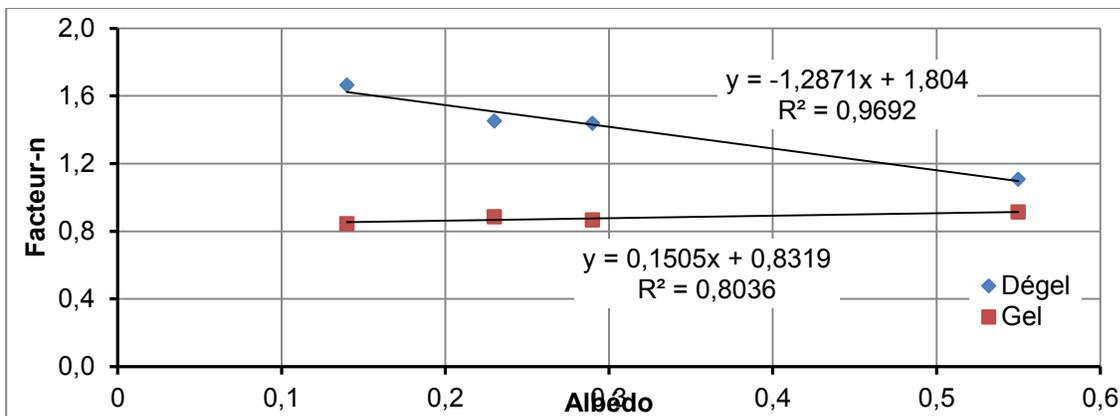


Figure 4.8 : Effet de l'albédo sur le facteur n pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek

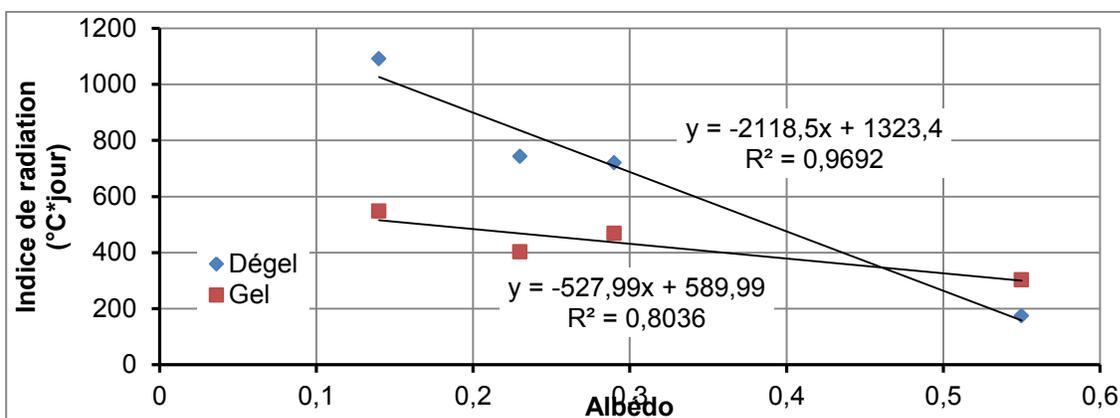


Figure 4.9: Effet de l'albédo sur l'indice de radiation pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek

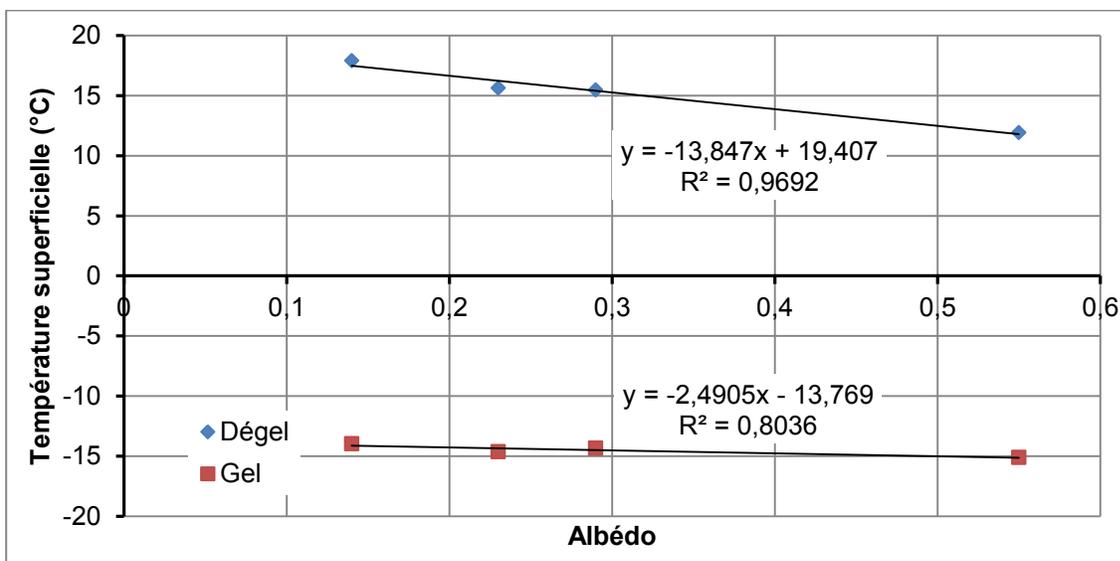


Figure 4.10: Effet de l'albédo sur les températures superficielles pour les périodes de gel et de dégel pour la planche expérimentale de Beaver Creek

Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 permettent toutes d'évaluer l'effet de l'albédo sur les températures superficielles des revêtements routiers. Ainsi, il existe une corrélation qui semble linéaire entre la température de surface et l'albédo d'un revêtement, et ce, autant pour la période de gel et que pour la période de dégel. La température superficielle d'un revêtement tend à diminuer lorsque son albédo augmente. La pente de cette corrélation linéaire est plus forte pour la période de dégel que pour la période de gel. En effet, durant les mois de gel, les revêtements sont partiellement couverts de neige et de glace. L'albédo des surfaces l'hiver est donc fonction du couvert de neige et de glace et de la portion du revêtement couverte par celui-ci. Le couvert de neige et de glace homogénéise la réflectivité des différentes surfaces. Ainsi, l'écart de température entre les différentes surfaces est moindre, car l'écart de radiation solaire absorbée est plus petit durant la période de gel. De plus, comme la radiation solaire est plus importante durant la période de dégel, l'albédo a une plus grande influence sur les températures de surface à ce moment-là. Ainsi, une variation de l'albédo durant la période de dégel engendre une différence de température de la surface plus importante que pour la même variation d'albédo durant la période de gel.

4.3.4 Données maximales et minimales

Tel que mentionné précédemment, ce projet ne vise pas à analyser les températures maximales et minimales des revêtements, mais bien les températures moyennes. Plusieurs études portant sur les revêtements à albédo élevé présentent les données sous forme d'écart maximum, il est donc pertinent de présenter ces valeurs à titre comparatif. Le tableau 4.5 présente les données de températures superficielles maximales enregistrées le 27 juin 2013 à 17 h 24. La température maximale de l'air enregistrée le 27 juin était de 31,3 °C à 16 h et la radiation solaire a atteint un maximum de 759,2 W/m² à 14 h. La différence maximale entre l'enrobé froid et l'enduit Lafrentz est de 14,5 °C.

Le tableau 4.6 présente les données de températures superficielles minimales enregistrées le 12 décembre 2012 à 9 h 24. La radiation solaire avait été nulle durant les 9 heures précédant l'enregistrement de la température minimale et la température de l'air avait atteint une valeur minimale de -17,2 °C à 5 h le 12 décembre 2012.

Tableau 4.5 : Température superficielle de la planche expérimentale de Beaver Creek le 27 juin 2013 à 17h24

	Enrobé a=0,14	L-BST a=0,23	Nippo a=0,29	Lafrentz a=0,55
Température (°C)	44,3	39,5	38,5	29,8

Tableau 4.6: Température superficielle de la planche expérimentale de Beaver Creek le 12 décembre 2012 à 9h24

	Enrobé a=0,14	L-BST a=0,23	Nippo a=0,29	Lafrentz a=0,55
Température (°C)	-36,9	-37,4	-36,4	-36,4

Ainsi, les tableaux 4.5 et 4.6 permettent de constater que la variation d'albédo a une grande influence sur les températures maximales des revêtements, alors que son influence sur les températures minimales est négligeable. Ainsi, les revêtements à albédo élevé pourraient être utilisés afin de diminuer l'écart de température entre les températures extrêmes qu'un revêtement atteint au cours d'une année en diminuant considérablement la température maximale. Les revêtements à albédo élevé pourraient donc jouer un rôle dans les problématiques mécaniques des revêtements et plus particulièrement de formulation du bitume constituant les enrobés bitumineux.

4.4 Évolution de l'albédo

L'albédo des surfaces lors de l'été 2012 est différent de celui de l'été 2013. Comme les conditions climatiques mensuelles ne sont pas semblables et qu'il n'a pas été possible d'obtenir les données après le mois de juillet 2013, il est difficile de faire un comparatif direct entre les températures superficielles d'une surface enregistré en 2012 et en 2013. La surface dont l'albédo varie le plus est l'enduit de Nippo. Le revêtement de traitement de surface à granulat clair a un albédo constant entre 2012 et 2013. En comparant l'écart de température entre ces deux surfaces, il est donc possible de déterminer si les données de la planche expérimentale de Beaver Creek permettent de conclure que l'évolution de l'albédo a un impact sur les températures superficielles. Pour les mois d'août et de septembre 2012, les températures superficielles de ces deux revêtements sont pratiquement égales. Les températures superficielles de ces surfaces de mai à juillet 2013 sont aussi presque égales. Cependant, comme l'albédo de la surface de Nippo a beaucoup diminué durant l'hiver 2012-2013, sa température superficielle devra être plus élevée que la surface de traitement de surface à granulats clairs. Ainsi, les données de la planche expérimentale de Beaver Creek ne permettent pas d'observer l'impact de la variation d'albédo d'une année à l'autre sur les températures superficielles d'une surface.

4.5 Conclusion

En conclusion, les données expérimentales de la planche d'essai de Beaver Creek au Yukon ont permis de faire plusieurs observations quant au comportement thermique des revêtements routiers ayant des albédos différents. Ces observations serviront à guider les choix effectués lors de l'élaboration du modèle de calcul des températures superficielles.

- La température superficielle d'un revêtement varie en fonction de la température de l'air et de la radiation solaire.
- Le réchauffement d'une surface par rapport à la température de l'air s'explique principalement par l'absorption de radiation solaire durant la période de dégel.
- L'albédo d'un revêtement a une influence directe sur sa température superficielle.
- L'effet d'une variation de l'albédo sur la température superficielle est plus marqué durant la période de dégel en raison de la radiation solaire plus importante et de l'effet du couvert de neige qui homogénéise l'albédo des différentes surfaces durant la période de gel.
- L'albédo a une influence importante sur les températures maximales des revêtements, mais une influence négligeable, voire nulle, sur les températures minimales.
- Enfin, les données provenant de Beaver Creek ne permettent pas d'observer l'impact de l'évolution de l'albédo d'un revêtement routier sur sa température superficielle.

5 Modèle de calcul des températures superficielles des revêtements routiers

5.1 Introduction

Plusieurs modèles permettent de calculer les températures superficielles des revêtements routiers. Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de développer un modèle simplifié afin d'offrir des outils de calcul simple à utiliser. La complexité des modèles existants et l'absence d'outils de calcul rapide à utiliser poussent souvent les concepteurs à faire appel à des paramètres empiriques qui ne sont pas toujours bien adaptés aux problématiques étudiées. Le modèle proposé ici a pour avantage de faire appel à un nombre très limité de variables tout en s'adaptant bien à différentes conditions climatiques. Il s'agit d'une simplification du modèle proposé par Hermansson (2001, 2004). De plus, dans le cadre de ce projet, seulement les températures superficielles sont calculées, l'analyse de la profondeur de pénétration du front de dégel sous la surface du revêtement permettra d'évaluer l'efficacité des revêtements à albédo élevé comme technique de mitigation.

Dans ce chapitre, les équations constitutives du modèle seront d'abord présentées. Par la suite, le modèle sera validé à l'aide des données provenant du site expérimental de Beaver Creek. Les différents outils développés à l'aide du modèle seront expliqués. Ces outils incluent des abaques de calcul et un utilitaire de calcul simple. Par la suite, la pénétration du front de gel et de dégel sous les revêtements sera analysée. Enfin, une brève analyse de l'évolution de l'albédo suite à la dégradation des revêtements sera effectuée.

5.2 Équations constitutives et paramètres d'utilisation

Tel que mentionné précédemment, la plupart des équations et des coefficients utilisés proviennent du modèle proposé par Hermansson (2001, 2004) qui se base sur le modèle de Solaimanian et Kennedy (1993). Le bilan d'énergie à la surface d'un revêtement routier a déjà été présenté à la section 2.6 de ce document. Ce bilan constitue la base du modèle.

5.2.1 Bilan d'énergie simplifié

Le bilan d'énergie à la surface du revêtement est exprimé par l'équation 5.1. Cette équation inclut les échanges de chaleur dus à la radiation solaire, à la radiation infrarouge, à la convection à la surface et à la conduction sous le revêtement. Chacun de ces flux de chaleur sera traité séparément dans ce chapitre. Les simplifications apportées au modèle original et les paramètres servant au calcul de chacun des flux seront présentés.

Équation 5.1: Bilan d'énergie simplifié à la surface d'un revêtement

$$0 = q_s + q_e + q_c + q_g$$

Avec,

$q_s = \text{bilan entre la radiation solaire réfléchi et incidente}$

$q_e = \text{bilan entre la radiation infrarouge émise par la surface et émise par l'atmosphère}$

$q_c = \text{convection}$

$q_g = \text{conduction vers le sol}$

5.2.2 Radiation solaire

La radiation solaire représente la principale source d'énergie absorbée par la surface d'un revêtement routier. Le flux associé à la radiation solaire est décrit par l'équation 5.2. Tel que décrit précédemment, l'albédo représente le potentiel de réflexion d'une surface par rapport à la radiation incidente. Ainsi, l'albédo détermine la quantité de radiation solaire absorbée par la surface et joue donc un rôle primordial dans le calcul de la température d'une surface. La section 5.4 de ce document présente des équations simples permettant de calculer la radiation solaire incidente à partir de la latitude.

Équation 5.2 : Flux de chaleur dû à la radiation solaire

$$q_s = (1 - a)q_i$$

Avec,

$a = \text{albédo}$

$q_i = \text{radiation solaire incidente, [W/m}^2\text{]}$

Albédo

La méthode afin de mesurer l'albédo d'une surface avec un pyranomètre sera décrite en détail au chapitre 6. Comme l'objectif principal du modèle est de déterminer les gains thermiques qui peuvent être réalisés en utilisant des surfaces ayant des valeurs d'albédo différentes une attention particulière a été portée à ce paramètre tout au long de l'élaboration du modèle.

Il est possible de faire varier l'albédo en fonction des conditions de surfaces variables au cours de l'année. Tout d'abord, l'eau a un impact sur l'albédo d'une surface. Les effets de l'eau sur la chaussée étant ignorés dans le modèle, la variation de l'albédo lorsque la surface est mouillée n'est pas prise en compte. Pour la plupart des types de revêtement, l'albédo diminue lorsque la surface est mouillée ce qui entraîne une augmentation de la radiation solaire absorbée et une augmentation de température. L'augmentation de l'albédo des revêtements routiers lorsqu'ils sont mouillés s'explique par l'augmentation de l'indice de réfraction qui augmente lorsque les particules des revêtements sont entourées d'eau et non d'air. Ainsi, la radiation réfléchi par la particule a plus de

difficulté à sortir du film d'eau entourant celle-ci et entre en contact plus souvent avec la particule augmentant ainsi la chance qu'elle soit absorbée par celle-ci (Twomey et coll., 1985). Par contre, l'évaporation de l'eau entraîne une diminution de la température de surface en raison de la chaleur latente absorbée lors de l'évaporation de l'eau. Ainsi, il est possible de considérer que ces deux flux s'annulent et qu'il est justifié de les ignorer simultanément (Hermansson, 2004).

De plus, l'albédo de surface durant la période hivernale n'est pas la même que durant l'été. Cette variation due à la présence d'un couvert partiel de glace et de neige à la surface de la chaussée peut être considérée par le modèle. Hermansson (2004) propose d'utiliser un albédo de 0,40 pour les surfaces revêtues d'enrobé bitumineux durant la période hivernale. L'albédo de surface l'été utilisé par Hermansson est de 0,14 pour un enrobé bitumineux. Comme l'objectif de ce projet est d'évaluer la performance thermique des surfaces en fonction de leur albédo, il est logique de faire varier l'albédo d'hiver en fonction de l'albédo de la surface l'été.

Des observations faites sur les routes du Yukon et les valeurs proposées par Hermansson permettent d'évaluer qu'environ 40% de la surface est couverte de neige durant l'hiver. L'albédo de la neige est d'environ 0,80. (Marvart et Castaner, 2003) Ainsi, Il est possible de déterminer l'albédo durant l'hiver en fonction de l'albédo de la surface durant l'été grâce à l'équation 5.3.

Équation 5.3: Relation entre l'albédo d'été et l'albédo d'hiver

$$a_{hiver} = 0,6 \cdot a + 0,4 \cdot a_{neige} = 0,6 \cdot a + 0,4 \cdot 0,8$$

Comme la radiation solaire incidente est très faible durant l'hiver au site utilisé pour la validation du modèle, l'effet de la variation de l'albédo durant l'hiver sur les températures superficielles est négligeable et il est difficile d'évaluer si la corrélation de l'équation 5.3 est adéquate. De plus, le couvert de neige sur la route est fonction de la circulation automobile et des opérations de déneigement. Par exemple, la surface des pistes d'atterrissage pavées est broyée et dégalcé régulièrement. Afin d'améliorer la précision de la valeur d'albédo d'hiver utilisé dans le modèle, il serait nécessairement de développer une corrélation considérant l'ensemble des facteurs ayant une influence sur l'albédo d'hiver. La radiation solaire durant la période hivernale est très limitée en contexte nordique. Ainsi, faire varier l'albédo durant l'hiver n'a pas un impact important sur les températures superficielles. Par contre, la radiation solaire augmente rapidement au printemps. Il peut être judicieux d'utiliser un albédo constant durant l'année ce qui entraîne une légère sous-estimation des températures superficielles calculées durant l'hiver.

Il est possible d'utiliser une valeur d'albédo d'hiver différente de la valeur d'été lors de l'utilisation du modèle. Hermansson (2004) propose de faire varier l'albédo entre les conditions d'été et d'hiver en fonction des variations quotidiennes de la radiation solaire et de la température de l'air. Ainsi, les

variations ponctuelles des conditions de surface durant les redoux hivernaux et durant les périodes transitoires entre les périodes de gel et de dégel sont prises en compte. Afin de simplifier le modèle, la valeur mensuelle moyenne de la température de l'air est le seul paramètre utilisé. Les conditions climatiques peuvent être dites hivernales lorsque la température mensuelle moyenne de l'air du mois courant et du mois suivant se trouve sous 0 °C. Ainsi les conditions d'hiver sont en vigueur dès le premier mois de la période de gel jusqu'à l'avant-dernier mois de la période de gel. Le dernier mois de la période de gel peut être considéré comme une période de dégel et ce sont les conditions d'été qui prévalent comme il a été démontré au chapitre 4.

5.2.3 Radiation infrarouge

Le bilan des échanges de chaleur dus à la radiation infrarouge est décrit par l'équation 5.4.

Équation 5.4 : Flux de chaleur dû à la radiation infrarouge

$$q_e = \sigma(\varepsilon_s T_s^4 - \varepsilon_{ciel} T_a^4)$$

Avec

$$\varepsilon_s = \text{émissivité de la surface}$$

$$\varepsilon_{ciel} = \text{émissivité du ciel}$$

$$T_s = \text{température de surface, [Kelvin]}$$

$$T_a = \text{température de l'air, [Kelvin]}$$

Émissivité

Les paramètres d'émissivité de la surface (ε_s) et d'émissivité du ciel (ε_{ciel}) sont définis par défaut dans le modèle. Ainsi l'émissivité de la surface est fixée à 0,85. Alors que l'émissivité du ciel qui est fonction du couvert nuageux est de 0,70 lorsque la température de l'air est supérieure à 0 °C et de 0,75 lorsque la température de l'air est inférieure à 0 °C. Ces valeurs sont proposées par Hermansson. Les utilisateurs expérimentés peuvent utiliser des valeurs d'émissivité différentes de celles proposées par défaut.

5.2.4 Convection

Le bilan des échanges de chaleur par convection entre l'air et la surface est décrit par l'équation 5.5.

Équation 5.5 : Bilan de chaleur dû à la convection

$$q_c = h_c(T_s - T_a)$$

Avec,

$$T_s = \text{température de surface, [Kelvin]}$$

$$T_a = \text{température de l'air, [Kelvin]}$$

Coefficient de convection

Le coefficient de convection (h_c) utilisé dans ce modèle est décrit par l'équation 5.6 et prend en compte la convection libre et la convection forcée due principalement au vent. (Solaimanian et Kennedy, 1993) Afin de simplifier le modèle d'Hermansson, les coefficients « a » et « d » qui contrôlent respectivement la convection libre et la convection forcée utilisées sont ceux qu'Hermansson propose pour la période estivale. Hermansson utilise des coefficients différents pour la période hivernale pour tenir compte de la variation de l'intensité de la convection libre et forcée. Le coefficient « a » est donc fixé à 1,1, alors que le coefficient « d » est fixé à 0,5.

Équation 5.6: Coefficient de convection

$$h_c = 698,24a \left[0,00144 \left(\frac{T_s + T_{air}}{2} \right)^{0,3} U^d + 0,00097 |T_s - T_{air}|^{0,3} \right]$$
$$h_c = 1,106 \left(\frac{T_s + T_{air}}{2} \right)^{0,3} U^{0,5} + 0,745 |T_s - T_{air}|^{0,3}$$

Avec,

$$U = \text{Vitesse du vent, [m/s]}$$

$$T_s = \text{température de surface, [Kelvin]}$$

$$T_{air} = \text{température de l'air, [Kelvin]}$$

5.2.5 Conduction

Les échanges de chaleur dus à la conduction sous la surface du revêtement sont les plus complexes à modéliser. Afin de simplifier le modèle, il est nécessaire de modéliser le flux dû à la conduction en utilisant une approche différente de celle d'Hermansson. Sutton (1953) a estimé que le flux de chaleur transmis au sol est égal à 10% du flux radiation solaire incidente à une surface à partir de données récoltées sur plusieurs planches d'essai. Berg (1985) a redéfini cette relation en incluant l'albédo de la surface dans la relation et suggère que 11 % de la radiation solaire absorbée par la surface est transmise au sol par conduction. L'utilisation de la radiation solaire comme paramètre pour évaluer la conduction contribue grandement à simplifier le modèle. Cependant, il est seulement possible d'utiliser cette méthode de calcul durant l'été, car durant l'hiver le flux de chaleur se renverse et il n'est plus fonction de la radiation solaire.

En se basant sur la relation proposée par Berg, la méthode proposée ici est d'estimer le flux de conduction à l'aide d'une fonction sinusoïdale ayant une période d'un an et une amplitude de 11 % de la radiation absorbée mensuelle moyenne maximale. D'après les données de la planche d'essai de Beaver Creek, l'intensité maximale du flux de conduction vers le sol se situe durant le premier mois de la période de dégel, donc durant le premier mois durant lequel la température moyenne de l'air est supérieure à 0 °C. L'équation 5.7 présente le flux de chaleur de conduction pour les régions nordiques alors que le dégel débute typiquement au mois de mai. L'équation 5.7 représente le flux

directement à la surface du revêtement et ne représente pas le flux de chaleur transmis au sol plus en profondeur.

Équation 5.7: Flux de chaleur dû à la conduction

$$q_g = 0,11q_a \sin\left(\frac{(m-2)\pi}{6}\right)$$

Avec

$$m = \text{nombre du mois (janvier} = 1 \text{ et décembre} = 12)$$

Le flux thermique de conduction varie en fonction des propriétés géothermiques des matériaux constituant le remblai. En modélisant le flux de conduction vers le sol par interpolation sinusoïdale, l'inertie thermique du sol et la chaleur latente de changement de phase de l'eau sont partiellement prises en compte durant la période de gel et au début du dégel au printemps. Afin d'améliorer la précision du modèle, il serait nécessaire que l'interpolation sinusoïdale puisse intégrer les propriétés géothermiques du sol. L'ajout de paramètres aurait cependant pour effet d'alourdir le modèle.

Afin de valider l'équation 5.7, les flux de chaleur par conduction vers le sol ont été calculés à l'aide des données de températures mesurées par des thermistances se trouvant sous le centre du revêtement de la section d'essai témoin de traitement bitumineux de surface au site expérimental de Beaver Creek pour les années 2010 et 2011. Le gradient thermique a été mesuré à l'aide de thermistances se trouvant à 0,3 et 1,7 mètre sous la surface. La conversion en flux a été effectuée en utilisant les valeurs de conductivités thermiques mesurées pour les matériaux de remblais de Beaver Creek. (De Grandpré, 2001) La conductivité thermique utilisée pour le sol gelé est de 1,337 W/m°C et la conductivité du sol utilisée pour le sol non gelé est de 0,907 W/m°C.

Le tableau 5.1 et la figure 5.1 présentent les flux mesurés avec les thermistances et ceux calculés à l'aide de l'équation 24 avec une radiation solaire incidente de 244,25 W/m². Cette valeur de radiation solaire incidente maximale provient des données climatiques récoltées à Beaver Creek durant l'année 2012. Pour un albédo du traitement de surface de 0,14, la radiation solaire absorbée maximale est donc de 212,5 W/m².

Tableau 5.1: Flux de conduction au site de Beaver Creek

	Gradient thermique (2010)	Flux (2010)	Gradient thermique (2011)	Flux (2011)	Flux modélisé
	[°C/m]	[W/m ²]	[°C/m]	[W/m ²]	[W/m ²]
Janvier	-7,42	-6,7	-7,55	-6,8	-11,5
Février	-3,12	-2,8	-4,86	-4,4	0,0
Mars	-0,13	-0,1	-1,81	-1,6	11,5
Avril	5,32	7,1	5,03	6,7	20,0
Mai	8,46	11,3	7,92	10,6	23,1
Juin	7,04	9,4	5,76	7,7	20,0
Juillet	5,52	7,4	4,25	5,7	11,5
Août	3,66	4,9	2,66	3,6	0,0
Septembre	-1,06	-1,0	0,46	0,6	-11,5
Octobre	-4,50	-4,1	-2,94	-2,7	-20,0
Novembre	-6,39	-5,8	-8,07	-7,3	-23,1
Décembre	-10,27	-9,3	-4,88	-4,4	-20,0

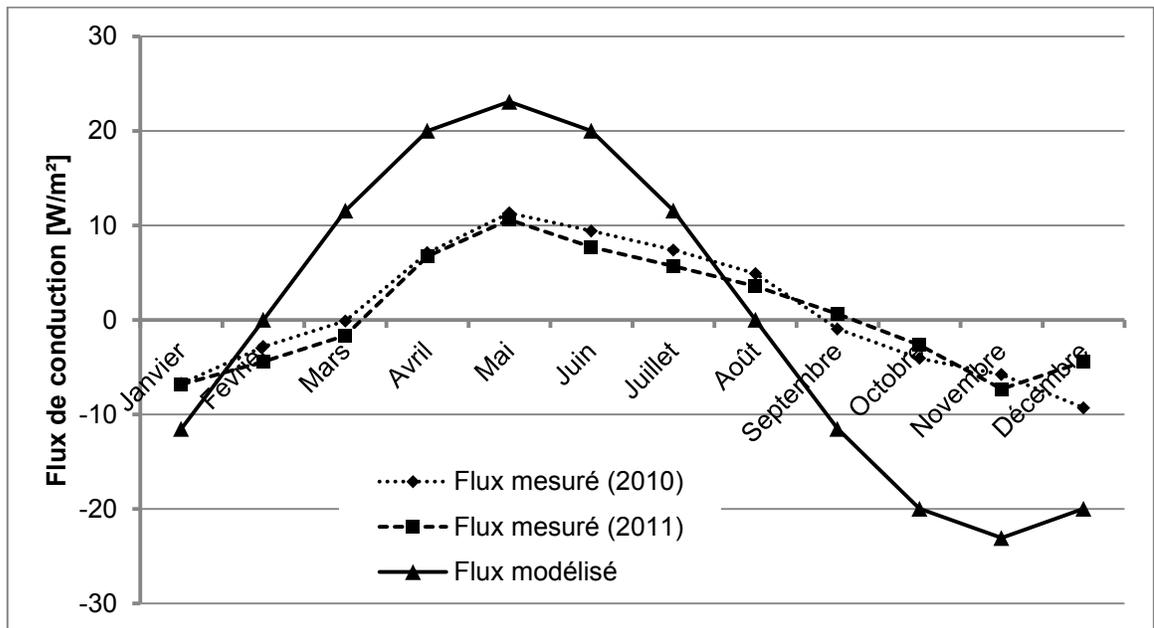


Figure 5.1: Flux de conduction vers le sol pour la section témoin du site de Beaver Creek

La comparaison des flux mesurés au flux modélisé permet de constater que la tendance est bonne. Par contre, l'amplitude du flux thermique modélisé est grandement supérieure à l'amplitude des flux mesurés par les thermistances. Cette différence s'explique en partie par la profondeur à laquelle les flux sont mesurés. En effet, comme les thermistances se trouvent à une profondeur moyenne de 1 m, une partie de l'énergie transmise au sol est donc absorbée par le sol en surface et l'amplitude

du flux thermique diminue donc en profondeur. De plus, les valeurs de conductivités thermiques proposées par De Grandpré (2001) sont relativement faibles ce qui peut expliquer pourquoi les flux modélisés sont plus faibles. Elles ont été utilisées, car il s'agit des seules valeurs mesurées disponibles. Même si l'équation 5.7 est une approximation, elle sera tout de même utilisée pour valider de modèle, car il s'agit d'une façon simplifiée d'obtenir le flux de conduction. En effet, lorsque le flux de conduction est calculé en ne tenant compte ni des propriétés géothermiques du sol ni des données quotidiennes voir horaires même les équations plus complexes de calcul des flux de conduction devient des approximations. De plus, en utilisant ces équations plus complexes il est nécessaire de fournir des données supplémentaires. L'équation 5.7, bien qu'imparfaite, a comme principal avantage de ne nécessiter aucune donnée supplémentaire. Une discussion sur l'influence de la conduction sur la précision du modèle est présentée à la section 5.3.4.

5.2.6 Équation complète du modèle

En combinant les équations 5.2, 5.4, 5.5 et 5.7 et en considérant un bilan d'énergie nul, l'équation 5.1 prend la forme de l'équation 5.8.

Équation 5.8 : Équation complète du modèle simplifié

$$0 = (1 - a)q_i - \sigma(\varepsilon_s T_s^4 - \varepsilon_{ciel} T_a^4) - (T_s - T_a) \left[1,106 \left(\frac{T_s + T_a}{2} \right)^{0,3} U^{0,5} + 0,745 |T_s - T_{air}|^{0,3} \right] - 0,11(1 - a)q_i \sin\left(\frac{(m - 2)\pi}{6}\right)$$

5.3 Validation du modèle

Les données climatiques et les températures superficielles récoltées à la planche expérimentale de Beaver Creek ont servi à valider le modèle décrit dans la section précédente. Les paramètres utilisés pour la validation du modèle seront d'abord présentés. Ensuite, la validation du modèle en utilisant les données mensuelles et quotidiennes sera analysée. Enfin, l'effet de la conduction sur la précision du modèle sera brièvement analysé.

5.3.1 Paramètres utilisés pour la validation du modèle

Les paramètres utilisés pour la validation du modèle sont présentés au tableau 5.2. Pour la période de gel de 2012-2013, les valeurs d'albédo de l'été 2012 ont été utilisées. Ainsi, l'albédo des surfaces n'a pas été modifié avec l'équation 5.3 qui considère le couvert de neige à la surface du revêtement durant la période de gel. Comme la chaleur latente est ignorée dans le modèle, les températures de surface sont sous-estimées durant la période de gel. En conservant l'albédo d'été pour cette période, les températures superficielles augmentent légèrement ce qui offre une meilleure précision. Comme la radiation solaire à Beaver Creek durant la période de gel était très faible, la variation de l'albédo n'entraîne pas des variations de température très importantes. Pour

des latitudes correspondant au sud du Canada, la radiation solaire durant la période de gel est beaucoup plus importante et l'albédo a un impact plus important sur les températures superficielles durant cette période. Il est donc primordial de porter une attention particulière à la variation de l'albédo durant l'hiver pour les endroits où la radiation solaire hivernale est plus importante.

Les données sont disponibles du mois d'août 2012 au mois de juillet 2013. Ainsi, les données utilisées pour la validation du modèle comprennent presque une année complète, donc une période complète de gel (environ d'octobre 2012 à avril 2013) et deux périodes partielles de dégel (environ août et septembre 2012, et de mai à juillet 2013). La démarche ayant permis d'obtenir les valeurs d'albédo présentées au tableau 5.2 est décrite au chapitre 6.

Tableau 5.2 : Paramètres utilisés pour la validation du modèle

Année	Température de l'air	$a_{\text{enrobé}}$	$a_{\text{L-BST}}$	a_{Nippo}	a_{Lafrentz}	ϵ_s	ϵ_{ciel}
2012	$T_a > 0^\circ\text{C}$	0,04	0,23	0,40	0,55	0,85	0,70
	$T_a < 0^\circ\text{C}$	0,04	0,23	0,40	0,55	0,85	0,75
2013	$T_a < 0^\circ\text{C}$	0,04	0,23	0,40	0,55	0,85	0,75
	$T_a > 0^\circ\text{C}$	0,14	0,23	0,29	0,60	0,85	0,70

5.3.2 Validation avec les données mensuelles

Le modèle a tout d'abord été validé en utilisant les données mensuelles. La figure 5.2 présente les températures superficielles calculées à l'aide du modèle en fonction des températures superficielles mesurées. Une droite ayant une pente de 1 pour 1 est tracée sur le graphique et représente donc un modèle ayant une précision parfaite. La figure 5.3 présente l'écart entre les températures calculées et mesurées en fonction des températures mesurées. Il est donc possible d'y obtenir les écarts maximaux ainsi que de déterminer pour quelles plages de températures le modèle présente des lacunes de précision.

Ainsi, la figure 5.2 indique que le modèle est assez précis pour l'ensemble des températures. La figure 5.3 indique une surestimation maximale de +4 °C et une sous-estimation maximale de -7 °C. Les écarts sont distribués presque également de part et d'autre de l'axe de 0 °C. Ainsi, les températures sont légèrement surestimées ou sous-estimées, donc la moyenne des écarts se trouve près de 0 °C. Pour les températures superficielles mesurées inférieures à environ -18 °C, le modèle sous-estime systématiquement les températures.

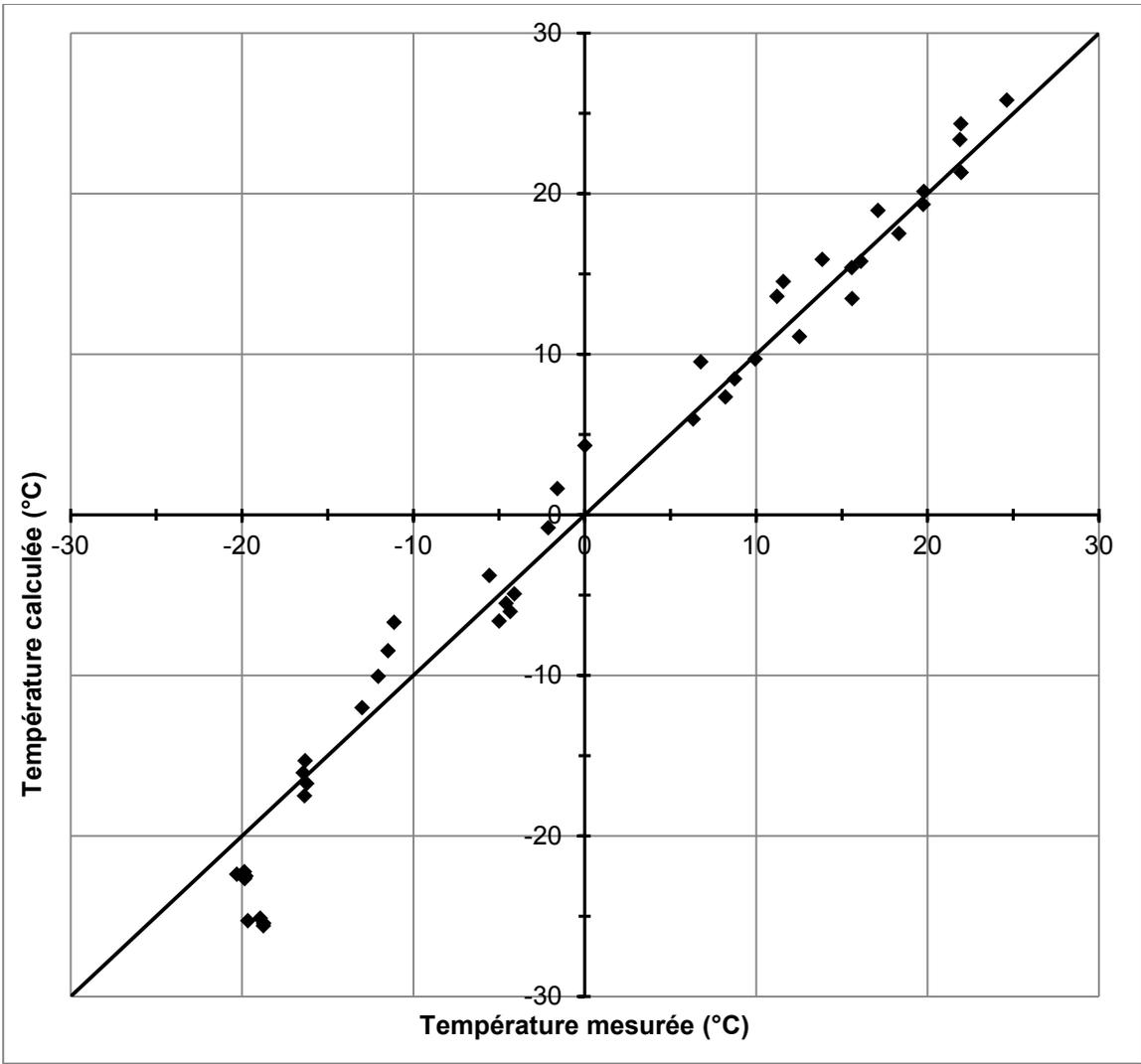


Figure 5.2 : Validation du modèle de calcul - valeurs mensuelles moyennes

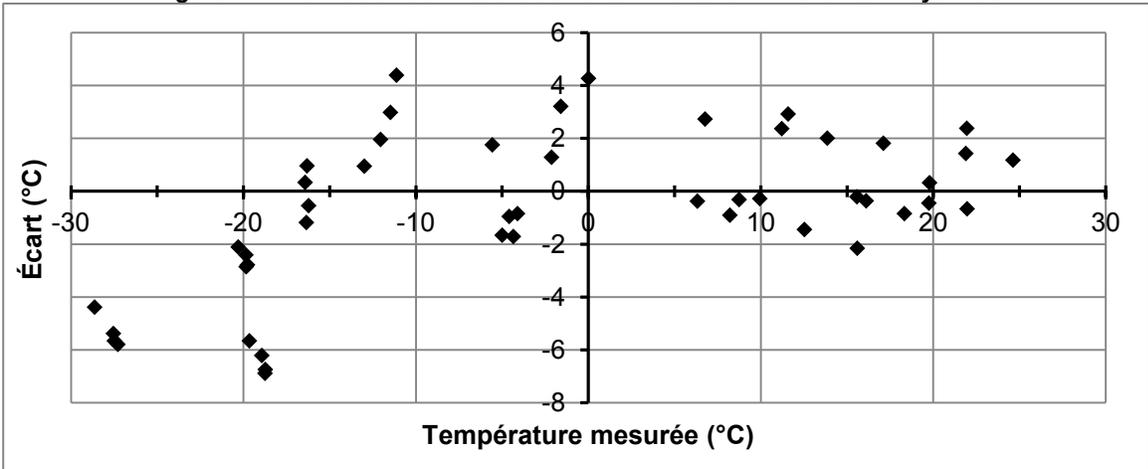


Figure 5.3 : Écart entre les températures calculées par le modèle et les températures mesurées - valeurs mensuelles moyennes

Enfin, le tableau 5.3 présente les indices mesurés et calculés de gel et de dégel de chacune des surfaces en plus de l'écart entre ces indices. Ainsi, le modèle offre une bonne précision pour calculer la plupart des indices. Par contre, il y a une surestimation importante des indices de gel pour les deux surfaces ayant l'albédo le plus élevé en raison de la sous-estimation des températures superficielles observés sur la figure 5.3.

Tableau 5.3 : Indices de gel et de dégel mesurés et calculés par le modèle à partir des valeurs mensuelles moyennes

		Enrobé	L-BST	Nippo	Lafrentz
Indice de gel [°C*jour]	Mesuré	2993	3135	3068	3227
	Calculé	2979	3145	3353	3605
	Écart	-14	11	285	378
Indice de dégel [°C*jour]	Mesuré	2340	2050	2019	1537
	Calculé	2387	2135	1985	1580
	Écart	47	86	-35	44

5.3.3 Validation avec les données quotidiennes

Le modèle a ensuite été validé en utilisant les données quotidiennes moyennes. La figure 5.4 présente les températures calculées à l'aide du modèle en fonction des températures mesurées. La figure 5.5 présente l'écart entre les températures calculées et mesurées en fonction des températures mesurées.

Ainsi, la figure 5.4 indique que le modèle est assez précis pour l'ensemble des températures, mais qu'il y a un étalement beaucoup plus important pour les données quotidiennes que pour les données mensuelles. La figure 5.5 indique qu'il y a une surestimation maximale de +10 °C et une sous-estimation maximale de -10 °C. Tout comme pour les données mensuelles, les écarts des données quotidiennes sont distribués presque également de part et d'autre de l'axe de 0 °C. La moyenne des écarts se trouve aussi près de 0 °C. Tout comme pour les données mensuelles, il y a une sous-estimation des températures calculées inférieures à environ -20 °C.

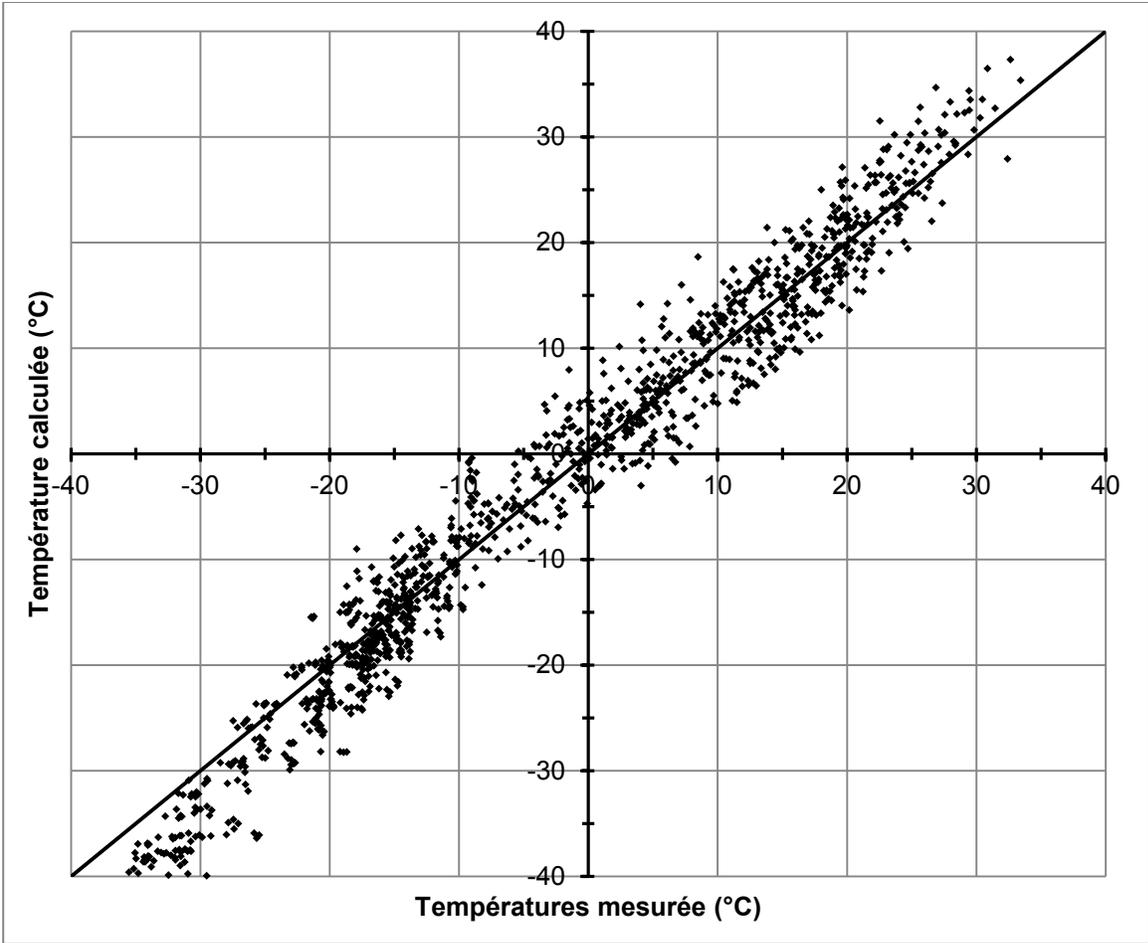


Figure 5.4: Validation du modèle de calcul - valeurs quotidiennes moyennes

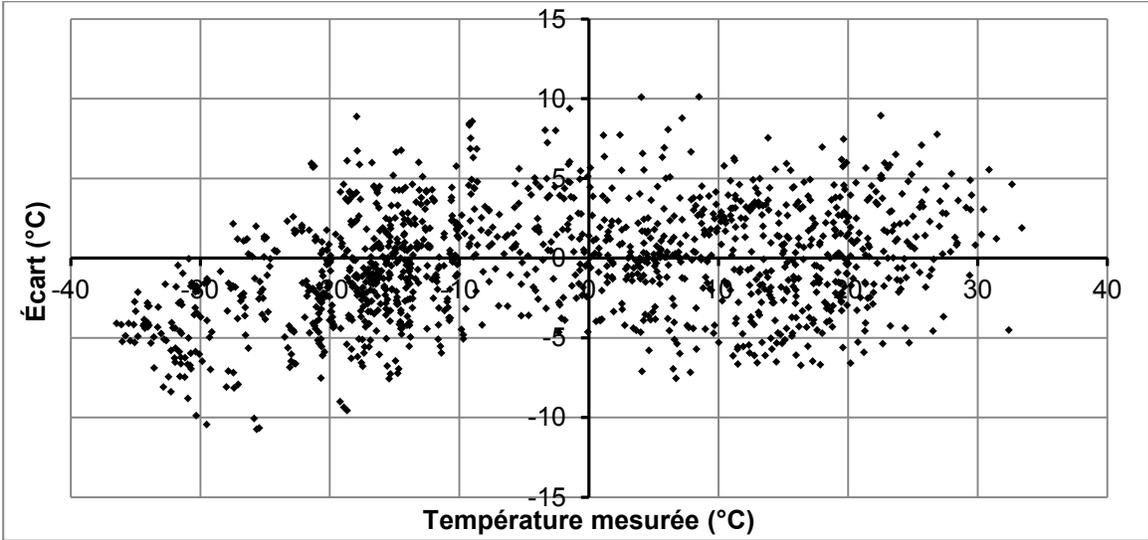


Figure 5.5: Écart entre les températures calculées par le modèle et les températures mesurées - valeurs quotidiennes moyennes

Enfin, le tableau 5.4 présente les indices mesurés et calculés de gel et de dégel de chacune des surfaces en plus de l'écart entre ces indices mesurés et calculés. Ainsi, le modèle offre une bonne précision pour calculer la plupart des indices lorsque des valeurs quotidiennes sont utilisées. Il y a une surestimation importante des indices de gel pour les deux surfaces ayant l'albédo le plus élevé lorsque ces indices sont calculés à partir des températures quotidiennes. De plus, il y a une surestimation plus importante des indices de dégel pour les deux surfaces ayant l'albédo le plus faible lorsque les valeurs quotidiennes sont utilisées.

Tableau 5.4: Indices de gel et de dégel mesurés et calculés par le modèle à partir des valeurs quotidiennes moyennes

		Enrobé	L-BST	Nippo	Lafrentz
Indice de gel [°C*jour]	Mesuré	3047	3166	3089	3231
	Calculé	3026	3205	3384	3623
	Écart	21	39	295	391
Indice de dégel [°C*jour]	Mesuré	2423	2103	2067	1563
	Calculé	2504	2249	2056	1621
	Écart	80	145	-11	58

5.3.4 Effet de la conduction sur la précision

Tel que discuté précédemment, la conduction représente un flux de chaleur complexe à modéliser à l'aide d'une équation simple. Il est donc primordial de porter une attention particulière à l'effet de la conduction sur la précision du modèle. Pour ce faire, la précision du modèle a été évaluée à l'aide des valeurs mensuelles moyennes en incluant et en excluant l'équation 5.7 qui modélise la conduction en fonction de la radiation solaire absorbée.

Le tableau 5.5 présente les indices de gel et de dégel pour chacune des surfaces de la planche de Beaver Creek. Les indices mesurés ainsi que calculés avec et sans conduction y sont présentés, ainsi que l'écart entre ces indices. En règle générale, la conduction permet à la chaleur accumulée par la surface de se transmettre vers le sol durant la période de dégel. Ainsi, la conduction a pour effet de refroidir la température de surface durant la période de dégel. Inversement, la conduction a pour effet de réchauffer la surface durant la période de gel. Ainsi, il est normal que les indices de gel et de dégel augmentent lorsque la conduction est ignorée. L'effet est plus marqué pour les indices de gel, car le bilan d'énergie est plus sensible aux petites variations de flux de chaleur.

Les indices de gel sont donc largement surestimés lorsque la conduction est ignorée. Une surestimation de l'indice de gel représente une estimation conservatrice lorsque ces indices sont utilisés pour les problématiques de pénétration du front de gel et de soulèvement au gel. Ainsi, l'utilisation du modèle pour calculer les indices de gel en ignorant la conduction entraîne un

dimensionnement sécuritaire. Si les indices de gel sont utilisés pour calculer le bilan entre l'absorption de chaleur durant l'été et l'évacuation de chaleur durant l'hiver, surestimer l'indice de gel peut avoir un effet néfaste sur la conception thermique d'un remblai.

Les indices de dégel sont aussi surestimés lorsque la conduction est ignorée. Une surestimation des indices de dégel a pour effet de surestimer la pénétration du dégel et permet donc de faire un dimensionnement conservateur. Comme les indices de dégel sont seulement légèrement surestimés, il peut donc être adéquat d'utiliser le modèle en ignorant la conduction afin de calculer les indices de dégel.

Tableau 5.5 : Indices de gel et de dégel mesurés et calculés, avec et sans conduction

		Enrobé		L-BST		Nippo		Lafrentz	
		Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans	Avec	Sans
Indice de gel [°C*jour]	Mesuré	2993	2993	3135	3135	3068	3068	3227	3227
	Calculé	2979	3279	3145	3385	3353	3506	3605	3704
	Écart	-14	286	11	250	285	438	378	477
Indice de dégel [°C*jour]	Mesuré	2340	2340	2050	2050	2019	2019	1537	1537
	Calculé	2387	2518	2135	2252	1985	2060	1580	1630
	Écart	47	178	86	202	-35	41	44	93

La figure 5.6 présente l'évolution des températures au cours de l'année pour la surface de Lafrentz. Le comportement de la surface de Lafrentz est représentatif des quatre surfaces de Beaver Creek. Les températures mesurées ainsi que les températures calculées avec et sans conduction y sont présentées. Les températures calculées sous 0 °C sont plus froides lorsque la conduction est ignorée alors que les températures calculées au-dessus de 0 °C sont plus chaudes lorsque la conduction est ignorée.

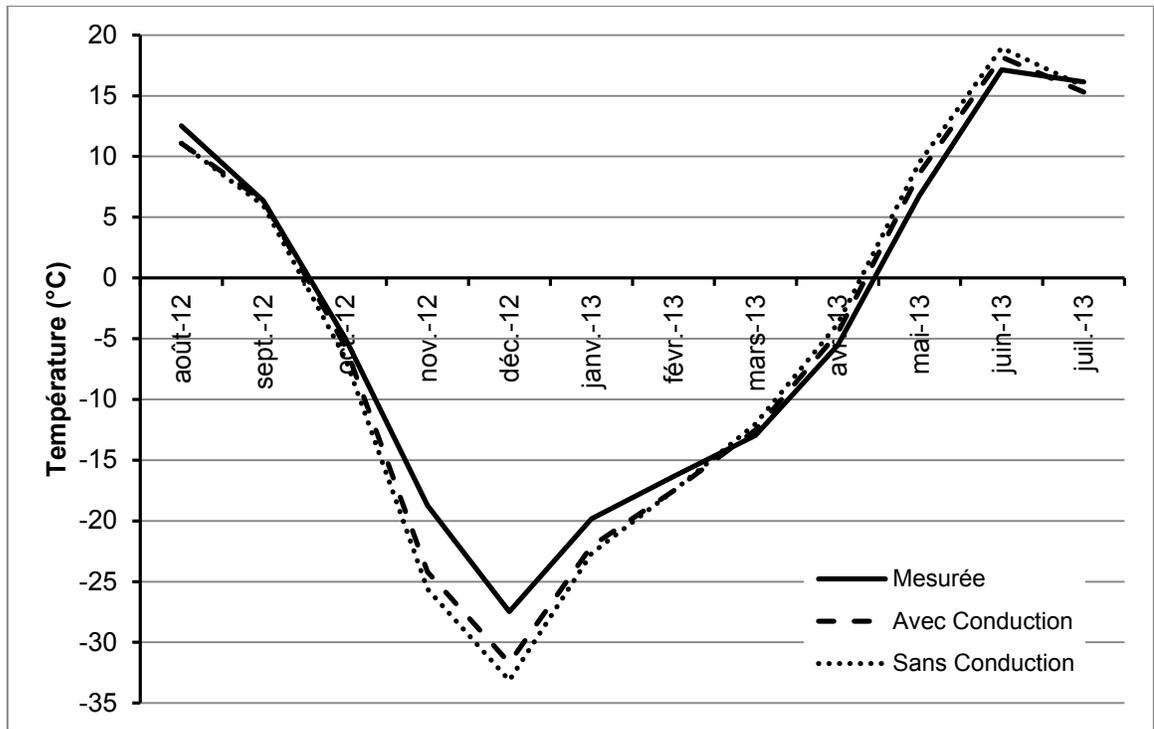


Figure 5.6 : Évolution des températures de la surface de Lafrentz pour les températures mesurées et pour les températures calculées avec et sans conduction

5.4 Utilisations du modèle

Il y a trois façons d'utiliser le modèle proposé : la résolution de l'équation 5.8, un utilitaire de calcul développé dans le cadre du projet et des abaques de calcul se basant sur le modèle. Pour utiliser le modèle, quatre paramètres sont nécessaires : la température de l'air, la vitesse du vent, la radiation solaire incidente au site et l'albédo de la surface. La radiation solaire incidente peut être obtenue en fonction de la latitude à l'aide d'équations. Cette méthode de calcul ainsi que les trois façons d'utiliser le modèle seront présentées dans cette section.

5.4.1 Calcul de la radiation solaire

La radiation solaire incidente à un endroit sur la surface de la Terre peut être calculée à l'aide d'une série d'équations et de paramètres géométriques.

La constante solaire (G_{sc}) représente la quantité d'énergie solaire atteignant une surface perpendiculaire au rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, c'est-à-dire la radiation extraterrestre. Cette constante est d'environ 1367 W/m^2 . (Iqbal, 1983)

La position du soleil par rapport à un plan horizontal à la surface de la Terre peut être exprimée à l'aide de différents angles. (Benford and Bock, 1939) La latitude (ϕ) représente l'emplacement angulaire au nord ou au sud de l'équateur, les angles au nord sont positifs. La latitude varie entre 90° et -90° . La déclinaison (δ) représente l'angle que forme le soleil à midi par rapport au plan de l'équateur, les angles au nord sont positifs. La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ et $23,45^\circ$. La déclinaison peut être calculée pour le $n^{\text{ième}}$ jour de l'année à l'aide de l'équation 5.9. (Cooper, 1969)

Équation 5.9: Déclinaison en fonction du jour de l'année

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right), [^\circ]$$

L'angle horaire (ω) représente le déplacement angulaire d'est en ouest dû à une rotation de la Terre de 15° par heure. L'angle ω_s représente l'angle horaire lors du coucher du soleil et peut être calculé à l'aide de l'équation 5.10 à partir de la latitude et de la déclinaison. (Duffie et Beckman, 2013) L'angle horaire du lever du soleil est la valeur négative de ω_s . Ainsi, le nombre d'heures d'ensoleillement maximal (N) peut être calculé à l'aide de l'équation 5.11. (Duffie et Beckman, 2013)

Équation 5.10: Angle horaire en fonction de la latitude et de la déclinaison

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\phi) \tan(\delta)$$

Équation 5.11: Nombre d'heures d'ensoleillement en fonction de l'angle horaire du lever du soleil

$$N = \frac{2}{15} \omega_s$$

L'équation 5.12 permet d'obtenir la radiation solaire incidente à une surface horizontale à la surface de l'atmosphère. (Duffie et Beckman, 2013)

Équation 5.12: Radiation solaire extraterrestre

$$G_0 = G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) (\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta))$$

L'équation 5.13 est obtenue en intégrant l'équation 5.12 pour la période de lever du soleil au coucher du soleil. Cette équation présente la radiation solaire extraterrestre moyenne pour une période de 24 heures. En remplaçant la déclinaison par l'équation 5.9 et l'angle du soleil au coucher du soleil par l'équation 5.10, la radiation solaire extraterrestre incidente est exprimée en fonction de la constante solaire, de la latitude et du $n^{\text{ième}}$ jour.

Équation 5.13: Radiation solaire quotidienne extraterrestre moyenne

$$\overline{G_0} = \frac{G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) (\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\phi) \sin(\delta))$$

Radiation solaire extraterrestre quotidienne

Pour obtenir la radiation solaire extraterrestre moyenne pour une journée de l'année en particulier, il suffit d'utiliser l'équation 5.13 pour n correspondant au nombre de la journée. Par exemple, le 1^{er} janvier, n est égal à 1; et le 31 décembre, n est égal à 365.

Radiation solaire extraterrestre mensuelle

Pour obtenir la radiation solaire extraterrestre moyenne pour un mois de l'année, l'équation 5.13 peut être résolue à l'aide des nombres de journées (n) présentés au tableau 5.6. Ces nombres correspondent aux valeurs moyennes de radiation solaire. Ces nombres permettent d'obtenir la radiation moyenne et non la radiation médiane; il ne s'agit donc pas de la journée se situant au milieu du mois.

Tableau 5.6: Nombre (n) correspondant à la radiation mensuelle moyenne (Klein, 1977)

Mois	n
Janvier	17
Février	47
Mars	75
Avril	105
Mai	135
Juin	162
Juillet	198
Août	228
Septembre	258
Octobre	288
Novembre	318
Décembre	344

Il est aussi possible d'utiliser la figure 5.7 pour obtenir la radiation solaire mensuelle moyenne pour les latitudes supérieures à 40°. L'équation 5.13 est applicable à toutes les latitudes, mais afin de rendre la figure 5.7 plus claire seulement les latitudes supérieures à 40° ont été présentées. Cette figure présente la radiation solaire extraterrestre incidente mensuelle moyenne en fonction de la latitude calculée avec l'équation 5.13 et les jours (n) du tableau 5.6.

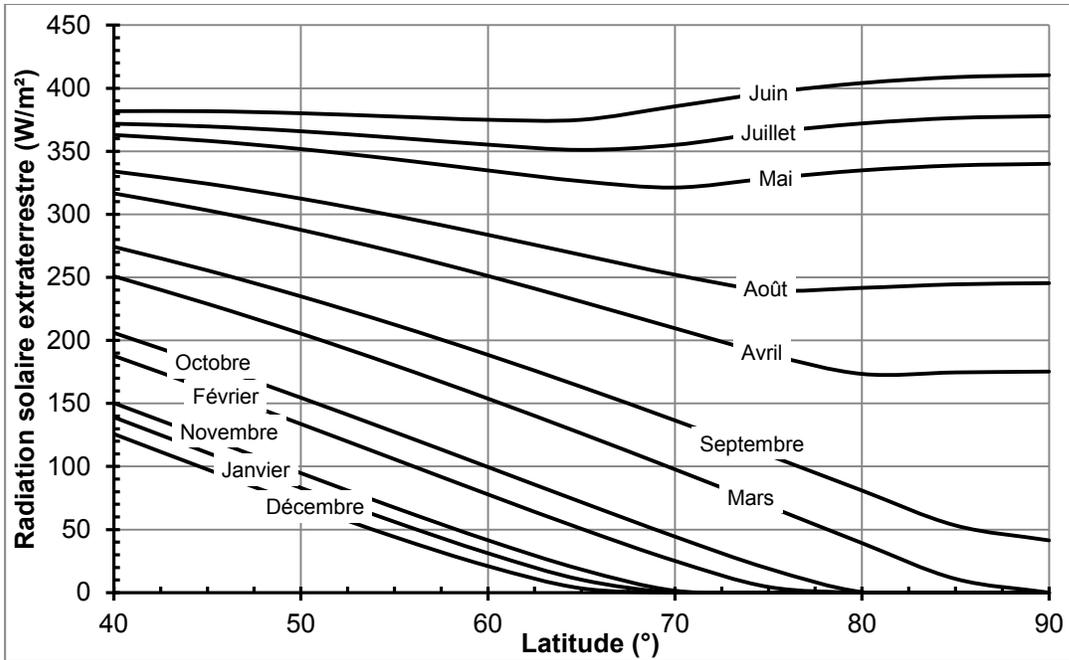


Figure 5.7 : Radiation solaire incidente extraterrestre moyenne mensuelle en fonction de la latitude

Radiation solaire incidente extraterrestre pour une période de temps donnée

Enfin pour obtenir la radiation quotidienne moyenne pour une certaine période de temps, il suffit d'intégrer l'équation 5.13 du début de la période à la fin de celle-ci en utilisant les valeurs de n correspondant au jour du début et de fin de la période et d'ensuite diviser la valeur obtenue par le nombre de jours de la période. Cette intégration est présentée à l'équation 5.14. Il est ainsi possible de calculer la radiation solaire incidente extraterrestre moyenne pour une période de dégel ou une période de gel en fonction du nombre de jours de la période et de la latitude. Par exemple, pour connaître la radiation moyenne du 1^{er} juin au 15 juillet, il suffit d'intégrer l'équation du jour $n=151$ au jour $n=196$.

Équation 5.14: Radiation solaire extraterrestre pour une période de temps définie

$$\overline{G_0} = \frac{\int_{n_{\text{début}}}^{n_{\text{fin}}} \left(\frac{G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) (\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin(\phi) \sin(\delta)) \right) dn}{n_{\text{fin}} - n_{\text{début}}}$$

Radiation solaire extraterrestre pour la période de gel ou de dégel

Pour obtenir la radiation solaire incidente extraterrestre moyenne durant la période de dégel, il est possible d'utiliser la moyenne des journées lors desquelles la radiation solaire extraterrestre est maximale pour une durée correspondant à cette période de dégel. Si par exemple, la période de dégel dure 150 jours, la moyenne de la radiation des 150 jours lors desquelles la radiation solaire quotidienne est la plus élevée durant l'année permet d'obtenir une estimation de la radiation solaire moyenne pour cette période de dégel. En utilisant les jours durant lesquels la radiation solaire est

maximale, la radiation solaire moyenne durant la période de dégel est légèrement surestimée. Il s'agit d'une estimation conservatrice pour les problématiques nordiques, car les températures superficielles seront ainsi surestimées. La figure 5.8 présente la radiation solaire moyenne en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de dégel. De manière similaire, il est possible d'obtenir la radiation solaire durant la période de gel à partir de la moyenne des journées lors desquelles la radiation solaire extraterrestre est minimale pour une durée correspondant à la période de gel. La figure 5.9 présente la radiation solaire moyenne en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de gel.

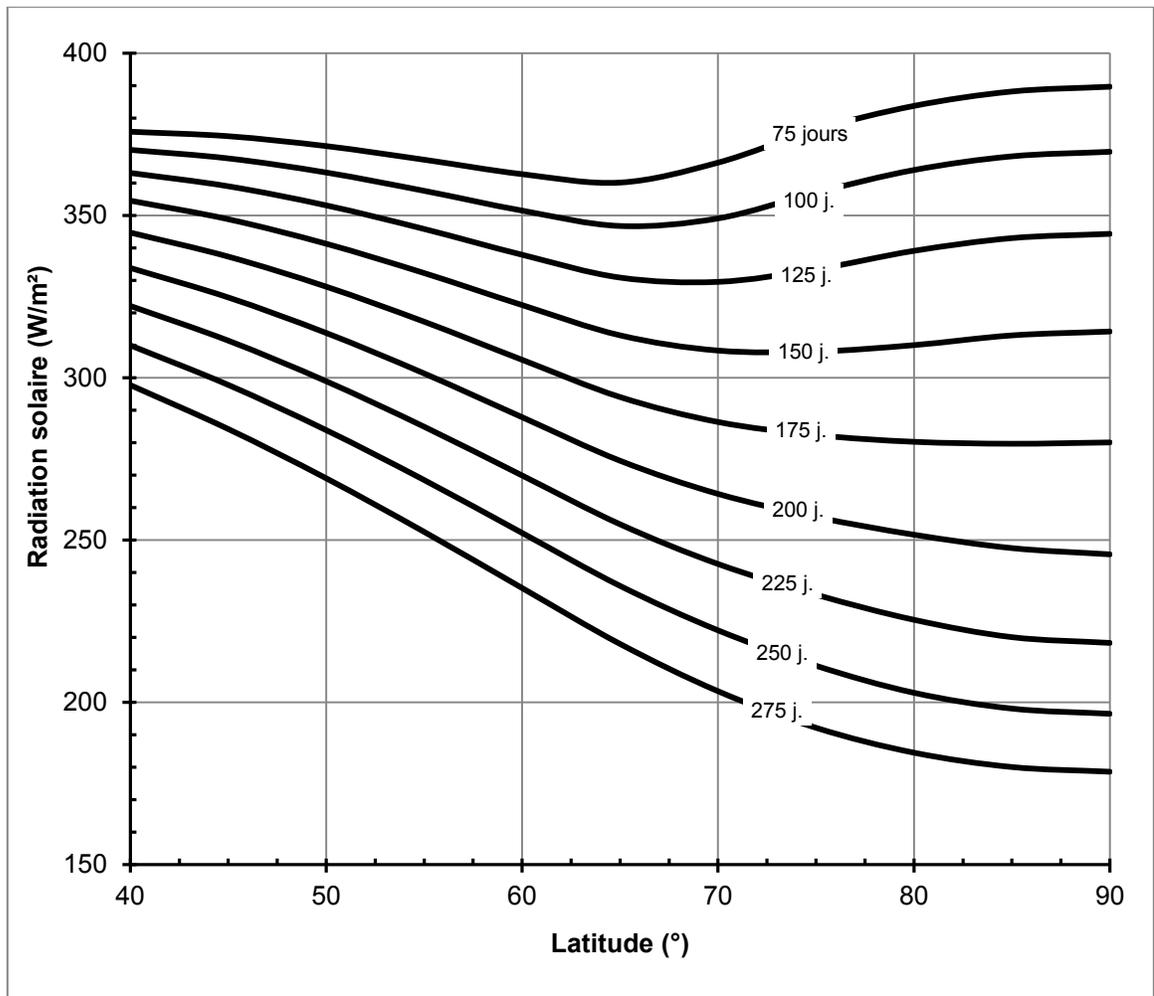


Figure 5.8: Radiation solaire extraterrestre en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de dégel

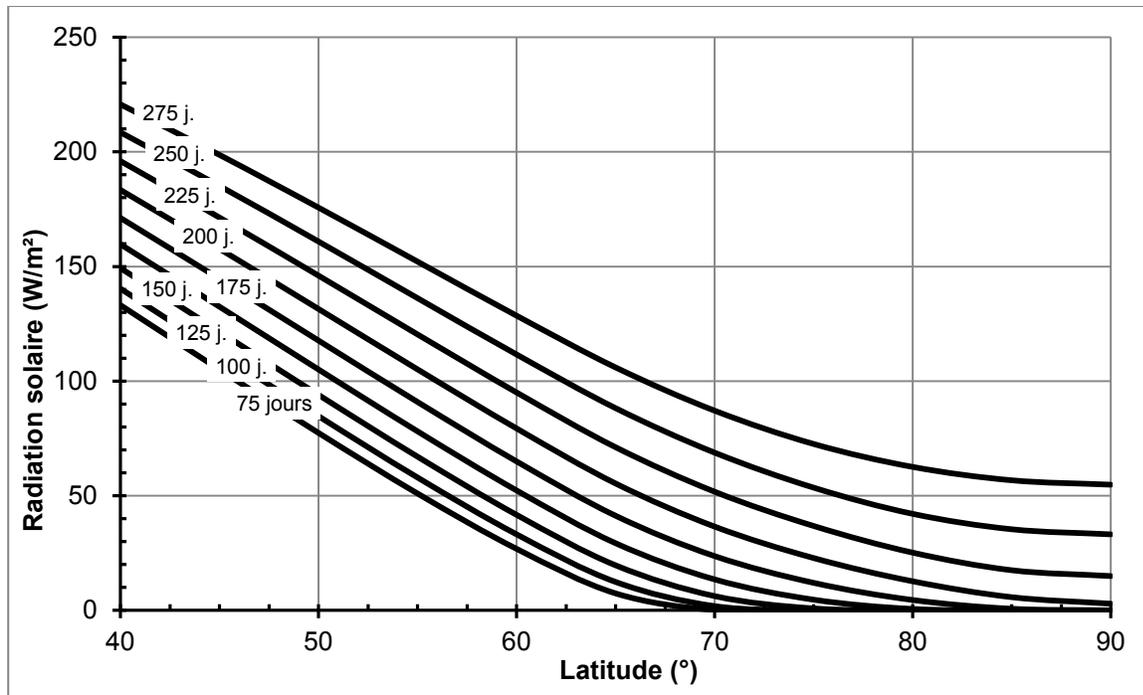


Figure 5.9: Radiation solaire extraterrestre en fonction de la latitude pour différentes durées de la période de gel

Radiation solaire à la surface de la Terre

Les équations et figures précédentes permettent d'obtenir la radiation solaire extraterrestre. La radiation solaire incidente à une surface se trouvant à la surface de la Terre est inférieure à cette valeur. En effet, une partie de la radiation est absorbée ou réfléchiée par l'atmosphère. La quantité de radiation solaire atteignant la surface de la Terre est surtout influencée par la quantité d'ennuagement. L'équation 5.15 permet donc de calculer la radiation solaire incidente à une surface à la surface de la Terre en fonction d'un facteur d'ennuagement. (Prescot, 1940) Cette équation est appelée relation de Angström-Prescott. Le facteur d'ennuagement n/N est calculé en divisant le nombre d'heures réel d'ensoleillement pour une journée par le nombre d'heures théoriques maximales d'ensoleillement possible pour cette journée. Le nombre N peut être calculé à l'aide de l'équation 5.11. Le facteur d'ennuagement est parfois disponible dans les données climatiques compilées par Environnement Canada. Il peut aussi être estimé ou obtenu par comparaison à l'aide de données climatiques de villes ayant un ennuagement similaire. Pour une estimation conservatrice, l'utilisation d'un facteur d'ennuagement plus élevé permet d'obtenir une surestimation de la radiation solaire incidente et une température superficielle plus élevée. Pour un facteur d'ennuagement de 1 correspondant à des conditions parfaitement dégagé en tout temps, la radiation solaire extraterrestre est tout de même réduite à 79 % de sa valeur initiale en raison de l'absorption des rayons par les gaz de l'atmosphère.

Équation 5.15: Radiation solaire à la surface de la Terre en fonction du facteur d'ennuagement

$$\bar{G} = \bar{G}_0 \left(0,25 + 0,54 \frac{n}{N} \right)$$

5.4.2 Résolution des équations

La première façon d'utiliser le modèle est de résoudre directement l'équation 5.8 complète du modèle. Pour ce faire, une méthode de calcul par itérations doit être utilisée afin de résoudre l'équation et d'obtenir la température de surface. Un logiciel tableur ayant un outil de résolution d'équations peut être utilisé, par exemple le complément *Solver* du logiciel *Excel*. Des logiciels de calcul tels que Maple ou Matlab peuvent aussi être utilisés.

Pour un utilisateur ayant une bonne compréhension du bilan d'énergie à la surface, la résolution de l'équation 5.8 lui permet d'apporter des modifications aux différentes variables du modèle. Ainsi, il est possible d'adapter le modèle pour différentes situations.

5.4.3 Utilitaire de calcul

Pour un utilisateur peu expérimenté, il peut être complexe d'utiliser directement l'équation 5.8 et d'y apporter des modifications. Pour faciliter l'utilisation du modèle, un utilitaire de calcul a été développé dans le cadre du projet. Cet utilitaire est supporté par le logiciel *Excel*. Il s'agit d'un utilitaire simple permettant d'obtenir rapidement les températures superficielles. I

il n'est pas possible de faire des modifications aux paramètres de l'équation 5.8. La figure 5.10 montre une capture d'écran de la version française de l'utilitaire. Une version anglaise est aussi disponible. Une description complète de l'utilitaire et un bref guide d'utilisation se trouvent en annexe B. L'utilitaire permet de comparer les températures superficielles de deux surfaces ayant des valeurs différentes d'albédo sous les mêmes conditions climatiques. Un graphique simple permet de visualiser l'évolution des températures superficielles et de la température de l'air au cours d'une année. Un onglet additionnel explique la démarche de calcul de la radiation solaire incidente et comprend un utilitaire simple afin de calculer la radiation solaire incidente à partir de la latitude et du facteur d'enneuagement.

ARQULUK - Calcul des températures superficielles des revêtements routiers

Mode d'emploi	Données à saisir		Albédo surface A	Albédo surface B	
	Données calculées				
			0,05	0,4	
	Radiation solaire [W/m ²]	Vitesse du vent [km/h]	Température de l'air [°C]	Température surface A [°C]	Température surface B [°C]
Janvier	6,9	2,4	-20,0	-20,8	-21,0
Février	34,9	1,0	-15,9	-16,2	-17,2
Mars	106,3	3,0	-13,0	-9,8	-12,1
Avril	187,1	5,0	-7,5	1,9	-3,3
Mai	250,0	1,0	6,2	23,2	14,5
Juin	280,0	5,2	15,0	28,4	21,6
Juillet	180,3	1,4	14,0	24,1	18,0
Août	154,9	1,2	11,2	20,7	15,3
Septembre	95,5	2,0	7,0	12,0	8,7
Octobre	27,9	2,4	-7,3	-6,2	-6,8
Novembre	6,6	5,5	-22,1	-21,6	-21,7
Décembre	2,6	1,4	-29,7	-29,4	-29,4
	Indice de gel (°C*jour)		3503	3153	3381
	Indice de dégel (°C*jour)		1633	3376	2393

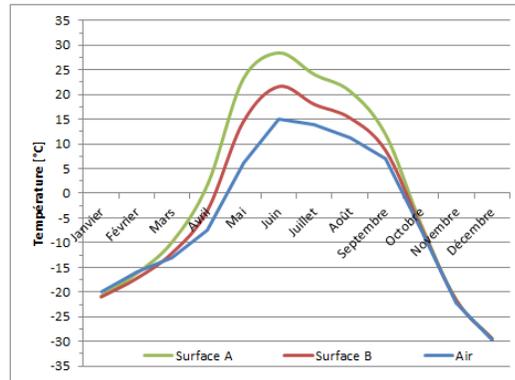


Figure 5.10: Capture d'écran de l'utilitaire de calcul des températures superficielles des revêtements routiers

5.4.4 Abaques de calcul

Enfin, des abaques de calcul ont été produits à l'aide du modèle. Ces abaques sont simples et rapides à utiliser et permettent de déterminer efficacement les températures superficielles des revêtements routiers. Pour utiliser ces abaques, il suffit de suivre les étapes suivantes :

- 1- **Calculer la radiation solaire absorbée** par la surface avec l'équation 5.16.

Équation 5.16: Radiation solaire absorbée par une surface

$$q_a = (1 - a)q_i$$

- 2- **Obtenir l'indice de radiation non corrigé (IR) à l'aide des abaques** en fonction de la radiation solaire absorbée. Les abaques peuvent être utilisés pour calculer l'indice de radiation quotidien en utilisant la température moyenne quotidienne de l'air, pour calculer l'indice de radiation mensuel en utilisant la température moyenne mensuelle de l'air ou pour une période de dégel ou de gel en utilisant la température moyenne calculée à l'aide de l'équation 5.17.

Équation 5.17: Température moyenne de l'air à partir de l'indice de dégel ou de gel de l'air

$$T_a = \frac{ID_a}{t} \text{ ou } T_a = \frac{IG_a}{t}$$

Avec

t=nombre de jours de la période de gel ou de dégel

- a. Lorsque la température moyenne de l'air est supérieure à 0 °C, utiliser l'abaque de la figure 5.11.
 - b. Lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0 °C, utiliser l'abaque de la figure 5.12.
- 3- **Obtenir les facteurs de correction (ΔIR).**
 - a. **Pour la vitesse du vent (ΔIR_v)**, utiliser la section centrale des abaques en utilisant la courbe correspondant à la vitesse moyenne du vent.

- b. **Pour la conduction (ΔIR_q)**, utiliser la section inférieure des abaques en utilisant la courbe correspondant à la vitesse moyenne du vent.

Note : Le facteur de correction pour la conduction est facultatif. Il améliore la précision des calculs. Une discussion complète de l'impact de la conduction et des paramètres utilisés pour modéliser la conduction pour les abaques est disponible à la section 7.2 de ce document.

- 4- **Calculer l'indice de radiation totale** de la surface avec l'équation 5.18. Pour un indice quotidien, le nombre de jours t est égal à l'unité; pour un indice mensuel, le nombre de jours t est égal au nombre de jours du mois; pour un indice d'une période de gel ou de dégel, le nombre de jours t est égal à la durée de la période.

Équation 5.18: Indice de radiation totale

$$IR_D \text{ ou } IR_G = (IR + \Delta IR_U + \Delta IR_q)t$$

- 5- **Calculer l'indice de dégel de la surface** à l'aide de l'équation 5.19 **ou l'indice de gel de la surface** à l'aide de l'équation 5.20.

Équation 5.19: Indice de dégel de la surface

$$ID_s = ID_a + IR_D$$

Équation 5.20: Indice de gel de la surface

$$IG_s = IG_a - IR_G$$

Note : Pour obtenir la température moyenne de la surface, il suffit de diviser l'indice de dégel ou de gel obtenu à l'étape 5 par le nombre de jours de la période calculée. À l'aide de l'équation 5.21.

Équation 5.21: Température moyenne de surface

$$T_s = \frac{ID_s}{t} \text{ ou } T_s = \frac{IG_s}{t}$$

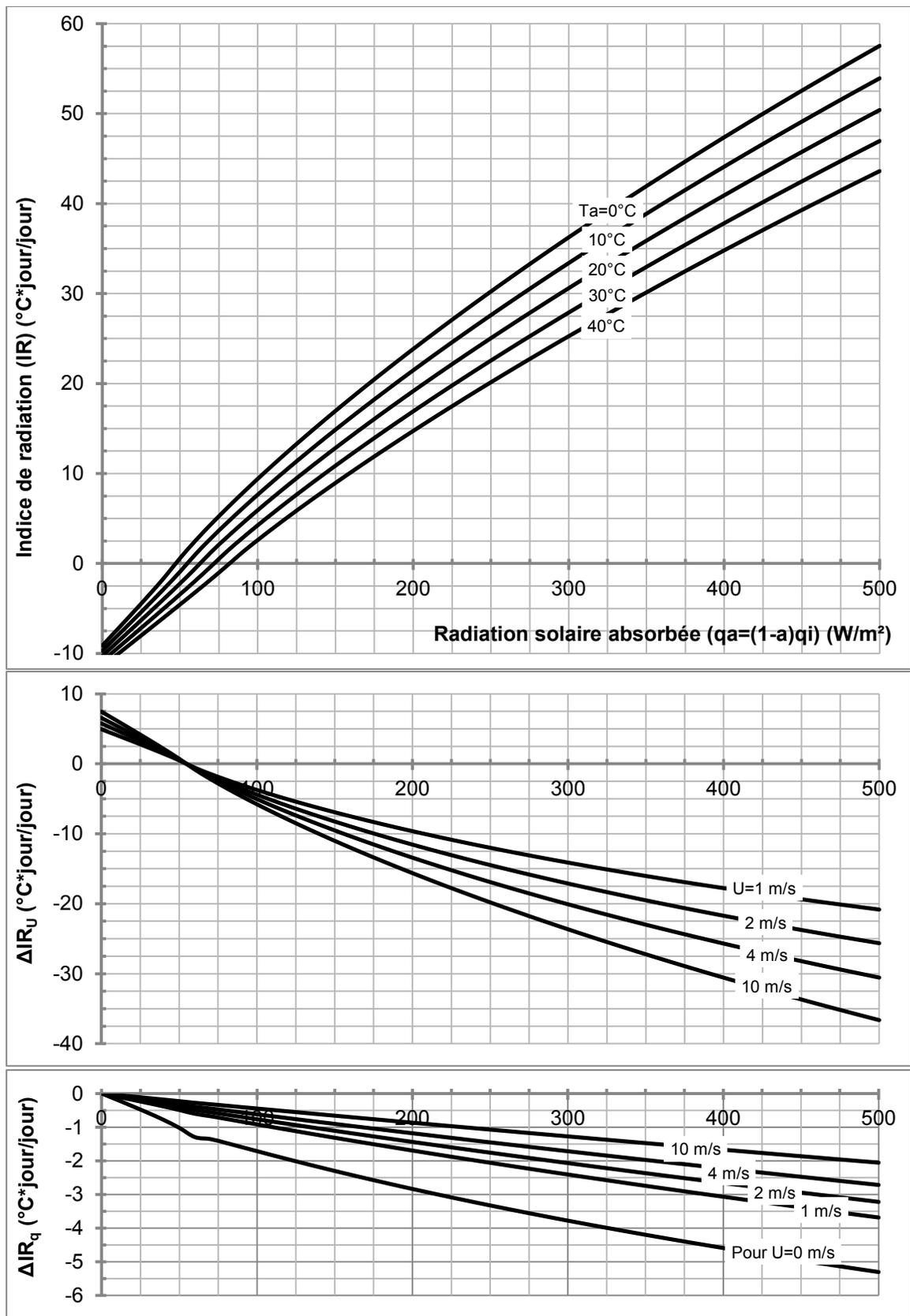


Figure 5.11: Abaque de calcul de l'indice de radiation des revêtements routiers pour température de l'air supérieure à 0°C

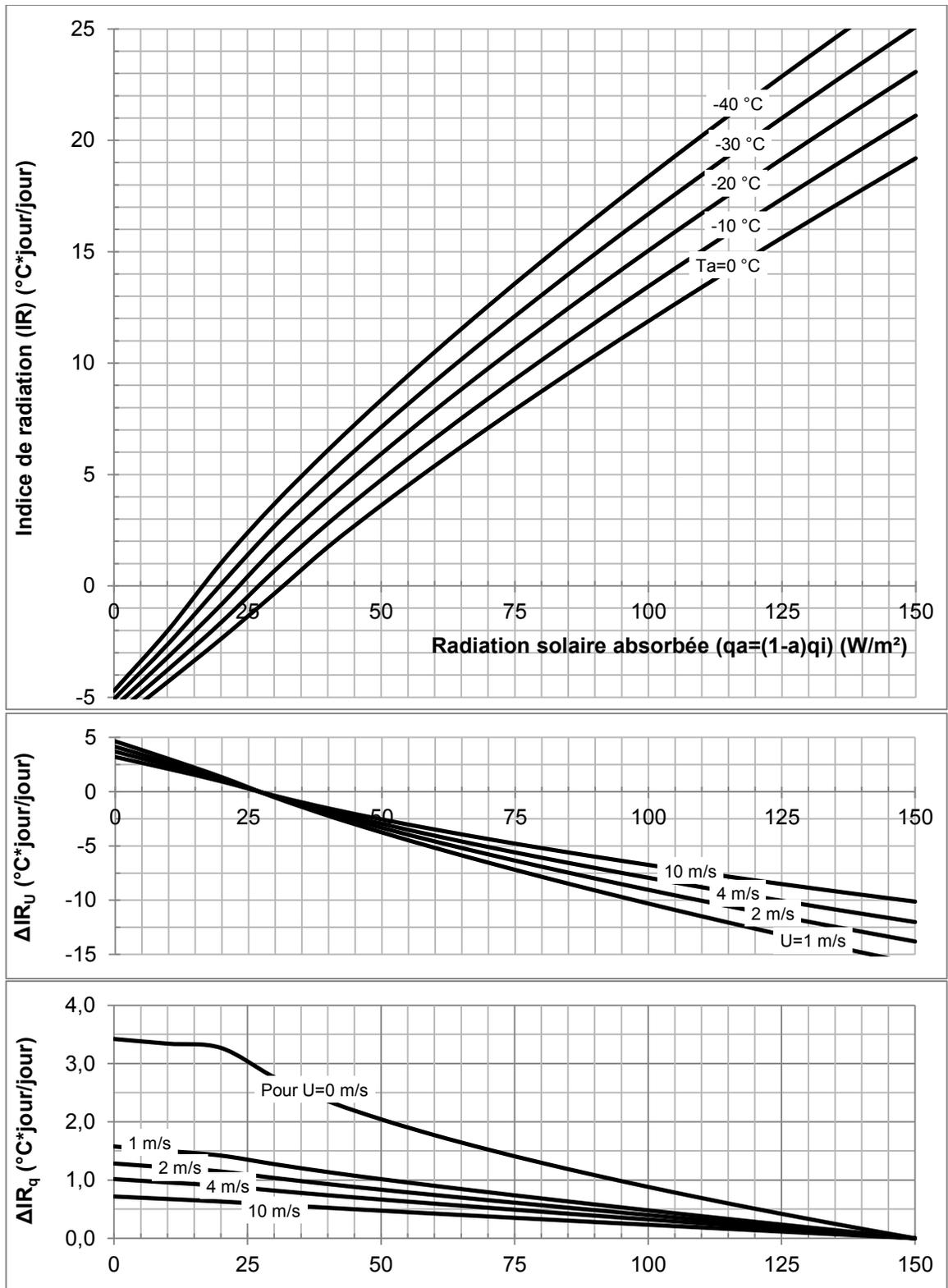


Figure 5.12: Abaque de calcul de l'indice de radiation des revêtements routiers pour température de l'air inférieure à 0°C

5.5 Profondeur de dégel

L'utilisation des revêtements à albédo élevé en contexte nordique vise principalement à diminuer la profondeur de la pénétration du dégel sous les infrastructures. La profondeur théorique de dégel peut être calculée à l'aide de l'équation de Stefan. Les indices de dégel de la surface peuvent être calculés à l'aide du modèle présenté précédemment.

Dans cette section la profondeur théorique de pénétration du front de dégel sera donc analysée. Des propriétés géothermiques typiques de sol de remblai seront utilisées dans l'équation de Stefan. La conductivité thermique du sol non gelé utilisée est de $1,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Côté et Konrad, 2005) et la chaleur latente du sol est de 26 MJ/m^3 (Côté et Konrad, 2005). La chaleur latente a été obtenue en considérant une teneur en eau de 4 %, une densité sèche de 1930 kg/m^3 et une densité solide de 2700 kg/m^3 . Le revêtement de traitement bitumineux de surface a une faible épaisseur et sera donc ignoré dans l'analyse de la pénétration du dégel.

Deux scénarios climatiques différents seront utilisés. Le premier correspond à des conditions climatiques semblables à celles de Beaver Creek. L'indice de dégel de l'air y est de $1500 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$ pour une durée du dégel d'environ 150 jours et donc une température moyenne de l'air moyenne de $10 \text{ }^\circ\text{C}$. La radiation solaire durant le dégel est d'environ 180 W/m^2 . Le second scénario correspond à des conditions climatiques semblables à celles de Thule au Groenland. Donc, un indice de dégel d'environ $500 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{jour}$ et une durée de la période de dégel d'environ 75 jours. La radiation solaire utilisée est de 180 W/m^2 pour Thule afin d'être en mesure de comparer facilement les résultats de Beaver Creek et de Thule. La vitesse du vent utilisée dans les deux cas est de 1 m/s et la conduction est ignorée.

La figure 5.13 présente la profondeur de dégel en fonction de l'indice de dégel de la surface et de l'indice de radiation pour les conditions climatiques de Beaver Creek. Les indices de dégel pour trois valeurs d'albédo de surface différentes y sont affichés. La figure 5.14 présente les mêmes données pour les conditions climatiques de Thule.

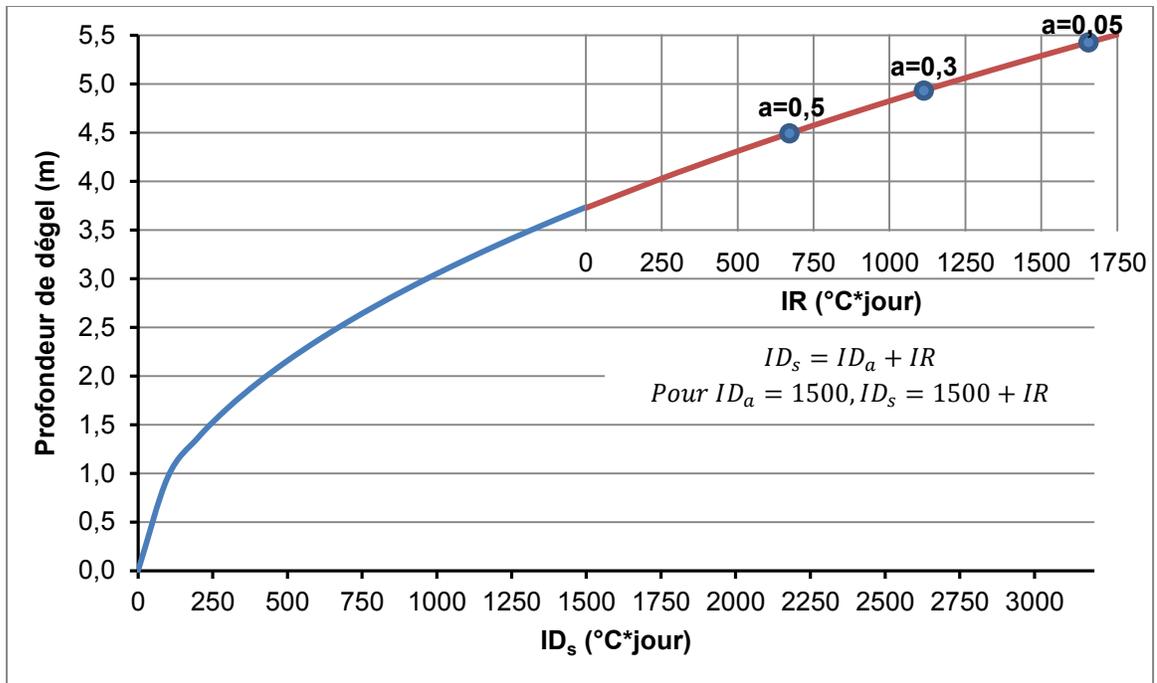


Figure 5.13 : Profondeur de dégel sous un revêtement routier (exemple théorique de Beaver Creek)

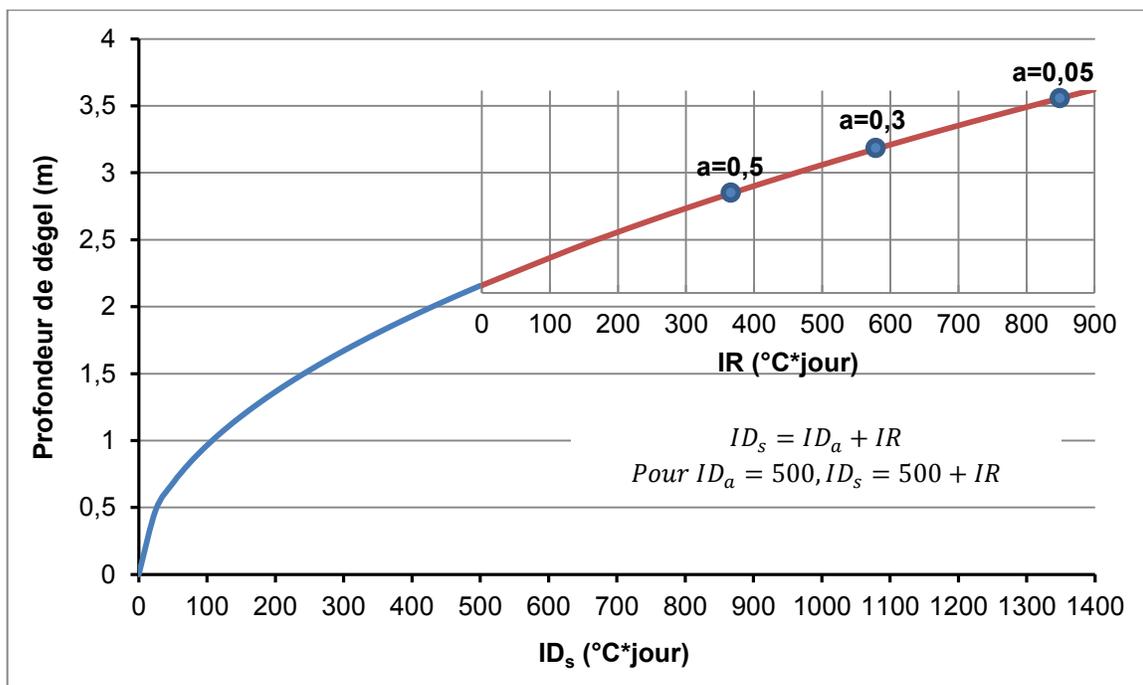


Figure 5.14: Profondeur de dégel sous un revêtement routier (exemple théorique de Thule)

Sur les figures 5.13 et 5.14, la courbe bleue correspond à la profondeur de dégel due seulement à la température de l'air. La courbe rouge correspond à la profondeur de dégel due au réchauffement du revêtement routier. La variation de l'albédo peut seulement influencer la portion rouge. La portion bleue est due aux conditions climatiques du site et l'indice de dégel de l'air correspond à

l'indice de dégel de surface minimale. Ainsi, la profondeur de dégel minimale théorique sous le revêtement routier correspond à l'endroit où la courbe bleue se termine et où la courbe rouge commence. L'utilisation de l'indice de radiation permet ici de souligner efficacement l'influence de l'albédo sur l'augmentation de l'indice de dégel. L'impact du réchauffement dû à l'absorption de chaleur par la surface est souligné par l'indice de radiation. L'indice de radiation est calculé par le modèle à partir de l'albédo de surface pour les conditions climatiques décrites précédemment.

Le tableau 5.7 présente les profondeurs de dégel dues à la température de l'air et aux trois valeurs d'albédo représentées aux figures 5.13 et 5.14. On retrouve la profondeur totale de pénétration du dégel (X_{tot}), l'augmentation de pénétration du dégel due aux revêtements (ΔX), l'indice de dégel de surface (ID_s) et l'indice de radiation des revêtements (IR). Les chiffres entre parenthèses représentent le pourcentage d'augmentation de la pénétration du dégel et de l'indice de dégel de surface attribuable à la présence de revêtement routier par rapport à la température de l'air.

Tableau 5.7 : Données théoriques de profondeur de dégel sous un revêtement routier

	Beaver Creek				Thule			
	X_{tot} (m)	ΔX (m)	ID_s (°C*jour)	IR (°C*jour)	X_{tot} (m)	ΔX (m)	ID_s (°C*jour)	IR (°C*jour)
Air	3,7	-	1500	-	2,2	-	500	-
0,5	4,5	0,8 (20 %)	2190	690 (46 %)	2,8	0,7 (31 %)	860	360 (72 %)
0,3	4,9	1,2 (32 %)	2620	1120 (75 %)	3,2	1,0 (47 %)	1080	580 (116 %)
0,05	5,4	1,7 (45 %)	3150	1650 (110 %)	3,5	1,3 (64 %)	1350	850 (170 %)

Les données du tableau 5.7 illustrent bien l'influence des revêtements à albédo pour des conditions climatiques différentes. La durée de la période de gel et l'indice de dégel de l'air ont une influence importante sur l'efficacité relative des revêtements à albédo élevé. Pour une période de dégel plus courte comme pour l'exemple de Thule l'indice de radiation totale est beaucoup plus bas que pour l'exemple de Beaver Creek où la période de dégel est beaucoup plus longue. L'indice de radiation a cependant une influence relative beaucoup plus importante lorsque la période de dégel est courte et que l'indice de dégel de l'air est faible. Ainsi, l'indice de radiation pour un albédo de 0,05 à Thule entraîne une augmentation relative de 170 % de l'indice de dégel de la surface par rapport à l'indice de dégel de l'air. Dans le cas de Beaver Creek, la même surface entraîne une augmentation de seulement 110 %. Cette augmentation plus importante de l'indice de radiation se reflète par une augmentation plus importante de la pénétration du dégel. Pour Thule, une surface ayant un albédo de 0,05 engendre une augmentation de 64 % de la pénétration du dégel, alors que l'augmentation est de 45 % à Beaver Creek.

Les différences de pénétration du dégel pour les différentes valeurs d'albédo sont semblables pour les deux sites. Pour un albédo de 0,5, la différence de pénétration du dégel est de 0,8 m à Beaver Creek et de 0,7 m à Thule. Par contre, leur importance relative est différente en raison de la pénétration du dégel due à la température de l'air beaucoup moins importante à Thule. Ainsi, une pénétration de 0,7 m à Thule représente une augmentation de 31 % alors qu'à Beaver Creek une pénétration semblable de 0,8 m représente une augmentation de seulement 20 % par rapport à la pénétration due à la température de l'air.

Pour l'exemple précédent, la même valeur de radiation solaire incidente a été utilisée pour les deux sites afin de simplifier l'analyse. En fait, la radiation incidente au site de Thule est théoriquement plus importante que celle utilisée dans l'exemple. En se référant à la figure 5,8, la radiation solaire moyenne est normalement plus intense lorsque la période de dégel est plus courte. Pour une radiation solaire plus élevée pour le site de Thule, les valeurs de pénétration du dégel et d'indice de radiation pour le site de Thule augmenteraient légèrement.

Les conditions climatiques ont un impact important sur l'efficacité relative des revêtements à albédo élevé lorsque la pénétration du dégel est utilisée comme facteur d'évaluation. Ils sont plus efficaces lorsque l'indice de dégel de l'air est bas, lorsque la radiation solaire incidente est élevée et lorsque la période de dégel est longue.

5.6 Évolution de l'albédo

Il est important de considérer l'impact de la variation de l'albédo lors de l'évaluation des revêtements à albédo élevés. En effet, l'albédo des revêtements routiers varie en fonction du temps en raison de différents facteurs tel que la dégradation de la surface par abrasion, l'oxydation du bitume, le noircissement des surfaces par les pneus des véhicules, etc. L'évolution de l'albédo est différente pour chaque type de revêtement. L'évaluation de l'évolution de l'albédo permet de déterminer l'efficacité d'un revêtement par rapport à un autre pour une période de temps déterminée ou pour la durée de conception de la chaussée. Il est d'ailleurs possible d'inclure dans cette analyse les effets de réfections effectuées sur la chaussée durant la durée de conception.

La figure 5.14 présente l'évolution de l'albédo de trois revêtements se trouvant à la planche expérimentale de Beaver Creek. Les profondeurs de dégel équivalentes aux valeurs d'albédo sont présentées sur l'axe de droite. Ces profondeurs de dégel ont été calculées en utilisant les mêmes conditions climatiques que celles utilisées à la section 5.5 donc des conditions climatiques similaires à celles de la région de Beaver Creek.

L'année 0 correspond à l'année où les revêtements ont été appliqués. L'albédo, un hiver après la mise en place, a été mesuré sur le site et correspond à l'année 1 sur la figure. L'albédo de l'année 0 n'a pas été mesuré et a été déterminé rétroactivement à partir de l'usure observée et des données mesurées en laboratoire. Une description de cette démarche est disponible au chapitre 6. Les valeurs d'albédo pour les années 2 à 10 sont des projections basées sur une estimation faite en fonction du mode d'évolution de l'albédo des différents revêtements.

L'évolution de l'albédo de l'enrobé froid s'explique par deux phénomènes. Tout d'abord, le bitume s'oxyde graduellement lorsqu'il est exposé à l'air ce qui a pour effet de rendre le bitume gris et donc d'en augmenter l'albédo. Cette oxydation est très importante durant les premières années, mais tend à se stabiliser lorsque l'ensemble du bitume exposé est oxydé. De plus, l'albédo de l'enrobé froid varie en raison de la dégradation par abrasion du film de bitume recouvrant les granulats à la surface du revêtement. Ainsi, l'abrasion graduelle de ce film expose les granulats qui ont généralement un albédo plus élevé que le bitume ce qui entraîne une augmentation de l'albédo de la surface d'enrobé. Cette augmentation tend à se stabiliser lorsque l'ensemble des granulats en surface est exposé. Ainsi, l'albédo de l'enrobé augmente rapidement durant les premières années, mais l'amplitude de cette augmentation diminue pour les années subséquentes jusqu'à ce que l'albédo de la surface se stabilise à une certaine valeur.

L'évolution de l'albédo des enduits superficiels comme l'enduit de Lafrentz et le PerfectCool A de Nippo s'explique principalement par la dégradation par abrasion. En effet, les enduits subissent une dégradation en raison du passage des roues des véhicules ou des équipements de déneigement ce qui expose l'enrobé sous-jacent et ce qui entraîne une diminution de l'albédo. Pour le PerfectCool, comme le taux de pose est très faible, la dégradation est très rapide durant les premières années, car l'enduit se trouvant sur les granulats proéminents est rapidement affecté. L'enduit se trouvant entre les granulats est protégé par ceux-ci et demeure à la surface du revêtement plus longtemps. Pour l'enduit de Lafrentz, le taux de pose était plus important. Après la première année, une bonne partie de l'enduit se trouvant sur les granulats proéminents n'avait pas été affecté. Ainsi, la dégradation de l'albédo était plus importante pour le produit de Nippo que pour celui de Lafrentz. Comme il y a une différence d'albédo plus importante entre l'enduit de Lafrentz et la surface sous-jacente d'enrobé qu'entre l'enduit de Nippo et l'enrobé, la dégradation d'une aire équivalente entraîne une chute plus importante de l'albédo pour le produit de Lafrentz que pour le produit de Nippo. Ainsi, la dégradation de l'albédo pour l'enduit de Lafrentz sera plus importante durant les années 2 à 10 alors que l'albédo de la surface de Nippo aura tendance à se stabiliser.

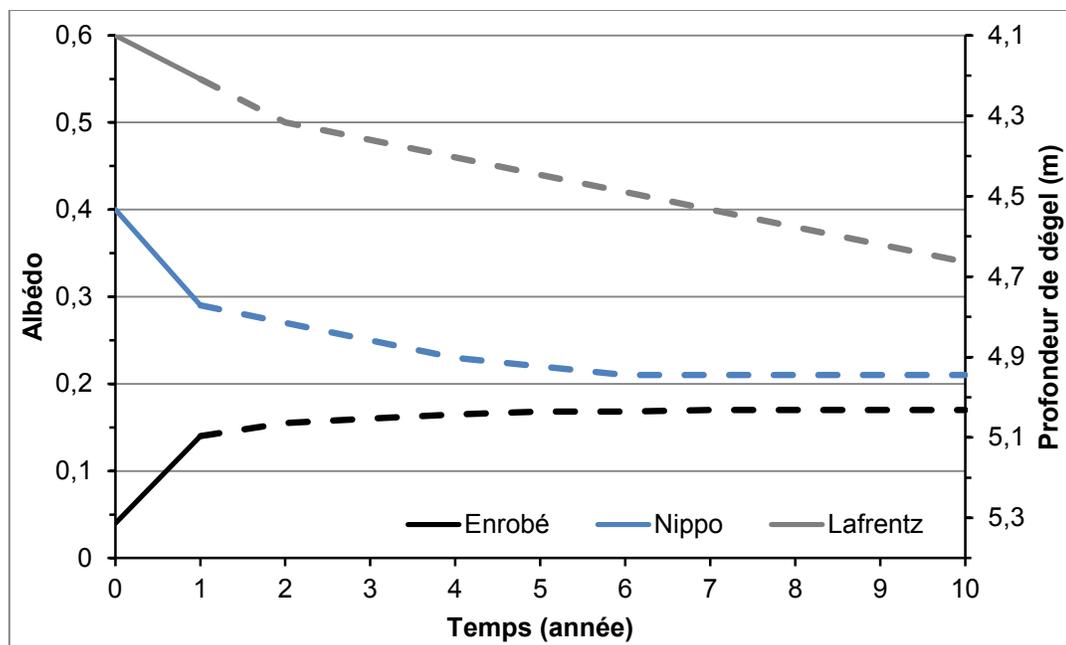


Figure 5.15 : Évolution de l'albédo en fonction du temps de trois revêtements différents

La figure 5.15 permet de constater que le gain par rapport à la profondeur de dégel qu'il est possible de réaliser en utilisant des revêtements à albédo élevé est très important durant les premières années. Par la suite, le gain diminue considérablement. La différence de profondeur de dégel sous l'enduit de Nippo et sous l'enrobé est de près d'un mètre pour l'année de pose, alors qu'elle est de quelques centimètres pour les années 6 à 10. Cependant, une réfection de l'enduit de Nippo permettrait par exemple de rehausser l'albédo après quelques années et de bénéficier d'un gain supérieur. Comme la dégradation de l'albédo du produit de Lafrentz est moins rapide, le gain en terme de profondeur de dégel qu'il est possible de réaliser en comparaison à l'enrobé est beaucoup plus important pour l'ensemble des dix années.

La figure 5.15 démontre bien l'importance de l'utilisation de revêtement à albédo lorsqu'une zone problématique a été identifiée à une certaine profondeur. En effet, si une zone très riche en glace a été identifiée, il est impératif d'éviter que le front de dégel ne pénètre jusqu'à cette profondeur afin de favoriser un bon comportement de la route et d'éviter les tassements excessifs engendrés par la fonte de cette zone. Ainsi, le revêtement de Nippo limite la profondeur de pénétration du dégel à environ 5 mètres alors que la profondeur de dégel sous l'enrobé peut atteindre plus de 5,3 mètres, et ce, même si l'augmentation subséquente de l'albédo de l'enrobé fait diminuer la profondeur de pénétration du dégel.

5.7 Conclusion

En conclusion, un modèle de calcul des températures superficielles des revêtements routiers a été développé. Ce modèle a été validé en utilisant les données provenant de la planche d'essai de Beaver Creek. Le modèle proposé est simple à utiliser et nécessite peu de variables. Trois façons ont été proposées afin d'utiliser le modèle : pour les utilisateurs plus expérimentés, la résolution de l'équation complète du modèle et pour les utilisateurs moins expérimentés, l'utilitaire de calcul supporté par Excel et les abaques de calcul. Le modèle proposé permet d'obtenir les températures superficielles et les indices de gel et de dégel des revêtements routiers en fonction de leur albédo. Ces indices peuvent être utilisés afin de calculer la profondeur de gel ou de dégel sous le revêtement. Ainsi, un concepteur peut évaluer la pertinence d'utiliser un revêtement à albédo élevé en contexte nordique à partir des températures de surface et de la pénétration du dégel. Enfin, il est aussi important de considérer l'effet de l'évolution de l'albédo des revêtements suite à leur dégradation afin d'évaluer efficacement le gain thermique total réalisé.

6 Propriétés des revêtements à albédo élevé

6.1 Introduction

Les expériences passées avec les revêtements à albédo élevé ont soulevé des problématiques techniques importantes liées à leur utilisation, notamment en ce qui concerne la durabilité et la sécurité routière. Le deuxième objectif du projet de recherche est donc d'offrir un cadre d'évaluation des revêtements à albédo élevé permettant d'assurer une utilisation efficace, sécuritaire et durable de ceux-ci. Pour ce faire, les propriétés techniques les plus importantes ont été ciblées et des méthodes d'essai permettant de les évaluer ont été choisies.

Bien qu'il existe plusieurs types de procédés permettant d'obtenir des revêtements routiers à albédo élevé, les produits sous forme d'enduit superficiel seront principalement analysés ici. La plupart des propriétés et des essais décrits dans ce chapitre s'appliquent aussi à d'autres types de revêtements, mais l'objectif de ce projet est de proposer une technique d'intervention dans un contexte nordique. Les enduits superficiels représentent une solution bien adaptée au contexte nordique en raison de leur facilité de manutention et de mise en place. Il est aussi possible d'en faire une utilisation ponctuelle ou à grande échelle et de traiter des revêtements neufs ou existants.

Dans ce chapitre, les propriétés ciblées et le programme de laboratoire seront d'abord décrits. Ensuite, pour chacune des propriétés ciblées, les méthodes d'essai, les résultats et l'analyse de ces résultats seront présentés.

6.2 Propriétés ciblées

Trois propriétés ont été ciblées: la réflectivité solaire, l'adhérence et la durabilité. La réflectivité solaire est un paramètre clé afin d'assurer l'efficacité thermique des revêtements à albédo élevé. L'adhérence assure des conditions sécuritaires pour les usagers de la route. La durabilité des enduits assure une utilisation durable et une bonne réflectivité à long terme.

6.2.1 Réflectivité solaire

La réflectivité solaire d'un revêtement peut être exprimée à l'aide de l'albédo. L'albédo dépend principalement des propriétés de l'enduit utilisé. La couleur d'un revêtement est aussi un paramètre important à considérer. Elle joue un rôle important pour la sécurité routière. En effet, la couleur permet d'offrir un support adéquat au marquage routier et un contraste par rapport aux abords de la route. La couleur d'un revêtement et la réflectivité directe peuvent entraîner des problèmes de fatigues oculaires pour les conducteurs de véhicules et des problèmes d'éblouissement pour les pilotes d'avion.

6.2.2 Adhérence

L'adhérence d'un revêtement routier est la quantification de la qualité du frottement entre le pneu et la chaussée. Celle-ci dépend de la micro texture et de la macro texture du revêtement. (Corley-Lay, 1998)

La micro texture est la texture microscopique de surface et contrôle l'adhérence entre le pneu et la surface. La longueur d'onde de la micro texture est de l'ordre de 0 à 0,5 millimètre. Elle provient principalement de la nature des granulats utilisés pour les enrobés bitumineux ou de la nature de l'enduit superficiel. La micro texture contrôle principalement l'adhérence par temps sec.

La macro texture est la texture à une échelle macroscopique. La longueur d'onde de la macro texture est de l'ordre de 0,5 à 50 millimètres. Celle-ci contrôle l'évacuation d'eau à la surface et l'adhérence à haute vitesse. La macro texture d'un revêtement peut être ajustée lors de la mise en place du revêtement ou lors du choix de granulométrie des granulats d'un enrobé bitumineux ou d'un traitement bitumineux de surface. (AASHTO, 1976)

La micro texture et la macro texture évoluent en fonction de l'usure du revêtement et des conditions saisonnières. Il est donc important d'évaluer ces propriétés aussi bien lorsque le revêtement est neuf que lorsqu'il s'use et lors des différentes saisons. (Jayawickrama et Thomas, 1998)

6.2.3 Durabilité

Les enduits peu durables entraînent des coûts d'entretien importants en raison des réfections fréquentes qu'il est nécessaire d'effectuer afin de conserver un albédo de surface optimal. Ainsi, la durabilité d'un enduit affecte non seulement son efficacité, mais aussi son coût d'utilisation.

Deux mécanismes principaux entraînent la dégradation d'un enduit superficiel : l'abrasion et le décollement ou l'arrachement. L'usure par abrasion provient du passage des roues des véhicules et de la machinerie utilisée pour déneiger la chaussée. L'usure par décollement se produit lorsqu'une partie de l'enduit est usée et que l'eau s'infiltré à l'interface entre l'enduit et le revêtement sous-jacent. Lors des cycles de gel et de dégel, cette eau prend de l'expansion en gelant ce qui entraîne un décollement de l'enduit. L'usure par décollement est souvent le résultat d'une défaillance lors de la mise en place de l'enduit : présence d'huile ou de poussières sur la surface, mise en place d'une couche trop épaisse d'enduit, etc.

6.3 Description du programme d'essais

6.3.1 Programme de laboratoire

Le programme de laboratoire proposé ici vise à évaluer les enduits superficiels avant leur mise en place sur le terrain. Il est ainsi possible d'établir des seuils minimaux de performance. Certains de

ces essais peuvent être effectués directement sur la chaussée suite à la mise en place du revêtement et tout au long de son cycle de vie.

6.3.2 Description des échantillons

Des échantillons ont été préparés afin de pouvoir évaluer les propriétés des enduits superficiels en laboratoire. Ces échantillons cherchent à reproduire les propriétés d'une chaussée réelle. Ainsi, l'enduit est appliqué à la surface d'une plaque d'enrobé bitumineux. Cette plaque est fabriquée à l'aide d'un compacteur LCPC selon la norme LC 26-400 de Transports Québec. Les plaques ont une dimension de 180 par 500 mm et une épaisseur d'environ 50 mm. Le type de mélange d'enrobé choisi doit être semblable à celui sur lequel l'enduit va être appliqué afin de reproduire des conditions de surface similaire à celles retrouvées sur le terrain. Dans le cadre de ce projet, un enrobé de type ESG-10 a été utilisé. Aucun grade de bitume n'a été spécifié pour la confection des échantillons. Aucun traitement n'a été appliqué à la surface des plaques avant l'application de l'enduit superficiel. Ces échantillons permettront d'évaluer la réflectivité et la couleur, l'adhérence, la résistance au décollement et la résistance aux cycles de gel et de dégel. La résistance à l'abrasion est évaluée à l'aide d'un autre type d'échantillons présenté à la section 6.6.

Des échantillons ont donc été préparés dans le cadre du projet par la compagnie Nippo afin d'évaluer les propriétés de deux enduits différents : le PerfectCool A et le PerfectCool M. Un échantillon de PerfectCool A est présenté aux figures 6.1 et 6.2. De plus, des échantillons d'enrobé bitumineux non recouverts d'enduits ont été préparés. Ces échantillons permettront d'obtenir des valeurs comparatives à celles obtenues pour les enduits.



Figure 6.1: Échantillon de PerfectCool A (vue de dessus)



Figure 6.2: Échantillon de PerfectCool A (vue de côté)

6.3.3 Essais sur le terrain

En plus des essais réalisés en laboratoire, plusieurs essais ont été réalisés sur la planche expérimentale de Beaver Creek au Yukon lors de la visite de mai 2013. Les résultats de ces essais seront présentés en plus des résultats provenant des essais de laboratoire.

6.4 Réflectivité

6.4.1 Essais

Réflectivité solaire

L'albédo d'une surface horizontale peut être mesuré à l'aide d'un pyranomètre en utilisant les procédures de la norme ASTM E1918. Un pyranomètre est un appareil mesurant le flux de radiation solaire. Dans le cadre du projet un pyranomètre de type CMP 3 de Kipp & Zonen a été utilisé. Il s'agit d'un appareil peu coûteux de type seconde classe selon la norme ISO 9060 :1990. Cet appareil mesure l'ensemble du spectre solaire sur une gamme spectrale de 300 à 2800 nm. Il est possible de mesurer une radiation allant jusqu'à 2000 W/m² avec un temps de réponse inférieure à 18 secondes. Ce pyranomètre ne nécessite aucune source de courant et produit un signal en mV avec une sensibilité de 10 µV/W/m². Le capteur a un diamètre de 3 cm.

Pour mesurer l'albédo d'une surface, le flux de radiation solaire incident à la surface est tout d'abord mesuré en pointant le pyranomètre vers le ciel. Ensuite, le flux de radiation réfléchi par la surface est mesuré en pointant le pyranomètre vers celle-ci. L'albédo est calculé en divisant la valeur de la radiation réfléchi par la valeur de radiation incidente. Les mesures sont effectuées au moins trois fois et la moyenne des trois valeurs mesurées est retenue.

Certaines restrictions sont associées à l'utilisation de la norme ASTM E1918. Tout d'abord la surface doit être horizontale et ne doit pas avoir une inclinaison supérieure à 9,5°. Le soleil doit

absolument être utilisé comme source lumineuse. Le ciel doit être parfaitement dégagé. L'angle d'incidence du soleil avec la surface doit être inférieur à 45°. De plus, il est primordial de limiter la quantité d'ombre produite par le pyranomètre sur la surface mesurée. Il est donc spécifié dans la norme ASTM E1918 de fixer le pyranomètre à l'extrémité d'une perche attachée à un trépied. Enfin, Levinson et coll. (2010) rapportent que la principale restriction de l'essai est au niveau de la taille de la surface à mesurer. En effet, la cible doit être assez grande afin de s'assurer que le flux de radiation réfléchi mesuré par le pyranomètre provienne entièrement de la surface à mesurer et non des environs de la surface. En utilisant des facteurs de formes, il est possible de calculer la quantité de radiation qui provient d'une surface en utilisant les paramètres géométriques du montage utilisé. Par exemple, pour un pyranomètre placé à 50 cm de hauteur et ayant un diamètre de 3 cm; 10 % du rayonnement enregistré provient de l'extérieur d'une surface circulaire de 3 mètres de diamètre, alors que 5 % provient de l'extérieur pour une cible de 4,4 mètres de diamètre et que 1 % provient de l'extérieur pour une cible de 10 mètres de diamètre. Il est possible de changer la configuration suggérée par la norme ASTM E1918 afin d'ajuster le facteur de forme aux dimensions de la cible simplement en diminuant la hauteur du pyranomètre. De plus, si l'albédo des environs de la cible est connu, il est possible de calculer l'albédo de la cible en fonction de sa dimension tel qu'expliqué dans la section suivante.

6.4.2 Résultats et analyse

Facteur de forme

Tel que décrit précédemment, les mesures d'albédo doivent prendre en compte le facteur de forme. Ainsi, le facteur de forme d'une cible circulaire pour un capteur circulaire s'exprime par l'équation 6.1 (Incropera et DeWitt, 2007). La figure 6.3 présente les paramètres géométriques de l'équation 6.1. Afin de simplifier l'utilisation des facteurs de forme, les surfaces seront traitées comme des cibles circulaires. L'aire des surfaces est donc convertie en aire équivalente circulaire.

Équation 6.1: Facteur de forme entre deux surfaces circulaires

$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left(X - \left(X^2 - 4 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Avec

$$R_i = \frac{r_i}{a}$$

$$X = 1 + \frac{(1 + R_2^2)}{R_1^2}$$

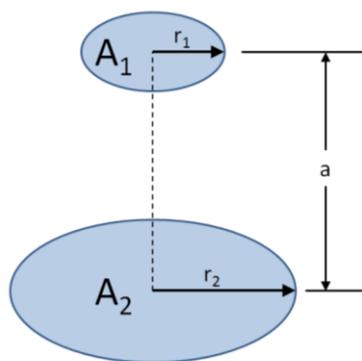


Figure 6.3: Schématisation du facteur de forme entre deux surfaces circulaires

Échantillons en laboratoire

Pour les essais en laboratoire, les échantillons disponibles étaient de très petites dimensions. Pour mesurer leur albédo, les échantillons ont été apposés sur un arrière-plan ayant un albédo connu. L'albédo des échantillons a pu être déterminé en utilisant les facteurs de forme. Un papier bitumineux noir carré d'une dimension de 2,8 mètres de côté a été utilisé comme arrière-plan. L'albédo de ce papier a été mesuré et possède une valeur de 0,053. En plaçant le pyranomètre à une hauteur de 40 cm, le facteur forme est donc de 94 %. Comme le papier était placé sur de l'asphalte, l'interférence de 6 % est négligeable, car l'écart entre l'albédo de l'asphalte et du papier noir est très faible. Il est possible de considérer que 100 % des rayons atteignant le pyranomètre proviennent du papier noir et de l'échantillon placé sur celui-ci. Les échantillons utilisés pour mesurer l'albédo étaient composés de trois plaques de 180 mm par 500 mm apposés côte à côte afin d'offrir une cible de 500 mm par 540 mm. Le pyranomètre était placé à une distance de 37 cm des cibles. Le facteur de forme était ainsi de 38,5 %. Il est donc possible de calculer l'albédo des cibles à l'aide de l'équation 6.2.

Équation 6.2: Albédo des échantillons en laboratoire

$$a_{\text{mesuré}} = (1 - 0,385)a_{\text{arrière-plan}} + 0,385a_{\text{cible}} = (1 - 0,385) * 0,053 + 0,385a_{\text{cible}}$$

Le tableau 6.1 présente les résultats des essais d'albédo en laboratoire pour les enduits de Nippo PerfectCool A et PerfectCool M ainsi que pour une plaque d'enrobé bitumineux de type ESG-10.

Tableau 6.1: Albédos des échantillons de laboratoire

Surface	PerfectCool A	PerfectCool M	Enrobé ESG-10
$a_{\text{mesuré}}$	0,199	0,211	0,048
a_{cible}	0,43	0,46	0,04

Planche expérimentale de Beaver Creek

L'albédo des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek a été mesuré en mai 2013 et en mai 2014. L'albédo des surfaces immédiatement suite à la mise en place en août 2012 n'a pas pu être mesuré. Ainsi, ces valeurs ont dû être calculées rétroactivement.

Les dimensions des surfaces de Beaver Creek sont présentées au tableau 6.2. Le rayon pour une cible équivalente y est aussi présenté et le facteur de forme est calculé pour une hauteur du pyranomètre de 40 cm. Le facteur de forme est de près de 100 % pour les surfaces de traitement de surface en raison de leurs très grandes dimensions. Comme les facteurs de forme sont très élevés et que les environs des surfaces n'ont pas un albédo drastiquement différent des cibles, la valeur obtenue à l'aide du pyranomètre peut être considérée comme la valeur d'albédo réel de la surface.

Tableau 6.2: Dimensions et facteur de forme pour les surfaces de Beaver Creek

Surface	Nippo	Lafrentz	Enrobé froid	L-BST	BST
Largeur (m)	4,10	2,88	3	-	-
Longueur (m)	4,30	3	3	-	-
Rayon (m)	2,4	1,7	1,7	-	-
Facteur de forme	97,2%	94,5%	94,7%	≈100%	≈100%

Le tableau 6.3 présente les valeurs d'albédo mesurées en mai 2013 et en mai 2014 pour chacune des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek.

Tableau 6.3: Albédo des surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek

Albédo	Nippo	Lafrentz	Enrobé froid	L-BST	BST
Mai 2013	0,26	0,55	0,14	0,23	0,14
Mai 2014	0,26	0,52	0,13	0,23	-

Afin de calibrer le modèle de calcul des températures superficielles et d'analyser l'évolution de l'albédo dans le temps, il est nécessaire de connaître l'albédo immédiatement suite à la pose des surfaces en août 2012. Malheureusement, ces valeurs n'ont pu être mesurées à l'aide d'un pyranomètre. L'albédo des surfaces pour l'année 2012 a donc été calculé rétroactivement. Une analyse approfondie de la dégradation des enduits sera effectuée à la section 6.6.

Pour le PerfectCool A, l'abrasion est le principal facteur affectant l'albédo. L'albédo pour un enduit neuf et uniforme a été mesuré en laboratoire et possède une valeur de 0,43. Selon Masahiko Iwama (2013) de la compagnie Nippo la mise en place du produit par balai de caoutchouc comme ce fût le cas à Beaver Creek ne permet pas d'obtenir une réflectivité aussi élevée que lorsque le produit est mis en place avec un fusil à peinture comme ce fût le cas pour les échantillons de laboratoire. Ainsi, pour l'année 2012, l'albédo de la section de Nippo est légèrement inférieur à celle des échantillons et possède une valeur fixée à 0,40.

Pour l'enduit de Lafrentz, la dégradation par abrasion est aussi la principale source de dégradation de l'albédo. Comme il est impossible de mesurer l'albédo de l'enduit à l'état neuf, une analyse de la dégradation de la surface à l'aide du logiciel Photoshop a été effectuée. La figure 6.4 illustre l'état de surface de l'enduit au centre de la section de Lafrentz. L'analyse par ordinateur a permis de déterminer qu'environ 89 % de la surface était toujours recouverte de peinture blanche. En utilisant

un albédo de l'enrobé froid apparent de 0,14, l'équation 6.3 permet de calculer l'albédo de l'enduit à l'état neuf.

Équation 6.3: Calcul de l'albédo de l'enduit de Lafrentz pour l'année 2012

$$a_{mesuré} = a_{neuf} * (1 - d) + a_{enrobé} * d$$
$$0,55 = a_{neuf} * (1 - 0,11) + 0,14 * 0,11$$

Avec

d=pourcentage de dégradation

Ainsi, l'albédo de l'enduit neuf de Lafrentz est d'environ 0,60. Cette valeur sera utilisée pour l'année 2012.



Figure 6.4: Surface de l'enduit de Lafrentz en mai 2013

Pour l'enrobé froid, l'oxydation du bitume observé sur le site explique principalement l'augmentation de l'albédo entre la première année et la seconde année. Ainsi, l'albédo d'un enrobé froid est similaire à l'albédo d'un enrobé bitumineux standard. La valeur pour un enrobé ESG-10 neuf mesurée en laboratoire sera utilisée comme valeur pour l'enrobé froid pour l'année 2012. L'albédo de l'enrobé froid pour 2012 est donc de 0,04. La valeur d'albédo mesurée en 2014 est légèrement inférieure à celle de 2013. Une remontée du bitume à la surface de la section d'enrobé froid a été observée ce qui a pour effet de faire diminuer légèrement l'albédo de cette surface.

Pour le traitement de surface à granulats clair, aucune variation de l'albédo n'est observée entre les données de 2013 et de 2014. De plus, le seul phénomène pouvant expliquer une évolution de l'albédo serait une remontée du bitume à la surface, ce qui n'a pas été observé. Ainsi, l'albédo de 2012 est fixé comme étant la même que l'albédo de 2013 et de 2014 donc de 0,23.

Pour le traitement bitumineux de surface, l'albédo n'a pas été mesuré en 2014. Comme cette valeur n'est pas d'intérêt pour la validation du modèle, aucun rétrocalcul n'est nécessaire.

Dawson City

En plus des mesures d'albédo des surfaces la planche expérimentale de Beaver Creek et de celles effectuées en laboratoire, quelques valeurs d'albédo ont été mesurées dans la ville de Dawson City au Yukon. L'objectif principal était de mesurer l'albédo du revêtement à albédo élevé de la Front Street. Les détails et les résultats de ces mesures se trouvent à l'annexe C de ce document.

6.5 Adhérence

Tel que mentionné précédemment, l'adhérence d'un revêtement est définie par sa micro texture et par sa macro texture. Il est possible de mesurer la macro texture à l'aide du test de la tache de sable (ASTM E965) et la micro texture à l'aide d'un pendule britannique (ASTM E303).

6.5.1 Essais

Macro texture - tache de sable

Le test de la tache de sable est une méthode de mesure volumétrique permettant de caractériser la profondeur moyenne de la macro texture d'un revêtement. Les détails du test sont disponibles dans le texte de la norme ASTM E965. Le test consiste à étaler un certain volume d'un matériau uniforme à la surface d'un revêtement propre à l'aide d'un disque plat et de mesurer l'aire couverte par la tache ainsi créée. La norme suggère l'utilisation d'un sable d'Ottawa comme matériau uniforme et d'une rondelle de hockey comme disque plat. Le volume de sable est mesuré à l'aide d'un cylindre gradué et le diamètre de la surface couverte par le sable est mesuré à l'aide d'une règle. La macro texture est décrite par la profondeur moyenne de la texture (*mean texture depth* ou MTD) calculée avec l'équation 6.4.

Équation 6.4: Profondeur moyenne de la texture

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Avec

V=volume de sable (mm³)

D=diamètre moyen de la surface couverte par le sable (mm)

La figure 6.5 illustre un essai de tache de sable réalisé sur la surface d'enrobé froid à Beaver Creek au Yukon en mai 2013.



Figure 6.5: Essai de la tache de sable sur la surface d'enrobé froid à Beaver Creek en mai 2013

Micro texture - Pendule britannique

Le test du pendule britannique permet de mesurer la micro texture d'un revêtement. Il s'agit d'un test de type dynamique à impact qui mesure la perte d'énergie d'un patin de caoutchouc en mouvement qui entre en contact avec la surface du revêtement. La figure 6.6 illustre l'appareil utilisé pour l'essai, le pendule britannique. Le test peut être effectué en laboratoire comme sur le terrain lorsque la surface est mouillée. Le potentiel de friction d'une surface est exprimé par le nombre du pendule britannique (British pendulum number ou BPN). La surface doit être nettoyée et mouillée avant d'effectuer le test. Le bras de l'appareil supportant le patin est verrouillé en position horizontale avant d'être relâché. Le patin de caoutchouc se trouvant à l'extrémité du bras accélère avant d'entrer en contact avec la surface du revêtement. Le support du patin est muni d'un ressort assurant une force de contact constante et uniforme sur la surface. La distance que parcourt le patin à la surface doit être ajustée entre environ 124 et 127 mm. Suite au passage du patin sur le revêtement, le bras toujours en mouvement entraîne dans son mouvement une aiguille qui indique la hauteur maximale atteinte par le bras. Une échelle graduée permet alors de lire le BPN indiqué par la position de l'aiguille. Les détails de l'appareil et les procédures de calibration sont disponibles dans la norme ASTM E303. Pour obtenir le BPN d'une surface, celle-ci est d'abord mouillée suffisamment pour remplir entièrement la macro texture et un essai est effectué sans enregistrer le résultat. Ensuite, quatre essais sont effectués en mouillant la surface entre chaque test. Toutes les mesures effectuées doivent être présentées comme résultats de l'essai. Afin de faciliter l'analyse des résultats, la moyenne des quatre essais sera aussi présentée dans ce document.

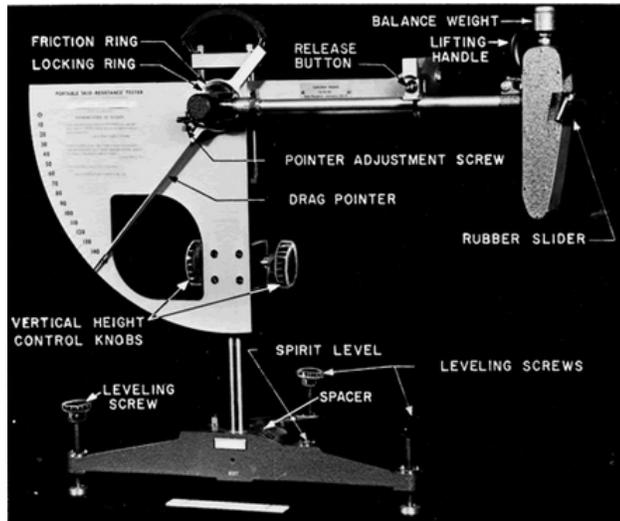


Figure 6.6: Pendule britannique pour mesurer la micro texture d'un revêtement (ASTM E303)

La figure 6.7 illustre un essai de pendule britannique réalisé sur la surface de PerfectCool A à Beaver Creek au Yukon en mai 2013.



Figure 6.7: Essai de pendule britannique réalisé sur la surface de PerfectCool A

6.5.2 Résultats et analyse

Essai d'adhérence - Macro texture

Le tableau 6.4 présente les résultats des essais de la tache de sable réalisé sur les revêtements de la planche expérimentale de Beaver Creek. Le volume de sable utilisé ainsi que le diamètre moyen de la tache de sable y sont présentés. Les essais ont été réalisés en mai 2013 donc un peu plus d'un hiver après la mise en place de la planche expérimentale.

Tableau 6.4: Macro texture des revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek

	PerfectCool A	Lafrentz	Enrobé froid	L-BST
Volume (mm³)	60000	60000	60000	60000
Diamètre (mm)	330	360	320	200
MTD (mm)	0,702	0,589	0,746	1,910

Le tableau 6.5 présente les résultats des essais de la tache de sable réalisé sur les échantillons de laboratoire.

Tableau 6.5: Macro texture des échantillons de laboratoire

	PerfectCool A	PerfectCool M	ESG-10
Volume (mm³)	18000	18000	18000
Diamètre (mm)	230	160	125
MTD (mm)	0,433	0,895	1,467

Tel que mentionné précédemment, la macro texture n'est pas une propriété intrinsèque à un type de revêtement ou à un enduit. Elle est plutôt liée à la technique de mise en place du revêtement. Par exemple, la hauteur au sable de l'enrobé ESG-10 présentée au tableau 6.5 est supérieure aux valeurs normalement obtenues en chantier. (Bergeron, 2014) Il peut donc être hasardeux de faire des comparaisons entre différents enduits. Par contre, les résultats obtenus à Beaver Creek procurent des informations intéressantes quant à l'effet de la mise en place d'un enduit et de son taux de pose. En effet, les deux enduits (PerfectCool A et Lafrentz) ont tous deux été appliqués directement sur la surface d'enrobé froid. Ainsi, la macro texture de ces deux enduits est inférieure à celle de l'enrobé froid sans enduit. En comblant les aspérités à la surface du revêtement, les enduits réduisent la macro texture. De plus, le taux de pose de l'enduit de Lafrentz était plus élevé que celui de l'enduit PerfectCool A. Ainsi, la macro texture de la surface de Lafrentz est inférieure à celle de la surface de PerfectCool A. En utilisant un support ayant une forte macro texture et un taux de pose plus faible, il est possible de conserver une macro texture efficace suite à la pose d'un enduit. Un enduit appliqué à la surface d'un traitement de surface ayant une forte macro texture comme celui de Beaver Creek aurait une bonne macro texture. Enfin, l'application successive d'enduit lors de la réfection des surfaces a pour effet de réduire la macro texture. En effet, les aspérités sont de plus en plus comblées lors de l'application de couches additionnelles. Il est donc important de prévoir les opérations de réfection des enduits lors du choix du revêtement qui supportera l'enduit afin de conserver une bonne macro texture tout au long de la durée de vie de la chaussée.

La faible macro texture de l'enduit PerfectCool A provient principalement du support ayant une très faible macro texture. La macro texture de l'enduit PerfectCool M qui a été appliqué sur la même surface que l'enduit PerfectCool A est supérieure en raison de sable grossier ajouté à l'enduit PerfectCool M lors de la mise en place. L'enrobé ESG-10 présente une bonne macro texture.

Essai d'adhérence - Micro texture

Le tableau 6.6 présente les résultats des essais de pendule britannique réalisés sur les revêtements de la planche expérimentale de Beaver Creek. Les résultats de quatre essais ainsi que la moyenne de ces essais y sont présentés. Les essais ont été réalisés en mai 2013 donc un peu plus d'un hiver après la mise en place de la planche expérimentale. En plus des quatre revêtements de la planche d'essai, le traitement bitumineux de surface (BST) se trouvant sur le site expérimental de Beaver Creek a aussi été testé.

Tableau 6.6: Adhérence des revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek

		PerfectCool A	Lafrentz	Enrobé froid	L-BST	BST
BPN	1	72	60	92	97	79
	2	74	58	96	97	81
	3	76	60	93	97	79
	4	75	57	95	97	-
	Moyenne	74	59	94	97	80

Le tableau 6.7 présente les résultats des essais de pendule britannique réalisés sur les échantillons de laboratoire.

Tableau 6.7: Adhérence des échantillons de laboratoire

		PerfectCool A	PerfectCool M	ESG-10
BPN	1	68	50	69
	2	68	50	72
	3	64	48	69
	4	62	50	69
	5	62	50	72
	Moyenne	65	50	70

Bien que la micro texture soit aussi affectée par le support sur lequel l'enduit est appliqué, il est pertinent de comparer les différentes valeurs obtenues à Beaver Creek et en laboratoire entre eux. Tout d'abord les revêtements non couverts d'enduits présentent tous des valeurs de micro texture assez élevées. La valeur plus basse de la micro texture de l'échantillon de ESG-10 s'explique par le fait qu'un film de bitume recouvre les granulats de l'enrobé. Ce sont les granulats qui procurent principalement la forte micro texture des enrobés bitumineux. Ainsi, suite à l'abrasion du film de bitume de la surface de l'enrobé, la micro texture augmente comme c'est le cas pour la surface d'enrobé froid de la planche expérimentale de Beaver Creek. Les deux traitements bitumineux de surfaces de Beaver Creek présentent des valeurs de micro texture différentes qui s'expliquent par la nature différente des granulats utilisés pour chacun des revêtements. Les enduits présentent des valeurs de micro textures plus faible que les autres revêtements. La plus forte micro texture de l'enduit PerfectCool A par rapport au PerfectCool M s'explique par l'ajout de sable fin au PerfectCool A avant la mise en place de l'enduit. Ce sable procure une meilleure micro texture à

l'enduit. De plus, tout comme pour le film de bitume d'un enrobé, la micro texture augmente lorsque l'enduit subit de l'usure par abrasion. En effet, les valeurs de Beaver Creek ont été mesurées un hiver après la mise en place alors que les échantillons de laboratoire présentent les valeurs d'un enduit neuf.

Adhérence - Valeurs admissibles

Quelques agences de transport proposent des valeurs minimales admissibles pour l'adhérence.

Les valeurs minimales suggérées obtenues à l'aide du pendule britannique s'appliquent principalement à l'adhérence du marquage routier. La région de Nouvelle Gale du Sud suggère une valeur minimale de 45 BPN alors qu'en Nouvelle-Zélande la valeur minimale est de 50 BPN (Harlow, 2005). Le *Road Research Laboratory* de Londres a proposé en 1969 des valeurs minimales d'adhérence de 55 BPN pour les autoroutes et de 65 BPN pour les courbes. Les revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek présentent une adhérence supérieure à ces valeurs. Le revêtement de Lafrentz présente une adhérence inférieure à 65 BPN et il ne serait donc pas recommandé de l'utiliser dans des sections courbes.

Les valeurs de hauteur au sable s'appliquent quant à elles aux revêtements routiers et non au marquage routier. En France, pour une chaussée bidirectionnelle où la vitesse autorisée est de 90 km/h, la hauteur au sable minimale suggérée est de 0,60 mm et la valeur spécifiée est de 0,80 mm (Gandil, 2006). Trois des quatre revêtements de la planche d'essai de Beaver Creek présentent une hauteur au sable supérieure à la valeur minimale, mais les sections de Nippo et d'enrobé froid possède une valeur inférieure à 0,80 mm. La section de Lafrentz présente une hauteur au sable inférieure à la valeur minimale de 0,60 mm.

6.6 Durabilité

6.6.1 Essais

Trois essais ont été retenus afin d'évaluer la durabilité des enduits superficiels. L'essai par projection d'un jet de sable permet d'évaluer la résistance à l'abrasion. L'essai de tension direct permet d'évaluer la résistance au décollement. Enfin, l'essai de gel et de dégel permet d'évaluer la résistance de l'enduit aux cycles climatiques de températures. Il s'agit d'essais de laboratoire. La durabilité des enduits a aussi été évaluée visuellement pour les surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek. Enfin, deux autres essais ont été évalués dans le cadre du projet, mais n'ont pas été retenus.

Résistance à l'abrasion par projection

L'essai de projection de jet de sable consiste à évaluer la dégradation de l'enduit suite aux passages répétés d'un jet de sable à la surface de l'enduit. L'essai tel que spécifié par la norme

LC 21-102 vise habituellement à évaluer la résistance au polissage des granulats. La figure 6.8 présente schématiquement un cycle de balayage.

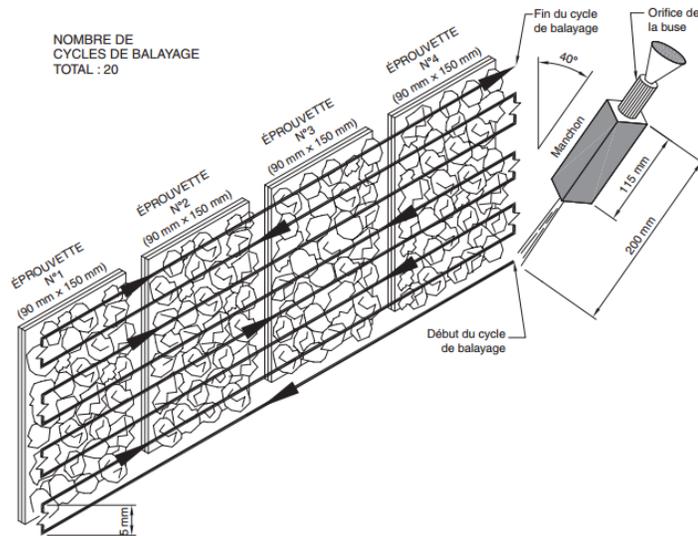


Figure 1
Cycle de balayage des échantillons

Figure 6.8: Schématisation d'un cycle de balayage d'abrasion par projection

L'abrasif utilisé pour l'essai est de l'oxyde d'aluminium dont les particules ont une grosseur de 320 μm . Le taux de projection de l'oxyde d'aluminium est de 497 g/minutes. L'essai a été modifié afin de pouvoir évaluer des enduits superficiels. Les échantillons sont entièrement différentes de celles spécifiées par la norme LC 21-102. En effet, les enduits sont appliqués sur des plaques d'aluminium carré ayant une dimension de 180 mm. L'enduit est appliqué sur une largeur de 150 mm. La perte de masse est évaluée après un certain nombre de cycles. La figure 6.9 illustre un échantillon de PerfectCool A après quelques cycles de dégradation.

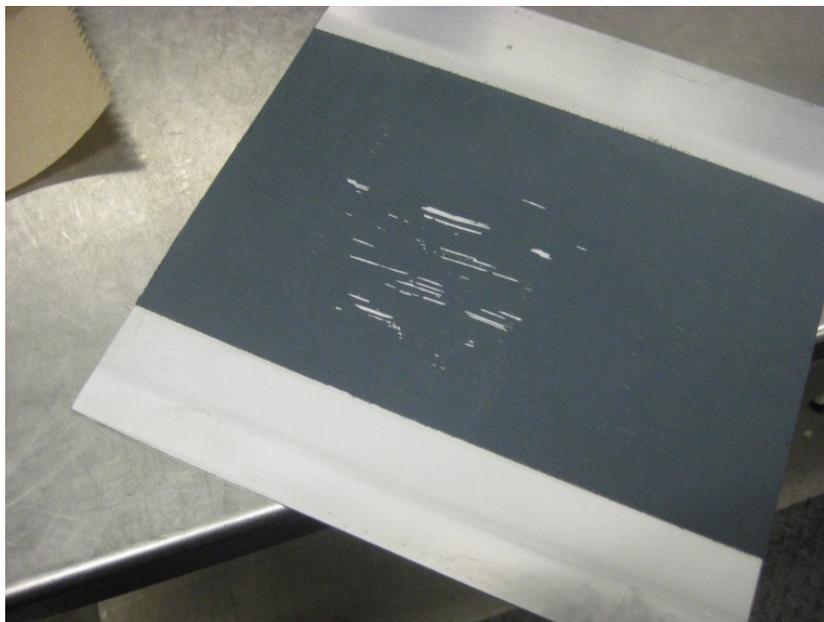


Figure 6.9: Échantillon après 5 cycles d'abrasion par projection

Résistance au décollement

Un essai de tension direct permet d'évaluer la force d'adhésion entre l'enduit et son support et donc la résistance au décollement ou à l'arrachement. Le test de tension direct peut être effectué à l'aide de l'appareil de mesure de l'adhésion des couches (AMAC) de Transports Québec selon la norme LC 25-010. Pour tester un enduit superficiel à l'aide de l'AMAC, une rondelle métallique est d'abord collée à la surface de l'enduit à l'aide de colle époxy (figure 6.10). Par la suite, un carottage superficiel est effectué autour de la rondelle (figures 6.11 et 6.12). Enfin, l'AMAC est fixé au disque et une force de tension est appliquée (figure 6.13). La force maximale lors du décollement du disque est enregistrée et peut être convertie en indice d'adhésion qui s'exprime en MPa en divisant la force mesurée par l'aire de la rondelle. Les figures 6.14 et 6.15 présentent respectivement la surface de l'échantillon et le disque suite au test.



Figure 6.10: Rondelle métallique collée à l'époxy à la surface du PerfectCool M



Figure 6.11: Carottage superficiel autour de la rondelle métallique



Figure 6.12: Échantillon de PerfectCool M suite au carottage superficiel



Figure 6.13: Échantillon de PerfectCool A soumis à l'essai de tension direct



Figure 6.14: Surface de l'échantillon de PerfectCool M suite à l'essai



Figure 6.15: Surface de la rondelle de métal suite à l'essai

Cycle de gel et de dégel

La résistance des enduits aux cycles de gel et de dégel peut être évaluée à l'aide de bassin de gel et de dégel selon la norme ASTM C666. Les échantillons sont soumis à un gel dans l'air à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et un dégel dans l'eau à $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un cycle complet de gel et de dégel est complété en environ 3 heures. Cet essai permet de tester deux effets du gel et du dégel sur les échantillons. Tout d'abord, une dégradation de l'enduit peut provenir d'un comportement différentiel d'allongement et de contraction entre l'enduit et son support ce qui pourrait entraîner des ruptures à la surface de l'enduit. Ensuite, comme le dégel est effectué dans l'eau, une pénétration de l'eau à l'interface entre l'enduit et le support pourrait entraîner une rupture par décollement lors du gel. Les échantillons utilisés pour les cycles de gel dégel sont décrits à la section 6.3.2.

Essais non retenus

En plus des trois essais retenus, deux autres essais ont été considérés afin d'évaluer la durabilité des enduits : le *wet track abrasion test* et l'essai à l'orniéreur.

Le *wet track abrasion test* est habituellement utilisé pour évaluer la tenue à l'abrasion de coulis bitumineux lorsque ceux-ci sont submergés d'eau. L'abrasion est effectuée à l'aide d'un patin de

caoutchouc sur lequel une pression normale est appliquée. Le patin effectue un mouvement circulaire à la surface de l'échantillon. La norme ASTM D3910 décrit la procédure de l'essai. La figure 6.16 présente un échantillon soumis *au wet track abrasion test*.

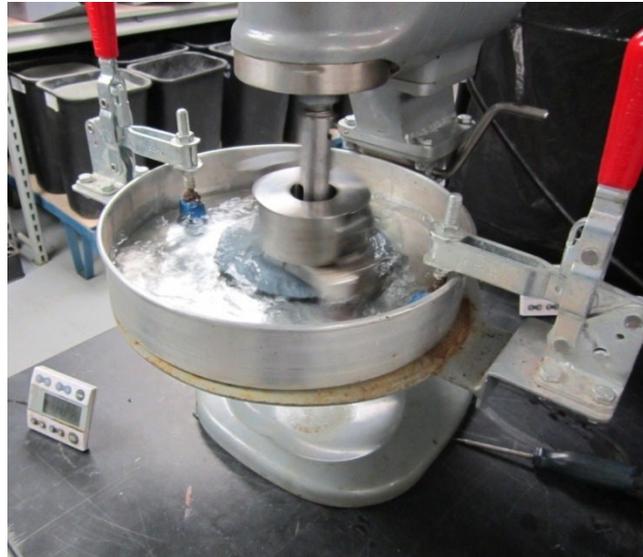


Figure 6.16: Essai de *Wet Track Abrasion* en cours

Pour l'évaluation d'enduit superficiel, une rondelle d'enrobé bitumineux confectionné à l'aide d'une presse giratoire et ensuite coupée en mince plaque à l'aide d'une scie a été utilisé comme support tel qu'illustré à la figure 6.17. L'enduit a ensuite été appliqué à la surface de la rondelle selon le taux de pose spécifié par le manufacturier tel qu'illustré à la figure 6.18. Suite aux passages répétés du patin, la perte de masse d'enduit peut être mesurée.



Figure 6.17: Type de support utilisé pour l'essai d'abrasion

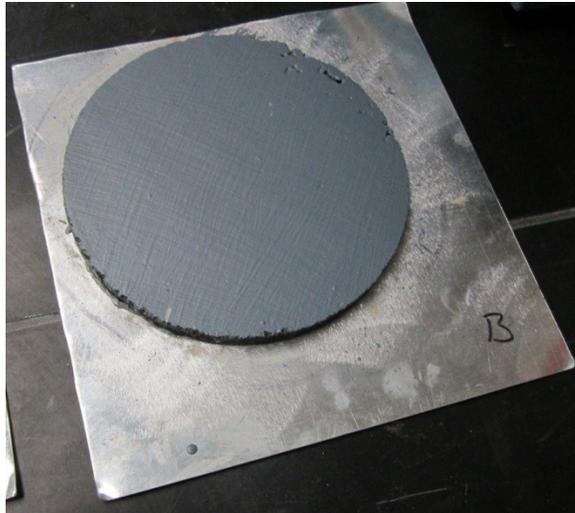


Figure 6.18: Échantillon avec enduit PerfectCool AP avant l'essai d'abrasion

Pour tous les échantillons testés, aucune perte de masse n'a été observée lorsque l'essai était effectué selon les spécifications de la norme ASTM D3910. Aucune dégradation n'était observée pour un temps d'abrasion d'environ 10 minutes. Des pertes de masse importantes étaient observées lorsque du sable était saupoudré à la surface de l'échantillon avant le début de l'essai. La dégradation était alors très rapide. La figure 6.19 représente un échantillon après quelques secondes d'abrasion lorsque du sable était placé à la surface.

Le *wet track abrasion test* effectué selon la norme ASTM D3910 ne représente donc pas un essai permettant d'évaluer la durabilité d'enduit superficiel. L'essai pourrait être adapté en utilisant un patin plus abrasif (ex. : brosse de métal) ou en ajoutant un abrasif à la surface de l'échantillon.



Figure 6.19: Échantillon avec enduit PerfectCool A après l'essai d'abrasion

En plus du *wet track abrasion test*, l'essai à l'orniéreur a aussi été évalué. L'essai à l'orniéreur est utilisé afin de mesurer la résistance à l'orniérage lors de la formulation de mélange d'enrobé bitumineux. Les détails de l'essai sont spécifiés par la norme LC 26-415 de Transports Québec. Des échantillons tels que ceux décrits à la section 6.3.2 sont utilisés pour effectuer le test. L'essai consiste à simuler le passage répété de pneumatiques sur la chaussée afin de déterminer la résistance à la déformation des enrobés. Une force est appliquée au pneumatique et l'échantillon d'enrobé est chauffé. Suite à un nombre de passages prédéterminé, la déformation de l'échantillon est mesurée. La figure 6.20 présente l'appareil utilisé pour effectuer l'essai.

Pour l'évaluation de la durabilité d'un enduit, une charge de 1 kN a été appliquée au pneumatique et l'essai s'est effectué à la température de la pièce. Aucune dégradation n'a été observée suite à 22 000 cycles de chargement. En effet, la roue effectue une pression normale à l'enduit. Afin de pouvoir observer une dégradation, une sollicitation en cisaillement devrait être exercée à la surface de l'enduit. L'essai pourrait aussi être modifié en ajoutant des abrasifs à la surface de l'enduit.



Figure 6.20: Échantillon de PerfectCool AP avant le début de l'essai à l'orniéreur

6.6.2 Résultats et analyse

Résistance à l'abrasion

Deux échantillons ont été soumis à l'essai d'abrasion par projection. L'enduit PerfectCool A a été utilisé pour fabriquer les deux échantillons. Un des échantillons a été préparé sans ajouter le sable qui procure une meilleure micro texture à l'enduit; l'autre échantillon a été préparé avec le sable. Les figures 6.21, 6.22 et 6.23 présentent l'échantillon sans sable après 5, 20 et 30 cycles de projection alors que les figures 6.24 et 6.25 présentent l'échantillon avec sable après 20 et 30 cycles de projection.

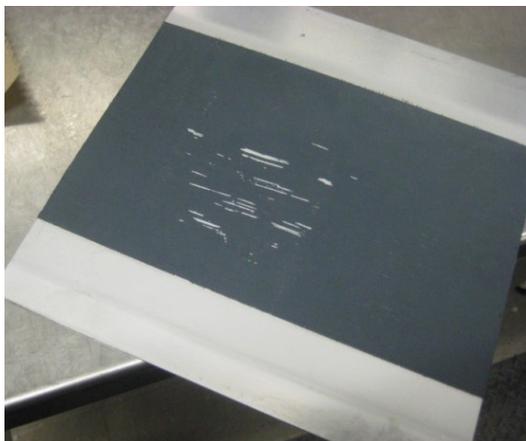


Figure 6.21: Plaque de PerfectCool A sans sable après 5 cycles

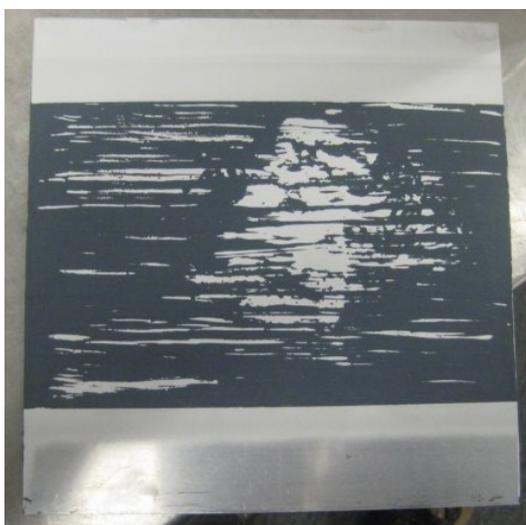


Figure 6.22: Plaque de PerfectCool A sans sable après 20 cycles

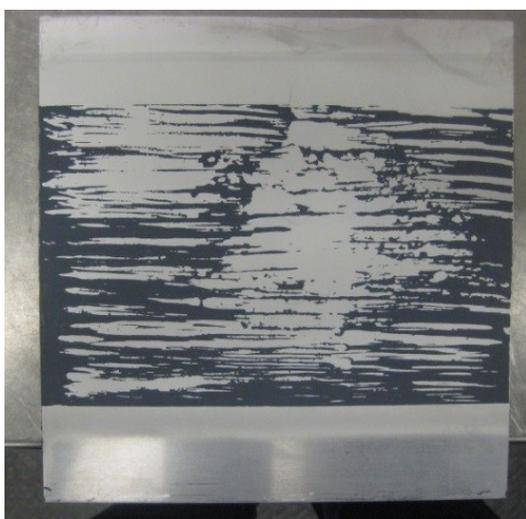


Figure 6.23: Plaque de PerfectCool A sans sable après 30 cycles

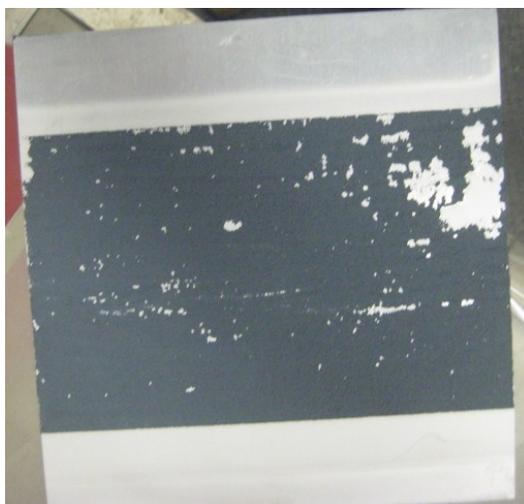


Figure 6.24: Plaque de PerfectCool A avec sable après 20 cycles



Figure 6.25: Plaque de PerfectCool A avec sable après 30 cycles

Le tableau 6.8 présente les résultats obtenus lors de l'essai.

Tableau 6.8: Résultats des essais de résistance à l'abrasion par projection

Nombre de cycles	PerfectCool A (Avec sable)				PerfectCool A (Sans sable)			
	Masse totale d'enduit (g)	Perte de masse cumulative (g)	Perte de masse cumulative (%)	Perte par cycle (%)	Masse totale d'enduit (g)	Perte de masse cumulative (g)	Perte de masse cumulative (%)	Perte par cycle (%)
0	12,7	0	0,0%	0,0%	4,98	0	0%	0,0%
5	12,18	0,52	4,1%	0,8%	4,4	0,58	12%	2,3%
20	6,73	5,97	47,0%	2,9%	1,99	2,99	60%	3,2%
30	4,38	8,32	65,5%	1,9%	0,81	4,17	84%	2,4%

La figure 6.26 présente un graphique de la masse total d'enduit en fonction du nombre de cycle.

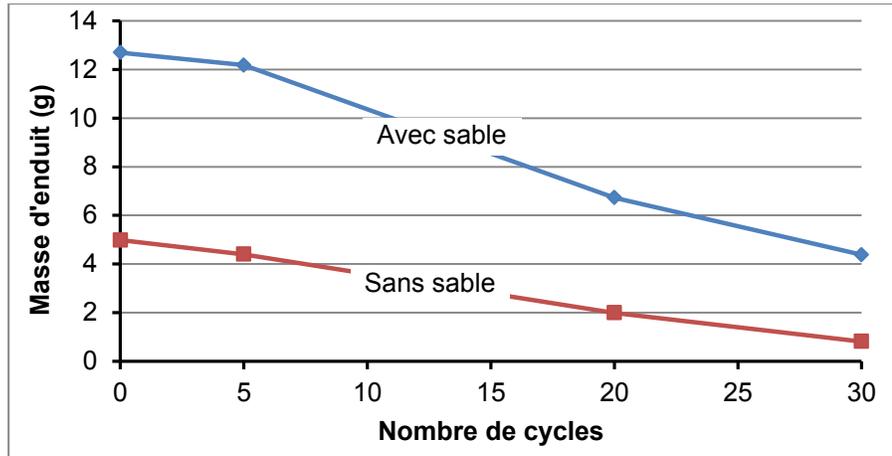


Figure 6.26: Masse totale de l'enduit sur la plaque lors de l'essai de résistance à l'abrasion par projection

La figure 6.27 présente la perte de masse cumulative en pourcentage en fonction du nombre de cycles.

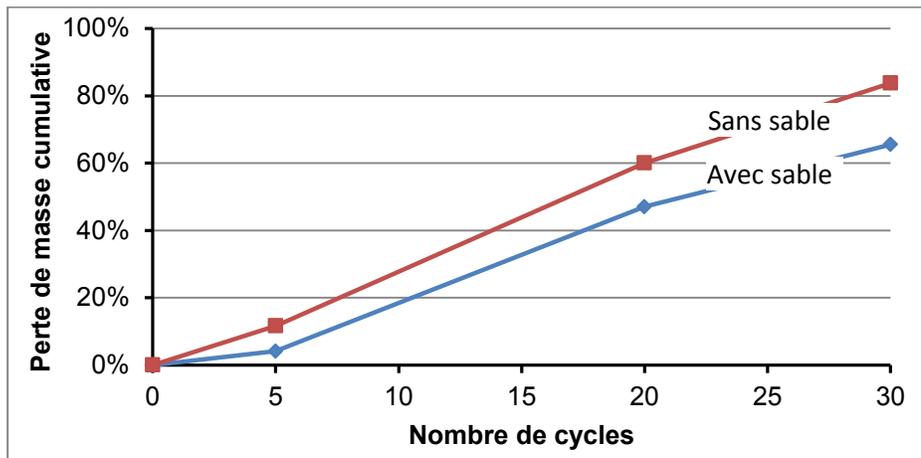


Figure 6.27: Perte de masse cumulative de l'enduit sur la plaque lors de l'essai de résistance à l'abrasion par projection

Les figures 6.26 et 6.27 permettent de comparer la performance des deux échantillons. L'échantillon avec sable semble présenter une meilleure résistance à l'abrasion comparativement à l'enduit sans sable. Le sable offrirait donc des bénéfices liés à la durabilité en plus de favoriser une bonne micro texture de la surface. Comme il n'existe pas de résultats avec lesquels il est possible de comparer ceux obtenus dans le cadre du projet, il est hasardeux d'évaluer si les enduits testés présentent une bonne résistance à l'abrasion. Il serait difficile d'effectuer une corrélation directe entre le nombre de cycles de projection et un nombre de passages de véhicule sur la chaussée

sans avoir un nombre significatif de données. Comme la dégradation de l'enduit sur une chaussée est le phénomène combiné de plusieurs facteurs, le test d'abrasion par projection ne permet pas de déterminer directement la durée de vie des enduits. Cet essai permet de faire une évaluation comparative entre différents enduits. Les résultats obtenus semblent indiquer que l'essai permet d'évaluer efficacement la résistance à l'abrasion d'un enduit superficiel.

Résistance au décollement

Trois enduits différents ont été utilisés pour évaluer la résistance au décollement des enduits superficiels à l'aide de l'AMAC. Pour ces trois échantillons, la rupture a été observée directement à l'interface entre l'enduit et la sous-couche d'enrobé bitumineux. Ainsi, la force mesurée lors de décollement permet d'obtenir un indice d'adhésion entre l'enduit et la sous-couche. L'indice d'adhésion est donc de 0,87 MPa pour le PerfectCool A, de 0,56 MPa pour le PerfectCool AP et de 0,85 MPa pour le PerfectCool M.

L'AMAC est habituellement utilisé pour mesurer la force de liaison entre deux couches d'enrobé bitumineux. Il est donc hasardeux de comparer les valeurs typiquement obtenues à l'aide de l'AMAC aux résultats obtenus ici. Ces valeurs peuvent toutefois offrir un ordre de grandeur pour évaluer si les forces d'adhésion obtenues sont bonnes ou non. En effet, l'adhésion est considérée bonne entre deux couches d'enrobé bitumineux lorsque l'indice d'adhésion est de 0,4 MPa. La valeur minimale pour l'adhésion entre deux couches est de 0,2 MPa. Comme les valeurs obtenues sont largement supérieures à ces valeurs minimales, l'adhésion entre les différents enduits PerfectCool peut être jugée satisfaisante.

Tout comme pour l'essai de résistance à l'abrasion par projection, il est possible d'effectuer une évaluation comparative entre les différents enduits. Par contre, comme la sous-couche et le taux de pose ont certainement un impact sur les résultats, il est primordial de normaliser les conditions d'essai afin de pouvoir faire des comparaisons. L'essai de tension directe pourrait être utilisé davantage comme un seuil que pour comparer des enduits. Plusieurs essais seraient nécessaires afin de déterminer une valeur seuil qui assurerait un bon comportement en résistance au décollement des enduits. Les problématiques de décollement des enduits superficiels en contexte nordique sont souvent associées à des problèmes lors de la mise en place sur le chantier. Comme l'AMAC est un appareil portable, il pourrait être judicieux d'effectuer des vérifications suite à la mise en place sur le terrain. L'essai pourrait aussi être effectué sur des carottes de forage réalisées sur le chantier.

Résistance aux cycles de gel et de dégel

Les échantillons de trois enduits ont été soumis aux cycles de gel et de dégel. Il s'agit des trois enduits de Nippo : le PerfectCool A, le PerfectCool AP et le PerfectCool M. Les trois échantillons ont été soumis à 72 cycles de gel et de dégel sur une période de 9 jours. Aucun signe de

dégradation n'a été observé visuellement sur les échantillons. La surface des échantillons a aussi été grattée à l'aide d'une spatule métallique afin d'évaluer l'état des enduits. Les enduits semblaient intacts. Les figures 6.28, 6.29 et 6.30 présentent respectivement les échantillons de PerfectCool A, de PerfectCool AP et de PerfectCool M suite aux 72 cycles de gel et de dégel.

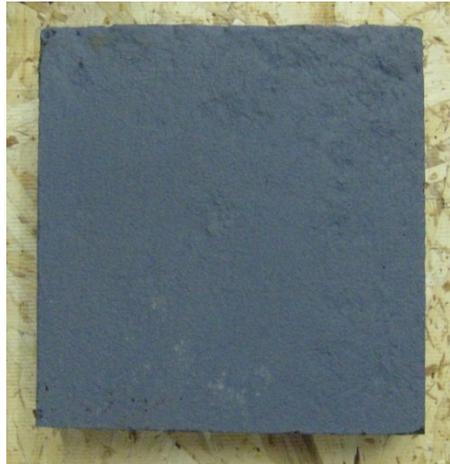


Figure 6.28:Échantillon de PerfectCool A après 72 cycles de gel et de dégel



Figure 6.29: Échantillon de PerfectCool AP après 72 cycles de gel et de dégel



Figure 6.30: Échantillon de PerfectCool M après 72 cycles de gel et de dégel

Durabilité des enduits de la planche expérimentale

La durabilité des enduits de la planche expérimentale de Beaver Creek n'a pu être évaluée à l'aide d'essai de laboratoire. Il aurait été possible de réaliser l'essai de résistance au décollement à l'aide de l'AMAC directement sur le terrain. Les essais de résistance à l'abrasion et de résistance aux cycles de gel et de dégel peuvent seulement être effectués en laboratoire. La dégradation des enduits un hiver après leur mise en place a pu être évaluée visuellement.

La figure 6.31 présente une comparaison entre l'état des surfaces lors de la mise en place et lors de la visite de mai 2013.



Figure 6.31 : État des surfaces, à gauche en 2012 suite à la mise en place de la planche expérimentale, à droite en mai 2013

En comparant les deux photographies de la figure 6.31, la dégradation des enduits de Lafrentz et de Nippo est parfaitement visible. Les figures 6.32 et 6.33 présentent l'état des surfaces de

PerfectCool A et de Lafrentz. Cette dégradation observée seulement un hiver après la mise en place de la planche expérimentale peut être attribuée principalement à l'abrasion provenant des appareils de déneigement de la route. L'enduit de Lafrentz présente une faible dégradation. La surface a été abimée à quelques endroits seulement où l'enrobé froid sous-jacent est visible. L'enduit PerfectCool A présente une dégradation importante sur l'ensemble de la surface. Cette dégradation en apparence très sévère peut s'expliquer par la mise en place de la planche expérimentale. En effet, comme les enduits ont été appliqués sur une surface d'enrobé froid, la surface présente une surélévation par rapport au traitement de surface sous-jacent. Ainsi, la section se trouvant au bas de la photographie est particulièrement sujette à l'effet agressif de la lame des déneigeuses. La dégradation qui est observée dans le coin gauche de la surface de PerfectCool est due à la dégradation de la plateforme d'enrobé froid et non de la dégradation de l'enduit. Ainsi, en faisant abstraction de cette section, l'enduit PerfectCool présente aussi une bonne durabilité. L'enduit PerfectCool a totalement été retiré de la surface des granulats proéminents alors que ce n'est pas le cas de l'enduit de Lafrentz. Le taux de pose plus élevé du produit de Lafrentz peut expliquer cette différence de comportement. En effet, le taux de pose très faible de l'enduit de PerfectCool entraîne une dégradation presque immédiate de l'enduit se trouvant à la surface des granulats. Ainsi, l'enduit qui subsiste après un hiver se trouve principalement dans les points bas entre les granulats. Pour l'enduit de Lafrentz, une abrasion supplémentaire sera nécessaire afin de dégager les granulats proéminents.

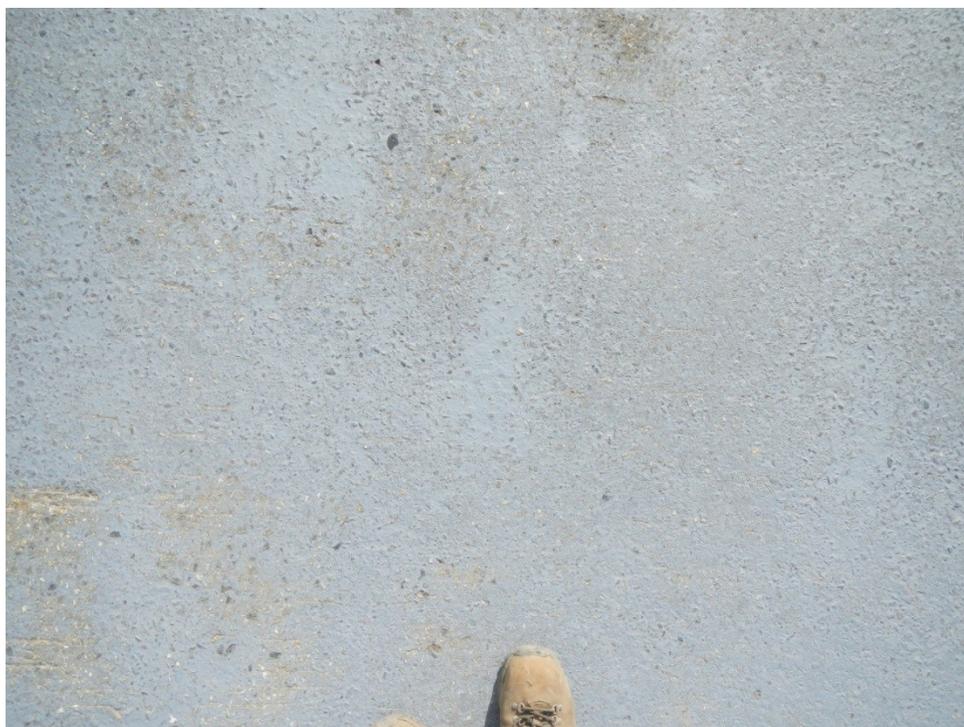


Figure 6.32 : État de la surface de PerfectCool A en mai 2013



Figure 6.33 : État de la surface de Lafrentz en mai 2013

La figure 6.34 illustre deux traces d'enduit appliqué sur le site de Beaver Creek avec l'enduit excédent suite à la mise en place de la planche d'essai. Ces traces ont été appliquées au niveau des sentiers de roues afin d'évaluer la résistance à l'abrasion des enduits appliqués sur une sous-couche de traitement bitumineux de surface. L'usure des deux enduits est plus uniforme que pour la planche expérimentale. Cette usure est plus représentative de l'usure habituelle subie par les enduits superficiels. Tel qu'expliqué précédemment, il y a de l'usure au niveau des granulats proéminents alors que l'enduit se trouvant dans les aspérités est protégé. Le taux de pose n'a pas été contrôlé pour ces traces. Le taux de pose de l'enduit de Lafrentz pour les traces semble plus faible que pour la planche expérimentale. Une dégradation plus importante au niveau des granulats a donc été observée. Le comportement de l'enduit PerfectCool A est très similaire à celui observé pour la planche d'essai. Encore une fois, le taux de pose semble plus faible que pour la planche expérimentale ce qui entraîne une dégradation plus rapide.

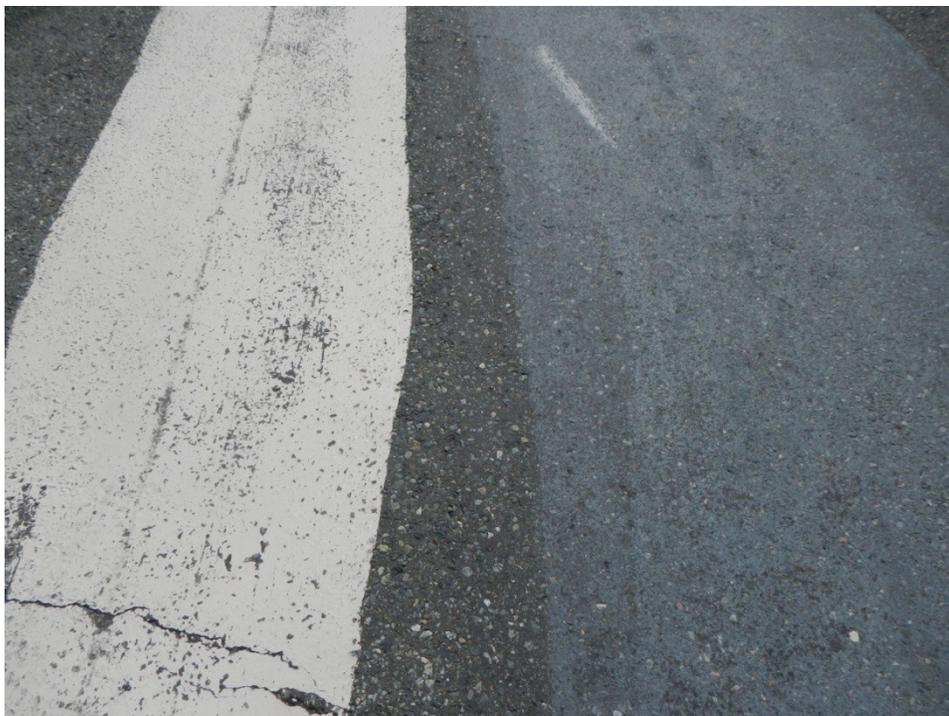


Figure 6.34: État des traces d'enduit effectuées sur un support de BST

6.7 Conclusion

En conclusion, trois propriétés ont été ciblées afin d'évaluer le comportement des enduits à albédo élevé : la réflectivité solaire, l'adhérence et la durabilité. L'albédo caractérise la réflectivité solaire et peut être mesuré à l'aide d'un pyranomètre. Les valeurs d'albédo ont été mesurées pour les surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek et pour les échantillons de laboratoire. L'adhérence se caractérise par la macro texture et la micro texture. L'adhérence a été évaluée pour les surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek et pour certains échantillons de laboratoire. Les résultats obtenus démontrent un bon comportement en adhérence des enduits de la section de Beaver Creek. La durabilité peut être évaluée en laboratoire à l'aide de la résistance à l'abrasion, de la résistance au décollement et de la résistance aux cycles de gel et de dégel. Les essais retenus pour l'évaluation de la durabilité sont l'abrasion par projection, l'appareil de mesure de l'adhésion des couches et les cycles de gel et de dégel en bain conditionné. Les résultats permettent de conclure que la durabilité des enduits peut être évaluée efficacement par les essais retenus.

7 Discussion

7.1 Planche d'essai de Beaver Creek

7.1.1 Comportement thermique de la planche d'essai

Le comportement thermique des revêtements de la planche d'essai est généralement conforme à ce qui était attendu. Les revêtements à albédo élevé ont des températures superficielles plus basses durant l'été que les revêtements ayant un albédo plus faible. Durant l'hiver lorsque la radiation solaire est très faible, tous les revêtements ont des températures superficielles semblables.

Les températures superficielles de l'enduit PerfectCool et du traitement de surface à granulats clairs sont presque égales durant la période estivale, et ce même si leur albédo est différent. Durant les premiers mois après la pose de la planche d'essai, l'enduit PerfectCool A possède un albédo d'environ 0,40 alors que le traitement de surface a un albédo de 0,23. La différence entre ces deux revêtements se situe principalement au niveau de la macro texture. Le traitement de surface à granulats clairs possède une macro texture beaucoup plus élevée que l'enduit PerfectCool A. L'effet de la macro texture sur les températures superficielles avait été relevé par Berg en 1985. Il émettait l'hypothèse que les revêtements à forte macro texture sont plus rugueux et qu'ils représentent de meilleurs radiateurs. De plus, les plus gros granulats produisent de l'ombre à la surface du revêtement ce qui a pour effet d'exposer moins la surface aux radiations solaires. Ces deux phénomènes expliquent, selon Berg, la température superficielle plus basse des revêtements ayant une plus forte macro texture. Une autre hypothèse peut aussi être formulée pour expliquer ce phénomène : l'albédo d'une surface varie durant la journée. Cette variation provient principalement de la variation du contenu spectral de radiation des rayons solaires incidents. De plus, en fin et en début de journée, plus d'ombre se trouve à la surface des revêtements à forte macro texture. Comme le contenu spectral du rayonnement diffus (ombre) est principalement composé de rayons dans le spectre du visible et que les revêtements n'ont pas une réflexion spectrale parfaitement égale, la variation du contenu spectral du rayonnement incident entraîne une variation de l'albédo global. Pour un revêtement ayant une réflectivité sélective tel que l'enduit PerfectCool A, une augmentation du pourcentage de rayons visibles dans le spectre du rayonnement incident entraîne une diminution de l'albédo global. Comme les matériaux routiers standards réfléchissent légèrement plus de rayons visibles que de rayons infrarouges, il y a une réduction diurne de la réflectivité. Ainsi, alors que l'albédo de l'enduit PerfectCool A diminue en fin et en début de journée par rapport à la valeur mesurée à midi, l'albédo du traitement de surface augmente. Donc, l'albédo moyen est sensiblement le même, et ce, même si l'albédo à midi est différent, ce qui explique en partie que les températures superficielles soient égales. Ce phénomène a aussi été observé pour l'albédo global d'une ville (Mayor et coll. 1997) et pour différents types de couverts de sol (Li et coll.

2012). Ce phénomène est aussi exploité en agriculture afin de réduire les températures du sol et de diminuer la quantité d'eau d'irrigation (Matthias et coll., 2000). Des sols en amas sont utilisés et des sillons sont créés à la surface du sol pour augmenter la macro texture. Il s'agit ici de macro texture à une échelle beaucoup plus importante que pour les revêtements routiers, mais le principe de variation de l'albédo est le même.

7.1.2 Propriétés techniques des revêtements de la planche d'essai

Le traitement de surface et l'enrobé froid sont des revêtements déjà largement utilisés, il n'est donc pas nécessaire d'analyser la performance de ces revêtements en détail. Les enduits de Lafrentz et PerfectCool A nécessitent quant à eux une analyse plus poussée. La faible adhérence représente la défaillance technique principale de ce type de produit. L'enduit de Lafrentz présentait une hauteur sable inférieure à la valeur minimale et à la valeur recommandée par la norme Française. De plus, son adhérence lorsqu'évaluée à l'aide du pendule britannique se situait sous le seul admissible pour l'utilisation dans les courbes. L'enduit de Nippo présentait une hauteur au sable au-dessus du seuil minimal mais sous le seuil recommandé, mais une adhérence au pendule britannique supérieure à la valeur minimale. Le sable ajouté au produit de Nippo avant sa mise en place semble donc avoir l'effet escompté.

La macro texture joue un rôle plus important pour les revêtements routiers des autoroutes. Lors de la pose d'enduit, une partie de la macro texture du support est comblée par l'enduit. L'enduit de Lafrentz appliqué selon un taux de pose supérieur à l'enduit PerfectCool présentait d'ailleurs une macro texture inférieure à celle du PerfectCool. Il est donc important de considérer la macro texture du support avant l'application d'enduit et d'évaluer l'effet de pose de couches subséquentes d'enduit.

Un enduit à albédo très élevé peut aussi présenter des problèmes de givre. Lors de la visite de terrain de mai 2013, une fine couche de glace recouvrait la surface de Lafrentz en matinée alors que les autres surfaces étaient complètement découvertes de glace. Ce givre superficiel réduit considérablement l'adhérence des pneus à la chaussée et peut présenter des problèmes de sécurité routières. Le givre peut présenter un problème si seulement une section de l'infrastructure est recouverte d'un enduit à albédo élevé. L'utilisateur de la route doit alors modifier son comportement ponctuellement. Il est donc recommandé d'indiquer à l'aide de signalisation routière verticale la présence de section recouverte. Cette signalisation permet d'avertir l'utilisateur afin qu'il puisse modifier sa conduite et que la présence d'un enduit à albédo élevé souvent de couleur différente au revêtement de la route ne crée pas un effet de surprise.

La durabilité des enduits a pu être évaluée à l'aide des enduits installés à Beaver Creek. La dégradation des surfaces observée durant la première année est très importante. L'albédo des revêtements de Lafrentz et du PerfectCool A a diminué considérablement à la première année. Le

PerfectCool A présentait une baisse particulièrement importante. Par contre, après la deuxième année, l'albédo des enduits était stable. Ainsi la dégradation des enduits semblait particulièrement problématique la première année et semble se stabiliser très rapidement dès la deuxième année. La dégradation des enduits est principalement due aux passages très agressifs des déneigeuses. Il pourrait être bénéfique de considérer une méthode de déneigement moins agressive pour les surfaces recouvertes d'un enduit à albédo élevé.

Il est important de noter que la couleur joue un rôle important sur la sécurité routière. Ainsi, l'enduit blanc de Lafrentz ne représente pas une solution idéale malgré son très bon comportement thermique. Il est essentiel de ne pas considérer seulement l'albédo d'un enduit pour faire son évaluation, la couleur de l'enduit doit aussi être évaluée. Même si les surfaces très pâles représentent généralement des valeurs d'albédo plus élevées, un compromis sur la réflectivité doit être fait en sélectionnant une couleur mieux adaptée aux utilisateurs afin d'éviter la fatigue visuelle et d'offrir un bon contraste notamment avec le marquage routier. Des enduits très pâles pourraient tout de même être utilisés ponctuellement pour traiter des problèmes très localisés tout en s'assurant d'indiquer clairement leur présence aux usagers de la route. La plupart des produits d'enduits superficiels peuvent être pigmentés selon les besoins.

7.2 Modèle de calcul de température superficielle

7.2.1 Calibration du modèle

Le modèle proposé s'inspire largement du modèle d'Hermansson (2004). Il n'est donc pas nécessaire de discuter chacun des choix de paramètres. Ceux ayant fait l'objet d'une modification seront discutés ici. L'objectif du modèle étant de simplifier et de faciliter l'utilisation des modèles existants, les paramètres n'offrant qu'un bénéfice marginal quant à la précision du modèle ont été ignorés. En ce sens, le modèle présenté ici représente un compromis acceptable entre la précision au bénéfice d'une plus grande simplicité.

Radiation solaire

L'absorption de chaleur par la surface est principalement gérée par l'albédo de la surface. Il est donc primordial de porter une attention particulière à ce paramètre. Dans le modèle, le seul paramètre utilisé est l'albédo d'été mesuré lorsque le soleil est au zénith. Tel que discuté précédemment, l'albédo subit une variation diurne ce qui influence de manière importante l'absorption de radiation solaire. Cette variation n'a pas été incorporée au modèle, car elle est très complexe à modéliser. De plus, il serait très difficile pour un utilisateur du modèle n'ayant pas une connaissance très étendue du sujet de définir les variables responsables de cette variation. Comme la variation est principalement due à la macro texture, il pourrait être adéquat de modéliser celle-ci à partir de ce paramètre simple à mesurer. Par contre, la variation est aussi fonction de la réflectivité spectrale de la surface qui peut être complexe à mesurer et de la variation du contenu

spectral du rayonnement solaire. L'impact de cette variation de l'albédo sur les températures superficielles est cependant minime. Il est donc adéquat d'ignorer cette variation afin d'alléger le modèle.

De plus, la variation de l'albédo durant l'hiver a été pratiquement ignorée dans le modèle. Une mention en est faite dans la section 5.2.2, par contre aucun des outils proposés ou des validations présentées ne tiennent en compte de cette variation. En fait, comme la radiation solaire en contexte nordique est très faible durant l'hiver la variation d'albédo a un impact négligeable sur les températures. De plus, la relation proposée à l'équation 5.3 n'est qu'une relation empirique basée sur un nombre très limité d'observations. Enfin, comme le modèle tend à sous-estimer les températures hivernales, l'utilisation des valeurs d'albédo d'été qui sont plus élevées que durant l'hiver permet d'offrir une meilleure précision. Encore une fois, l'utilisation du modèle s'en trouve simplifiée. Il est possible d'utiliser la valeur d'albédo que le concepteur juge convenable si les abaques sont utilisés ou si les équations sont résolues directement.

Radiation infrarouge

Les mêmes paramètres que ceux proposés par Hermansson (2004) ont été utilisés. La seule différence se situe au niveau de la définition des saisons. Deux périodes sont considérées dans le modèle, la période de dégel (l'été) et la période de gel (l'hiver). Le modèle d'Hermansson (2004) s'adapte quotidiennement aux conditions climatiques en considérant une valeur seuil de radiation solaire et de température. Le modèle proposé ici considère seulement la température comme critère. Ainsi, les paramètres d'été sont appliqués lorsque la température moyenne de l'air est supérieure à 0°C et les paramètres d'hiver lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C. Ce critère est plus simple à appliquer et il s'adapte mieux aux différentes latitudes. En effet, le seuil définissant une radiation solaire faible ou élevée n'est pas le même pour toutes les latitudes. Un critère qui considère la radiation solaire comme seuil devrait pouvoir s'adapter aux différentes latitudes ce qui peut être complexe à définir.

Convection

Le modèle d'Hermansson inclut une variation des coefficients empiriques de l'équation du coefficient de convection entre la saison d'été et d'hiver. Cette variation prend en compte la modification du type de convection entre la période hivernale et estivale. Hermansson ignore donc complètement la convection forcée durant l'hiver et augmente par près d'un facteur 3 le coefficient de la convection libre. Mise à part l'augmentation de la précision du modèle, il ne semble pas justifié de complètement ignorer la vitesse du vent et donc la convection forcée durant l'hiver. L'augmentation de l'intensité de la convection libre entre la surface et l'air n'est pas non plus justifiée. Afin de simplifier le modèle et de garder des coefficients cohérents avec ce qui est observé sur le terrain, aucun ajustement n'est appliqué au coefficient de convection pour la période hivernale. La précision du modèle reste tout de même très bonne.

Conduction

Tel que discuté précédemment, la conduction a été modélisée différemment de ce qui est généralement utilisé dans ce type de modèle. Le flux de conduction a été modélisé à l'aide de la radiation solaire absorbée par la surface durant l'été. Le flux par conduction durant l'hiver est considéré comme l'inverse du flux durant l'été. Ces flux ont été validés en les comparant aux flux mesurés sur le terrain. Cette façon de modéliser le flux de conduction est particulièrement adéquate pour la période estivale. En estimant que le flux d'hiver est exactement l'inverse de flux durant l'été, il est considéré qu'il y a équilibre entre la quantité de chaleur qui pénètre sous le revêtement durant l'été et la quantité de chaleur qui est extraite par la surface du revêtement durant l'hiver. L'utilisation des revêtements à albédo élevé vise à diminuer l'absorption de chaleur par le revêtement par rapport à l'extraction de chaleur. Ainsi, il n'y a pas équilibre et la quantité de chaleur extraite durant l'hiver est supérieure. Le flux de conduction devrait être plus important durant l'hiver que durant l'été pour les revêtements ayant des albédos très élevés. Il faudrait donc ajuster le flux de chaleur durant l'hiver par rapport à l'albédo du revêtement. La principale lacune du modèle est justement au niveau du calcul des températures hivernales des revêtements à albédo plus élevé. Le nombre limité de données disponibles n'a pas permis de développer un modèle robuste pour les conditions climatiques particulières de l'hiver. Ce manque de précision provient probablement de la sous-estimation du flux de conduction durant l'hiver due à sa modélisation inadéquate.

7.2.2 Validation du modèle

La précision qu'offre le modèle de calcul est largement satisfaisante en considérant sa simplicité. Le modèle est particulièrement précis pour le calcul des valeurs mensuelles ou saisonnières moyennes. Le modèle calcule très précisément les températures durant la période de dégel lorsque la température de l'air est supérieure à 0 °C et ce sur toute la gamme des valeurs d'albédo typiques des revêtements routiers. Tel que discuté précédemment, le modèle manque légèrement de précision pour le calcul des températures hivernales des revêtements à albédo élevé. Le projet vise principalement l'évaluation du comportement estival des revêtements à albédo élevé ce que le modèle fait adéquatement.

Validation avec moyenne mensuelle et quotidienne

Le modèle offre généralement une bonne précision lors du calcul des températures mensuelles. Cependant, certains écarts de températures sont observés. Ces écarts peuvent s'expliquer par le fait que le modèle ignore l'inertie thermique qui provient de la capacité calorifique des matériaux. Lorsque les températures varient grandement d'un mois à l'autre, le modèle ne tient pas en compte des températures du mois précédent. Le phénomène est encore plus marqué pour les températures quotidiennes alors que les conditions météorologiques peuvent varier drastiquement d'un jour à l'autre. Lorsque les indices de gel et de dégel sont calculés, ceux-ci se

comparent bien aux indices mesurés. En fait, comme l'inertie thermique est ignorée autant lorsque les températures augmentent que lorsqu'elles diminuent, les moyennes restent assez précises.

Il y a sous-estimation systématique des températures très froides sous les $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette sous-estimation provient probablement du fait que la chaleur latente provenant du remblai est partiellement ignorée dans le modèle. Bien que la modélisation de la conduction prenne en compte partiellement la chaleur latente, la distribution de son intensité n'est pas modélisée convenablement. En effet, le flux de chaleur latente est très important au début de la période de gel et lorsque les températures sont très froides. En modélisant, le flux de conduction de manière sinusoïdale, le flux de chaleur latente est plutôt distribué plus également sur l'ensemble de la période de gel. Ainsi, le flux de chaleur latente est sous-estimé lorsque les températures sont très froides, le modèle prédit donc des températures plus froides que celles calculées. Même si l'intensité du flux de chaleur latente a une valeur relativement faible, le modèle est très sensible à la moindre variation de flux lors de la période de gel. C'est pourquoi les températures sont sous-estimées de plusieurs degrés Celsius.

7.2.3 Utilisation du modèle et des outils de calcul

Les outils de calcul proposés sont simples à utiliser pour les usagers peu expérimentés. Par contre, ces outils sont peu flexibles. Ainsi, un utilisateur ayant une connaissance approfondie du bilan de chaleur à la surface d'un revêtement routier serait mieux servi par l'utilisation directe des équations. Dans une optique d'évaluation préliminaire des revêtements à albédo élevé, les outils proposés offrent une précision largement satisfaisante. Leur utilisation est particulièrement intéressante en raison de la rapidité des calculs. Ces outils ont principalement été conçus pour la comparaison entre plusieurs revêtements différents.

7.3 Propriétés des revêtements routiers à albédo élevé

7.3.1 Programme de laboratoire

Les essais proposés pour évaluer l'adhérence et la réflectivité solaire sont bien adaptés à l'évaluation des revêtements routiers à albédo élevé aussi bien en laboratoire que sur le terrain ou qu'en réalisant des planches d'essai.

Le nombre très limité de produits avec lequel il a été possible de faire des essais de durabilité n'a pas permis de récolter suffisamment de données afin de tirer des conclusions claires de chacun de ces essais. Par contre, le programme de laboratoire proposé des essais de durabilité qui pourraient convenir à évaluer adéquatement les enduits avant leur mise en place. Ces essais pourraient permettre de déceler les produits qui sont inadéquats ou qui présentent des comportements particulièrement problématiques. La réalisation de plusieurs essais pourrait d'ailleurs permettre d'améliorer les méthodes d'essais proposées.

Réflectivité solaire

Tel que mentionné à la section, 7.1.1, la réflectivité solaire varie durant la journée. La norme ASTM E1918 spécifie que l'albédo doit être mesuré lorsque le soleil est près du zénith. Ainsi, l'effet de la variation de l'albédo au courant de la journée n'est pas mesuré. Comme, il s'agit d'un paramètre qui semble avoir un impact important sur les températures superficielles, il pourrait être judicieux d'évaluer cette variation. Les restrictions associées à l'utilisation d'un pyranomètre ne permettent pas de mesurer cette variation. Un essai capable de mesurer l'ensemble de la réflectivité spectrale d'une surface pourrait être utilisé afin de mieux quantifier la variation de l'albédo. Comme le contenu spectral du rayonnement solaire incident est connu au cours de toute la journée, la réflectivité spectrale pourrait permettre de quantifier la variation de l'albédo. Il serait nécessaire de combiner ces paramètres à la quantité d'ombre à la surface au courant de la journée. La quantité d'ombre à la surface pourrait être définie en fonction de la macro texture, car il s'agit du paramètre principal ayant une influence sur celle-ci.

Adhérence

Les deux essais utilisés pour évaluer l'adhérence sont très communs et ne nécessitent pas de faire l'objet de discussion supplémentaire. Il est important de soulever à nouveau l'impact du support sur les propriétés d'adhérence. Donc, lors de l'évaluation d'enduits en laboratoire il est primordial d'opter pour un support reproduisant bien les conditions réelles de terrain. En effet, les valeurs obtenues sur le terrain étaient très différentes de celles des échantillons de laboratoire.

Durabilité

Les essais proposés pour évaluer la durabilité des enduits superficiels semblent pouvoir donner des indications quant au comportement des enduits. Ceux-ci ne permettent pas de quantifier adéquatement la dégradation observée sur le terrain. Un effort très important serait nécessaire afin de pouvoir dresser des corrélations entre les résultats de ces essais et le comportement réel en dégradation. Un nombre d'essais considérable en plus de plusieurs planches expérimentales seraient nécessaires à l'obtention de telles corrélations. Pour les revêtements à albédo élevé, il serait intéressant de pouvoir quantifier l'évolution de l'albédo dans le temps. Les différents modes de dégradation de chacun des types de produit ont pu être observés grâce à la planche expérimentale de Beaver Creek. Bien que le nombre d'observations est très limité, la tendance générale de dégradation ou d'aggradation de l'albédo pour chacun des revêtements a été quantifiée et un ordre de grandeur pour les variations annuelles d'albédo est maintenant disponible. Lors de l'évaluation de la dégradation des enduits à albédo élevé, il est donc suggéré de demeurer conservateur quant à la durée de vie et à l'évolution de leur albédo. Enfin, les conditions particulières des environnements nordiques peuvent entraîner une dégradation prématurée par rapport aux durées de vie spécifiées par les manufacturiers d'enduits.

8 Recommandations et conclusion

8.1 Recommandations et perspectives

Suite au projet de recherche, quelques recommandations et conclusions peuvent être émises par rapport à l'utilisation de revêtement à albédo élevé en contexte nordique.

- **Les conditions climatiques ont un impact important sur l'efficacité relative des revêtements à albédo élevé** lorsque la pénétration du dégel est utilisée comme facteur d'évaluation. Ils sont plus efficaces lorsque l'indice de dégel de l'air est faible, lorsque la radiation solaire incidente est élevée et lorsque la période de dégel est longue.
- **Favoriser un support ayant une forte macro texture pour l'application d'enduit superficiel à albédo élevé.** La forte macro texture semble avoir un effet bénéfique sur la performance thermique des revêtements. De plus, la macro texture joue un rôle sur la sécurité routière et l'adhérence des pneus à la chaussée. Comme l'application d'enduit superficiel a pour effet de combler une partie de la macro texture, un support ayant une forte macro texture permet d'obtenir une macro texture finale acceptable et peut permettre une application successive de plusieurs couches d'enduit lors de réfection. La forte macro texture peut, sous certaines conditions d'applications, avoir un effet de protection des enduits superficiels.
- **Considérer l'évolution de l'albédo dans l'évaluation des revêtements à albédo élevé.** Le gain thermique qu'il est possible de réaliser grâce à l'utilisation des revêtements à albédo élevé est défini par l'écart d'albédo entre les différents revêtements considérés. Comme l'évolution de l'albédo n'est pas semblable pour les différents types de revêtement routiers, il est primordial d'évaluer l'écart d'albédo sur la durée de vie complète de l'infrastructure.

Suite au projet de recherche, plusieurs perspectives de recherches additionnelles peuvent être relevées.

- **Calibrer et valider le modèle présenté en utilisant des données provenant de sites d'essai additionnels ayant des conditions climatiques différentes du site de Beaver Creek.** Ainsi, il serait possible d'évaluer si le modèle s'adapte bien aux différentes conditions climatiques. Il serait particulièrement important de valider le modèle pour des

conditions hivernales pour des sites se trouvant à des latitudes moins nordiques. Ainsi, l'effet de la radiation solaire sur le réchauffement des revêtements routiers durant l'hiver pourrait mieux être analysé. La variation de l'albédo durant l'hiver lorsque les revêtements sont partiellement couverts de neige et de glace pourrait alors être analysée.

- **Élaborer des outils permettant d'obtenir l'albédo des différents types de revêtements routiers en fonction de leur âge et de leur composition.** Ainsi, il serait possible d'évaluer l'utilisation des revêtements à albédo élevé sans avoir à effectuer des mesures sur le terrain. Il serait aussi plus facile d'analyser l'évolution de l'albédo dans le temps.
- **Étendre le programme de laboratoire à plusieurs enduits et obtenir des corrélations avec des planches d'essais in situ.** Les essais proposés pourraient être validés. Les corrélations avec des planches in situ surtout pour les essais de durabilité permettraient de mieux évaluer la durée de vie des enduits superficiels et la dégradation de l'albédo de ces enduits.
- **Développer des techniques d'intervention basées sur les revêtements à albédo élevé en contexte nordique.** Pour ce faire, les caractéristiques géotechniques et géothermiques du pergélisol devraient être prises en considération. Il faudrait définir des paramètres géométriques d'intervention en fonction de la dégradation du remblai pour les infrastructures existantes. L'effet des revêtements à albédo élevé sur l'ensemble du remblai devrait aussi être analysé.

8.2 Conclusion

Le projet de recherche a pour objectif de quantifier l'effet de l'albédo du revêtement sur sa température superficielle et définir une approche permettant d'évaluer adéquatement les propriétés techniques assurant une utilisation efficace, durable et sécuritaire des revêtements à albédo élevés.

Pour ce faire, une planche expérimentale a été réalisée à Beaver Creek au Yukon. Quatre revêtements routiers ont été installés et instrumentés de thermistances. En plus des températures superficielles des revêtements, les conditions climatiques sont récoltées au site d'essai. Ces données ont permis de valider qu'une augmentation de l'albédo entraîne une diminution des températures superficielles des revêtements routiers. Cet effet est très marqué durant la période de dégel alors qu'il est négligeable durant la période de gel lorsque la radiation solaire est faible.

Un modèle de calcul des températures superficielles des revêtements routiers a été développé. Le modèle est basé sur le bilan d'énergie à la surface d'un revêtement routier. Les données provenant

de la planche expérimentale de Beaver Creek ont permis de calibrer et de valider ce modèle. Des outils de calcul ont été développés afin de faciliter l'utilisation du modèle. Tout d'abord une feuille de calcul permet à l'utilisateur de comparer les températures superficielles mensuelles moyennes de deux surfaces ayant un albédo différent en fournissant quelques données climatiques. De plus, des abaques de calcul permettent d'obtenir l'indice de radiation des revêtements routiers durant la période de gel et de dégel. À l'aide de ces abaques, l'utilisateur peut calculer facilement l'indice de gel et de dégel de la surface des revêtements routiers en fonction de leur albédo. Ces indices peuvent être utilisés afin de calculer la profondeur de gel ou de dégel sous le revêtement. Ainsi, un concepteur peut évaluer la pertinence d'utiliser un revêtement à albédo élevé en contexte nordique à partir des températures de surface et de la pénétration du dégel.

Enfin, une méthode d'évaluation des propriétés techniques des enduits à albédo élevé a été proposée. Trois propriétés ont été ciblées: la réflectivité solaire, l'adhérence et la durabilité. La réflectivité solaire peut être évaluée en laboratoire et sur le terrain à l'aide de l'albédo qu'il est possible de mesurer à l'aide d'un pyranomètre. Les valeurs d'albédo ont été mesurées pour les surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek et pour les échantillons de laboratoire. Ces valeurs d'albédo ont pu être utilisées afin de développer le modèle de calcul des températures superficielles. L'adhérence peut être évaluée grâce à la macro texture et à la micro texture. La macro texture est quantifiée à l'aide de la hauteur au sable alors que la micro texture est mesurée à l'aide d'un pendule britannique. L'adhérence a été évaluée pour les surfaces de la planche expérimentale de Beaver Creek et pour les échantillons de laboratoire. Enfin, la durabilité peut être évaluée en laboratoire à l'aide de la résistance à l'abrasion, de la résistance au décollement et de la résistance aux cycles de gel et de dégel. Les essais retenus pour l'évaluation de la durabilité sont l'abrasion par projection, un test en tension directe à l'aide de l'appareil de mesure de l'adhésion des couches et les cycles de gel et de dégel en chambre conditionnée. Les résultats obtenus permettent de conclure que les essais sélectionnés peuvent permettre d'évaluer la durabilité des enduits à albédo élevé.

Bibliographie

- AASHTO. (1976). *Guidelines for Skid Resistant Pavement Design*. Task Force for Pavement Design, AASHTO, Washington, D.C.
- ADOTPF. (1985). *White Paint for Highway Thaw Settlement Control, Alaska Department of Transportation and Public Facilities*, Report no. FHWA-AK-RD-85-16, Fairbanks, Alaska, pp.1-7.
- Akbari, H., & Rose, L. S. (2001). *Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of Metropolitan Chicago, Illinois and Executive Summary*.
- Akbari, H., Rose, L. S., & Taha, H. (1999). *Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Sacramento, California*.
- Andersland, O. B., F. H. Sayles, & B. Ladanyi. 1978. Mechanical properties of frozen ground. Chap. 5 in *Geotechnical Engineering for Cold Regions*, ed. O. B. Andersland and D. M. Anderson. New York: McGraw-Hill, pp. 216–75.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2004). *Frozen ground engineering* (2nd edition ed.). Hoboken, New Jersey: American Society of Civil Engineers et John Wiley & Sons Inc.
- ASTM C666. (1997). *Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3910. (2004). *Practices for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E1918. (1997). *Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Surfaces in the Field*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E303. (2003). *Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM E965. (2001). *Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Beaulac, I. (2006). *Impacts de la fonte du pergélisol et adaptations des infrastructures de transports routier et aérien au Nunavik*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.
- Beaulac, I., & Doré, G. (2006). *Airfields and Access Roads Performance Assessment in Nunavik, Quebec, Canada*. Current Practices in Cold Regions Engineering.
- Benford, F., and Bock, J. E. (1939). *A time analysis of sunshine*. Trans. Illum. Engng. Soc. N.Y. 34: 200-18.
- Berg, R. L. (1985). *Effect of Color and Texture on the Surface Temperature of Asphalt Concrete Pavements: State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities*.
- Berg, R.L., Aitken, G. (1973). *Some passive methods of controlling geocryological conditions in roadways construction*, Proc. North America Contribution, 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, URSS
- Berg, R. L., & W. F. Quinn. (1977). *Use of a light-colored surface to reduce seasonal thaw penetration beneath embankments on permafrost*. In *Proc. 2nd Int. Symp. on Cold Regions Engineering*, University of Alaska, ed. J. L. Burdick and P. Johnson. Fairbanks: Univ. of Alaska, pp. 86–99.
- Bergeron, Guy. (2014) *Communication personnelle*.
- Bjella, K. (2013). *An Investigation into a White Painted Airfield on Permafrost: Thule Air Base, Greenland*. ISCORD 2013.

- Brown, R. J. E., & W. O. Kupsch. (1974). *Permafrost Terminology*. Natl. Res. Counc. Can., Tech. Memo. 111. Cool Pavement Report. (2005). *EPA Cool Pavements Study: Task 5. Heat Island Reduction Initiative*. Cambridge Systematics.
- Cooper, P. I. (1969). *The absorption of radiation in solar stills*. Solar Energy Col. 12, 333-345.
- Corley-Lay, J. (1998). *Friction and Surface Texture Characterization of 14 Pavement Test Sections in Greenville, North Carolina*. Transportation Research Record, 1639(1), 155–161.
- Côté, J., & Konrad, J.-M. (2005). *Thermal conductivity of base-course materials*. Can. Geotech. J., 42(1), 61–78.
- DeWitt, D. P., & Incropera, F. P. (1988). *Physics of Thermal Radiation. Theory and Practice of Radiation Thermometry*, 19–89.
- De Grandpré, I. (2011). *Impacts de l'écoulement souterrain sur la dégradation du pergélisol*, mémoire de maîtrise, département de géographie, faculté des Arts et Sciences, Université de Montréal, 132 p.
- Doré, G. (2011). *Note du cours Advanced course on permafrost engineering applied to transportation infrastructure*, Yukon College, Whitehorse, Yukon.
- Doré, G., & Zubeck, H. K. (2009). *Cold Regions Pavement Engineering*: McGraw-Hill.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*.
- Dysli, M. (1991). *Le gel et son action sur les sols et les fondations*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.
- Emery, J. J., Guo, P., Stolle, D. F. E., Hernandez, J., & Zhang, L. (2014). *Light-coloured grey asphalt pavements: from theory to practice*. International Journal of Pavement Engineering, 15(1), 23–35.
- Esch, D., (1996), *Road and Airfield Design for Permafrost Conditions*, Technical Council on Cold Regions Engineering Monograph, book of Roads and Airfields in Cold Regions, Edited by Vinson, New York, pp.121-149
- Fulwider, C.W., Aitken, G.W., (1963), *Effect of surface color on thaw penetration beneath a pavement in the arctic*, 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan
- Gandil, P. (2006). *Circulaire no 2002-39 du 16 mai 2002 relative à l'adhérence des couches de roulement neuves et au contrôle de la macrotecture*. Direction des routes. NOR : EQUR0210090C.
- Gravel Gaumont, F. (2014) *Suivi des comportements thermique et mécanique du remblai de la piste de Puvirnituk*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.
- Gui, J. G., Phelan, P. E., Kaloush, K. E., & Golden, J. S. (2007). *Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(8), 683–690.
- Hall, M. R., Dehdezi, P. K., Dawson, A. R., Grenfell, J., & Isola, R. (2012). *Influence of the Thermophysical Properties of Pavement Materials on the Evolution of Temperature Depth Profiles in Different Climatic Regions*. Journal of Materials in Civil Engineering, 24(1), 32–47.
- Harlow, A. (2005). *Skid Resistance and Pavement Marking Materials*. Surface Friction Conference NZ.
- Hermansson, Å. (2000). *Simulation Model for Calculating Pavement Temperatures Including Maximum Temperature*. Transportation Research Record, 1699(1), 134–141.
- Hermansson, Å. (2001). *Mathematical Model for Calculation of Pavement Temperatures: Comparison of Calculated and Measured Temperatures*. Transportation Research Record, 1764(1), 180–188.
- Hermansson, Å. (2004). *Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: comparison of calculated and measured temperatures*. Cold Regions Science and Technology, 40(1-2), 1–17.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*, 59–84.

- Iwama, M. (2013) *Communication personnelle*.
- Iwama, M., Yoshinaka, T., Omoto, S., & Nemoto, N. (2012). *Applicability of Solar Heat-Blocking Pavement Technology to Permafrost Regions*. Cold Regions Engineering 2012.
- James, W. (2002). *Green Roads: Research into Permeable Pavers*, 48-50.
- Jayawickrama, P., & Thomas, B. (1998). *Correction of Field Skid Measurements for Seasonal Variations in Texas*. Transportation Research Record, 1639(1), 147–154.
- Johnston, G. H. (1981). *Permafrost: engineering design and construction*. Toronto: John Wiley & Sons Inc.
- Jorgensen, A. & Ingeman-Nielsen, T. (2008). *The Impact of Light-colored Pavements on Active Layer Dynamics Revealed by Ground-Penetrating Radar Monitoring*. In Proceedings: 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 2008. Vol. 1, pp. 865-868.
- Krahn, J. (2004). *Thermal Modeling with TEMP/W*. Calgary, Alberta, Canada: GEO-SLOPE International, Ltd.
- LC 21-102. (2011). *Résistance au polissage des granulats : méthode par projection*. Transports Québec, Gouvernement du Québec.
- LC 25-010. (2012). *Mesure de la force de liaison avec un appareil de mesure d'adhésion des couches*. Transports Québec, Gouvernement du Québec.
- LC 26-400. (2012). *Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC*. Transports Québec, Gouvernement du Québec.
- LC 26-415. (2011). *Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage*. Transports Québec, Gouvernement du Québec.
- Levinson, R., & Akbari, H. (2001). *Effects of composition and exposure on the solar reflectance of Portland cement concrete*.
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). *Measuring solar reflectance—Part I: Defining a metric that accurately predicts solar heat gain*. Solar Energy, 84(9), 1717–1744.
- Levinson, R., Akbari, H., & Berdahl, P. (2010). *Measuring solar reflectance—Part II: Review of practical methods*. Solar Energy, 84(9), 1745–1759.
- Li, H., Harvey, J., & Kendall, A. (2013). *Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance*. Building and Environment, 59, 536–546.
- Linell, K. A. (1973). *Long-term effects of vegetative cover on permafrost stability in an area of discontinuous permafrost*. Paper presented at the 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, USSR.
- M-Lepage, J., Doré, G., Fortier, D., & Murchison, P. (2012). *Thermal Performance of the Permafrost Protection Techniques at Beaver Creek Experimental Road Site, Yukon, Canada*. Paper presented at the Tenth International Conference on Permafrost, Salekhard, Russie.
- McEvoy, A. J., Markvart, T., & Castañer, L. (2012). *Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications*. Waltham, MA: Academic Press.
- Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. (2000). *Surface Roughness Effects on Soil Albedo*. Soil Science Society of America Journal, 64(3), 1035.
- Mayor, S., Smith, W. L., Nguyen, L., Alberta, A., Minnis, P., Whitlock, C. H., & Schuster, G. L. (1996). *Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo*. IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- Mackay, J. R. (1970). Disturbances to the tundra and forest tundra environment of the western Arctic. *Canadian geotechnical journal*, 7(4), 420-432.

- Mecherikunnel, A. T., Richmond, J. C., & Center, G. S. F. (1980). *Spectral Distribution of Solar Radiation*: Goddard Space Flight Center.
- Miller, T. W. (1979). *The Surface Heat Balance in Simulations of Permafrost Behavior*. Journal of Energy Resources Technology, 101(4), 240.
- NASA. (2011). *Sun : Facts & Figures*. Repéré à <http://solarsystem.nasa.gov/>.
- Newport. (2014). *Introduction to Solar Radiation*. Repéré à <http://www.newport.com/>.
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chen, A., Taha, H., & Rosenfeld, A. H. (1997). *Paving materials for heat island mitigation*.
- Prescott, J.A. 1940. *Evaporation from a water surface in relation to solar radiation*. Trans. R. Soc. South Australia, 64:114-118.
- Qin, Y., Hiller, J. E., & Bao, T. (2013). *Modeling Cold Region Ground Temperatures with a Heat Flux Upper Boundary Model*. Journal of Cold Regions Engineering, 27(1), 29–43.
- Reckard, K., (1985). *White Paint for Highway Thaw Settlement Control*: State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Division of Planning, Research Section.
- Ressources naturelles Canada. (1993). *Canada-Pergélisol [carte]*. L'Atlas national du Canada — 5e édition. Ottawa, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources.
- Road Research. (1969). *Annual Report of the Road Research Laboratory*. Ministry of Transport. Road Research Laboratory. Londres.
- Robitaille, A., Allard, M. (1996). *Guide pratique d'identification des dépôts de surface aux Québec (notions élémentaires de géomorphologie)*, Les Publications du Québec, Québec, 109 p
- Rose, L. S., Akbari, H., & Taha, H. (2003). *Characterizing the fabric of the urban environment: A case study of Greater Houston, Texas*.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). *Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction*. Energy and Buildings, 28(1), 51–62.
- Schading, L. E., (1989) *An aerial view of Thule Air Base*. Repéré à <http://defenseimagery.mil/>.
- Sellers, W.D. (1965). *Physical climatology*. Chicago: University of Chicago Press, 272 p.
- Smith, S. L., & Burgess, M. M. (2004) Sensitivity of permafrost to climate warming in Canada.
- Solaimanian, M., & Kennedy, T.W. (1993). *Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation*. In Transportation Research Record 1417, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1–11.
- St-Jacques, M. & Brosseaud, Y. (2013). *Aménagements routiers en revêtements bitumineux colorés*. Via Bitume. Vol. 8 No. 1.
- Sutton, O.G. (1953). *Micrometeorology*. New York: McGraw-Hill.
- Thirumaleshwar, M. (2009). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Pearson Education.
- Tran, N., Powell, B., Marks, H., West, R., & Kvasnak, A. (2009). *Strategies for Design and Construction of High-Reflectance Asphalt Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2098(-1), 124–130.
- Twomey, S. A., Bohren, C. F., & Mergenthaler, J. L. (1986). *Reflectance and albedo differences between wet and dry surfaces*. Applied Optics, 25(3), 431.
- Voyer, É. (2009). *Expérimentation des méthodes de mitigation de la dégradation du pergélisol sur les infrastructures de transport du Nunavik, Nord du Québec*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec.

Walsh, R., Orban, S., Walker, R., Coates, J., Croteau, J.-M., Stone, D. & Strynadka, T. (2009). *Front Street Paving Project, Dawson City, Yukon. Adapting to Climate Change in a National Historic District*. Yukon Highways & Public Works. TAC 2009.

Williams, P. J., & Smith, M. W. (1991). *The Frozen Earth: Fundamentals of Geocryology*. Cambridge University Press.

Yukon Highways and Public Works (2011). *Yukon Traffic Count Summary*. Prepared by Transportation Planning and Programming.

Annexe A

Mise en place de la planche d'essai du SERUL

Une planche expérimentale a été réalisée au SERUL à la Forêt montmorency en Octobre 2013 afin d'évaluer l'efficacité des différents produits fournis par les compagnies Nippo et Colas en prévision de la réalisation d'une future section d'essai au Nunavik. Les données de températures superficielles enregistrées devaient aussi servir à calibrer le modèle développé dans le cadre du projet.

A.1 Description du site

Le SERUL est le site d'essai routier de l'Université Laval. Il se trouve sur la route d'accès à la forêt Montmorency près du chalet d'accueil. Le site est composé de plusieurs sections d'essai différentes ayant servi à plusieurs études de l'Université Laval concernant les routes. L'accès à la Forêt Montmorency se situe au kilomètre 103 de la route 175. Les coordonnées GPS du site sont de $47,32^{\circ}$ N et $-71,15^{\circ}$ O. La figure A.1 indique la position approximative du SERUL sur une photo aérienne des environs du site.

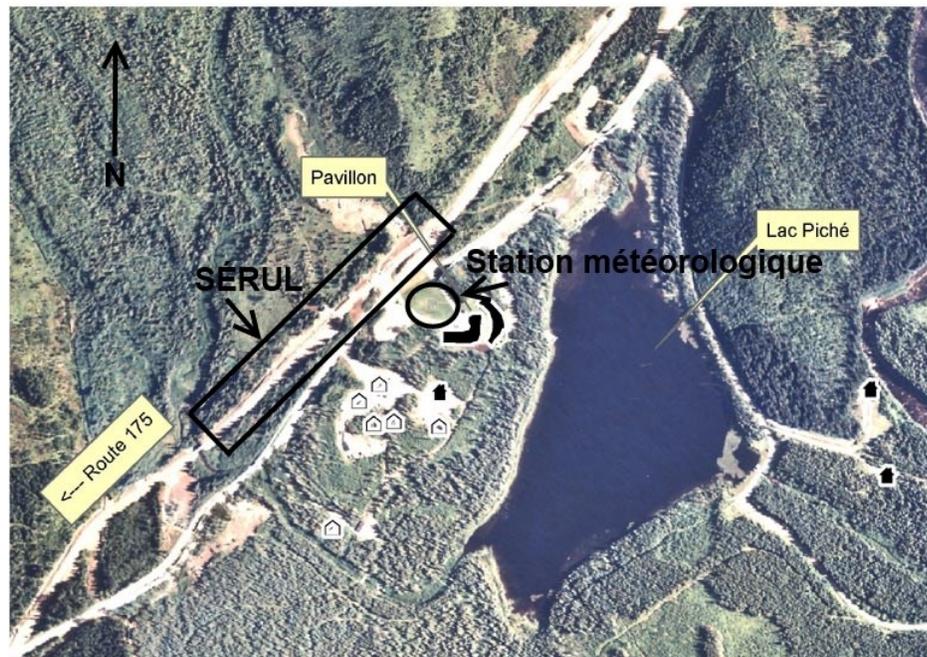


Figure A.1: Photo aérienne des environs du SERUL

Une station météorologique administrée par la faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval se trouve à proximité du SERUL. Les données climatiques sont disponibles en faisant la demande directement à la direction de la Forêt Montmorency.

A.1.1 Planification de la planche d'essai

La figure A.2 présente une schématisation de la planche d'essai du SERUL. Le tableau A.1 présente les caractéristiques des différentes sections de la planche d'essai.

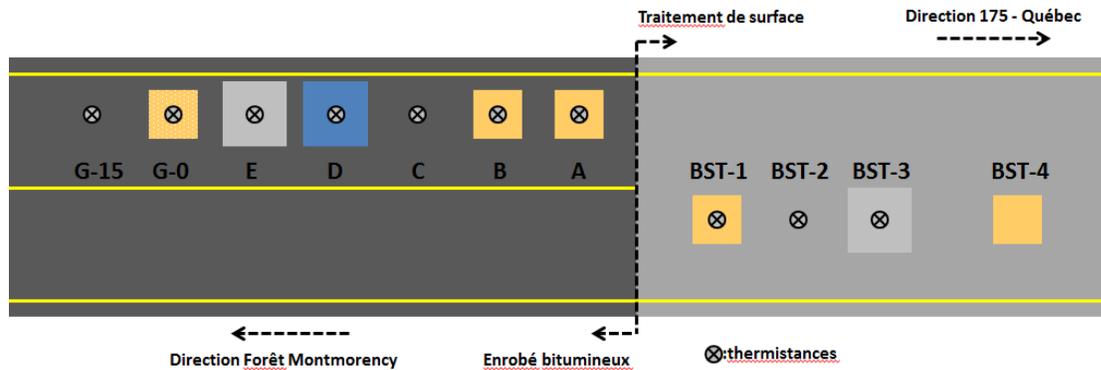


Figure A.2: Schématisation de la planche d'essai du SERUL

Tableau A.1: Description des sections de la planche d'essai du SERUL

Section	Produit	Dimension	Profondeur des thermistances	Description
A	Colas-Enduit-A	1,5 par 1,5 m	3, 18 et 33 cm	Enduit beige
B	Colas-Enduit-B	1,5 par 1,5 m	3, 18 et 33 cm	Enduit beige
C	Témoin (enrobé)	-	3, 18 et 33 cm	-
D	Nippo-Perfect Cool A	2 par 2 m	3, 18 et 33 cm	Enduit gris foncé
E	Nippo-Perfect Cool AP	2 par 2 m	3, 18 et 33 cm	Enduit gris pâle
G-0	Colas-Enduit-A et billes de verre	1,5 par 1,5 m	2 cm	Enduit beige avec billes de verre
G-15	Aucun	-	2 cm	Thermistance défectueuse
BST-3	Nippo-Perfect Cool AP	2 par 2 m	2 cm	Enduit gris pâle
BST-2	Témoin (traitement de surface)	-	2 cm	-
BST-1	Colas-Enduit-A	1,5 par 1,5 m	2 cm	Enduit beige
BST-4	Colas-Enduit-B	1,5 par 1,5 m	Aucune	Enduit beige

La planche d'essai se divise en deux sections. La première partie se trouve sur un enrobé bitumineux standard présentant une faible macro texture (figure A.3) et la seconde sur un traitement de surface présentant une macro texture plus importante (figure A.4). Ces sections

permettront d'évaluer l'effet de la macro texture sur la durabilité des enduits et sur leurs températures superficielles



Figure A.3: Macro texture de la section en enrobé bitumineux



Figure A.4: Macro texture de la section en traitement bitumineux de surface

A.1.3 Réalisation de la planche d'essai

La planche d'essai a été réalisée en trois étapes : la pose de l'instrumentation sur la chaussée du SERUL, la pose des produits fournis par Colas Canada et enfin la pose des produits fournis par Nippo Corporation.

Pose de l'instrumentation

L'instrumentation a été installée le 3 et le 4 octobre 2013 avec l'aide de Loriane Périer. Les thermistances utilisées pour mesurer la température des surfaces sont de type Onset provenant de chez Hobo (figure A.5). Des sondes composées de trois thermistances ont été confectionnées pour les sections A à E. Il s'agit de tube de polycarbonate rempli de colle époxy afin de s'assurer que les thermistances soient installées aux bonnes profondeurs (figure A.6 et A.7). Les sondes ont un diamètre extérieur de 1¼ pouce. Les autres sections ont été instrumentées de thermistances uniques.



Figure A.5: Thermistance Onset



Figure A.6: Tube vide de polycarbonate avec thermistances aux positions approximatives où elles seront installées



Figure A.7: Sondes remplies lors de la prise de l'époxy

Pour les sections A à E, des trous d'une profondeur d'environ 35 cm ont été forés à l'aide d'une perceuse à percussion munie du mèche à béton d'un diamètre de 1½ pouces tel qu'illustré à la figure A.8. Les sondes ont alors été insérées dans les trous. Le vide autour des sondes a été comblé avec du sable. L'extrémité supérieure des sondes a été recouverte de scellant à asphalte couramment utilisé afin de sceller les fissures des revêtements bitumineux. Pour les sections

témoins, du gravier de couleurs similaires à ceux composant le revêtement a été enfoncé dans le scellant afin de reproduire les propriétés de réflectivité de la surface initiale.



Figure A.8: Forage d'un trou pour accueillir une sonde

Une entaille a été effectuée à la surface du revêtement à l'aide d'une scie ronde munie d'une lame à diamant afin d'y insérer le câble des thermistances tel qu'illustré à la figure A.9. L'entaille a été nettoyée à l'aide d'un compresseur à l'air afin de retirer les débris provenant de la coupe. Pour les sections F, G-0, G-15 et BST-01 à BST-3, des thermistances uniques ont été installées directement dans l'entaille. Les thermistances et les fils de toutes les sections ont ensuite été recouverts de scellant à asphalte. Du sable a été saupoudré sur le scellant à asphalte afin d'éviter qu'il adhère aux roues des véhicules circulant sur la chaussée. Les fils ainsi que les répartiteurs ont ensuite protégé à l'aide de gaines plastiques résistantes aux infiltrations d'eau et enterrer dans l'épaulement du remblai. Afin de stabiliser les fils sur l'épaulement, un enrobé bitumineux à froid a été déposé sur les gaines plastiques à certains endroits. La figure A.10 illustre la partie de la planche d'essai se trouvant sur la section d'enrobé bitumineux. Cette photographie a été prise avant que les câbles ne soient enfouis dans l'épaulement. La figure A.11 présente une vue globale du site suite à l'enfouissement des câbles et avant la pose des enduits superficiels.

L'enregistreur de données utilisé est de marque HOBO U30 et il a été fixé sur un poteau installé en bordure de la route (figure A.12 et figure A.13).



Figure A.9: Sciage d'une entaille à la surface du revêtement



Figure A.10: Section d'enrobé bitumineux suite à la pose des sondes et des thermistances avant l'enfouissement des câbles



Figure A.11: Vue globale du site suite à la pose complète de l'instrumentation



Figure A.12: Enregistreur de données de marque HOBO U30

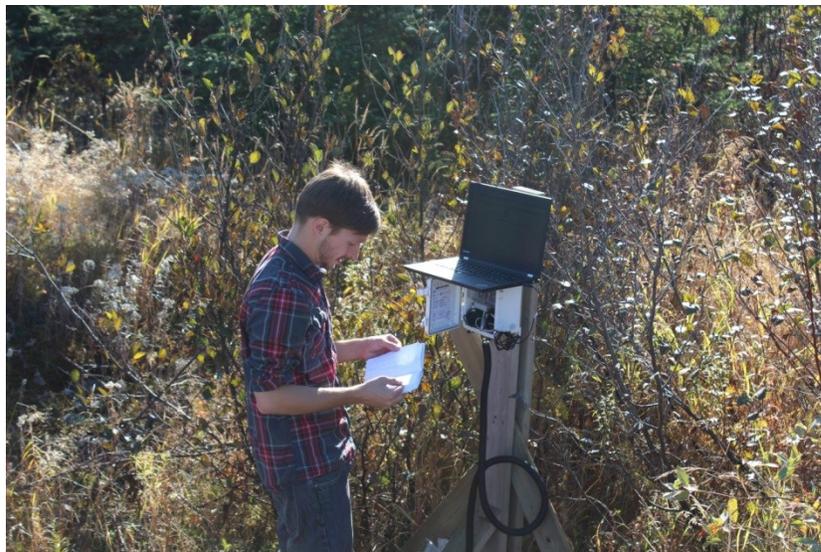


Figure A.13: Programmation de l'enregistreur de données

Pose des enduits de Colas Canada

La pose des enduits provenant de la compagnie Colas Canada a été effectuée par M. Frédéric Noël et Mme Anne-Marie Bégin, respectivement directeur et technicienne de laboratoire chez Gécan International, le 10 octobre 2013 en avant-midi.

La surface du revêtement a tout d'abord été nettoyée avec un balai. Une évaluation visuelle de la surface a été effectuée afin de s'assurer de l'absence de corps étranger pouvant nuire à l'adhésion du produit. Les sections ont été délimitées à l'aide de ruban masque. L'enduit a été appliqué à l'aide d'une raclette en caoutchouc (figure A.14). La section G-0 est recouverte de l'enduit Colas-A sur laquelle des billes de verres ont été saupoudrées abondamment avant la cure. Les figures A.15, A.16 et A.17 présentent la texture de surface de la section BST-3, A et G-0 respectivement.



Figure A.14: Pose de l'enduit Colas-A sur la section de traitement de surface (section BST-3)

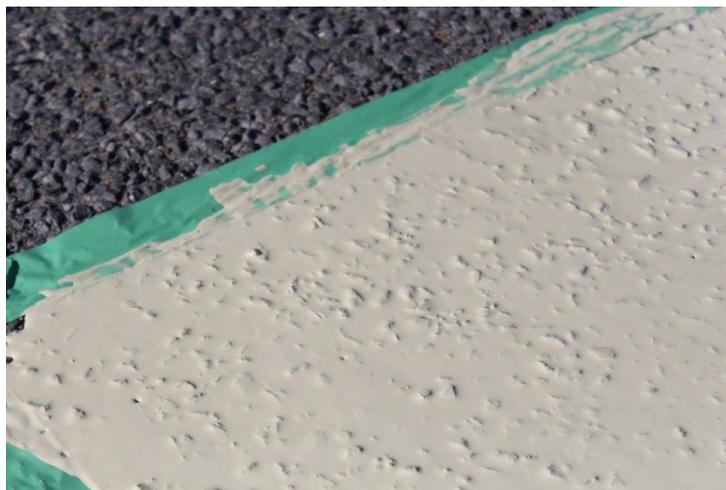


Figure A.15: Texture à la surface de la section BST-3 durant la cure



Figure A.16: Texture à la surface de la section A durant la cure



Figure A.17: Texture à la surface de la section G-0 durant la cure

Pose des enduits de Nippo

La pose des enduits provenant de la compagnie Nippo a été effectuée par M. Simon Dumais et M. Dejan Grabundzija sous la supervision de M. Masahiko Iwama, ingénieur chez Nippo Corporation, le 15 octobre 2013 en après-midi.

La surface du revêtement a tout d'abord été nettoyée avec un balai et à l'aide d'un compresseur à air (figure A.18). Une évaluation visuelle de la surface a été effectuée afin de s'assurer de l'absence de corps étranger pouvant nuire à l'adhésion du produit. Les sections ont ensuite été délimitées à l'aide de ruban masque.

Les enduits Perfect Cool A et Perfect Cool AP nécessitent l'ajout de sable afin d'améliorer l'adhérence des pneus à la chaussée. Un sable de silice ayant une granulométrie de 0 – 400 µm a

été utilisé dans une proportion en masse d'une partie de sable pour une partie de peinture. Les figures A.19 à A.21 illustrent la préparation de l'enduit avant la pose.

L'enduit est alors ensuite appliqué en deux couches selon un taux de pose de $0,8 \text{ kg/m}^2$ pour la première couche et de $0,3 \text{ kg/m}^2$ pour la deuxième couche. Les figures A.22 à A.24 illustrent la mise en place de l'enduit sur le revêtement. Les figures A.25 et A.26 présentent la texture de surface des différentes sections d'enduit Perfect Cool de Nippo.

Les figures A.27 et A.28 présentent la macro texture des sections des enduits de Nippo.



Figure A.18: Délimitation et nettoyage de la surface de traitement bitumineux de surface



Figure A.19: Mesure de la peinture à l'aide d'une balance



Figure A.20: Mesure du sable à l'aide d'une balance



Figure A.21: Mélange de la peinture et du sable à l'aide d'un mélangeur à peinture



Figure A.22: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool A sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (section D)



Figure A.23: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool AP sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (section E)



Figure A.24: Section E (Perfect Cool AP) à gauche et section D (Perfect Cool A) à droite suite à la pose de la première couche

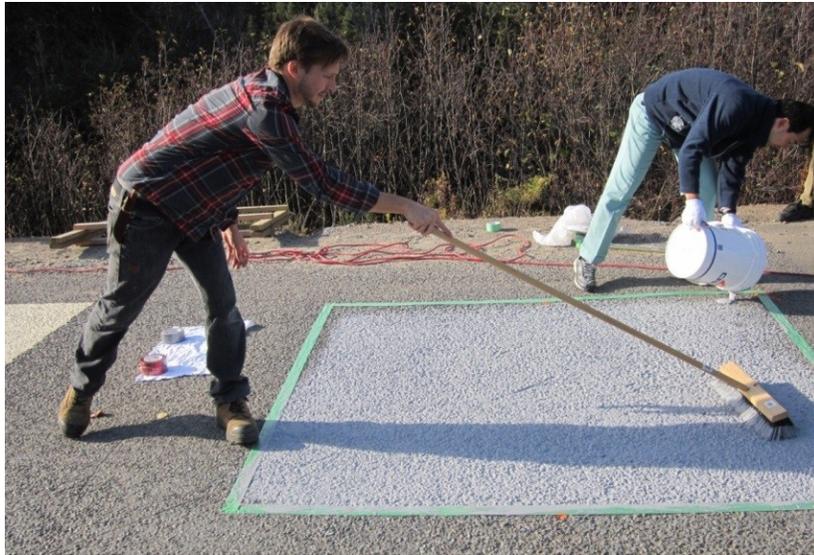


Figure A.25: Pose de la première couche de l'enduit Perfect Cool AP sur traitement de surface à l'aide d'un balai (Section BST-1)



Figure A.26: Pose de la deuxième couche de l'enduit Perfect Cool A sur enrobé bitumineux à l'aide d'un balai (Section D)



Figure A.27: Texture de la section de Perfect Cool AP (en haut – section E) et de Perfect Cool A (en bas – section D) posé sur enrobé bitumineux



Figure A.28: Texture de la section de Perfect Cool A posé sur traitement bitumineux de surface (section BST-1)

Finalisation de la planche d'essai

Des visites additionnelles le 26 septembre, le 12, le 14, le 19 et le 26 octobre ont été effectuées afin de programmer l'enregistrement des données. La figure A.29 présente le site du SERUL avec l'ensemble des enduits appliqués et l'instrumentation installée.



Figure A.29: Planche d'essai du SERUL complétée

A.1.4 Observations pour la planche d'essai de Beaver Creek

En raison de problème lors de l'installation des câbles reliant les thermistances à l'enregistreur de données, aucune donnée de température n'est disponible pour la planche expérimentale du SERUL. De plus, la planche d'essai a été recouverte de neige moins d'une semaine après la fin de l'installation en raison de précipitations de neige hâtives au site. Il n'a donc pas été possible de tester les propriétés techniques des surfaces installées. L'enregistreur de données a été retiré lors de la dernière visite sur le site. Le reste de l'instrumentation se trouve toujours sur le site.

Les enduits fournis par la compagnie Colas Canada ont présenté un problème majeur de cure. En effet, après 2 jours ces sections n'étaient toujours pas complètement sèches. De plus, suite à des précipitations, il semble que ces produits se soient ré émulsifié. L'état de chacun de ces produits n'a pas pu être évalué avant les premières chutes de neige. La section BST-2 a dû être recouverte de sable afin d'éviter de tacher les véhicules circulant sur la chaussée. La section B composée du même produit que la section BST-4 a aussi présenté une fluidification importante. Les sections A, G-0 et BST-3 sont les plus susceptibles d'être toujours présentes au printemps 2014.

Les produits de la compagnie Nippo Corporation ont quant à eux curé adéquatement. Les sections D, E et BST-1 sont donc susceptibles d'être toujours présente au printemps 2014.

L'usure due aux premiers passages de la grappe à neige a été évaluée visuellement lors de la dernière visite effectuée sur le site. Les produits se trouvant sur les sections présentaient déjà une dégradation importante. En effet, l'enduit se trouvant sur les granulats proéminents avait déjà été complètement usé. Ainsi, après quelques passages de la grappe seulement, seul l'enduit se trouvant entre les granulats proéminents était toujours sur la surface.

Annexe B

Guide d'utilisation de la feuille de calcul des températures superficielles des revêtements routiers

La feuille de calcul permet d'obtenir la température superficielle d'un revêtement routier pour chacun des mois de l'année. Les indices de gel et de dégel sont aussi automatiquement calculés. La feuille de calcul permet de comparer les températures de deux surfaces (surface A et surface B) ayant des valeurs d'albédo différentes. Les données du tableau principal sont exprimées en valeurs moyennes mensuelles. Un graphique généré automatiquement par la feuille de calcul affiche les températures superficielles des deux surfaces ainsi que la température de l'air en fonction du temps pour une période d'une année.

L'utilisateur doit saisir les données dans les cases blanches, alors que les cases grises affichent les données calculées. L'albédo de chacune des surfaces doit être saisi dans les cases prévues à cet effet. L'albédo est le rapport entre la radiation solaire réfléchi par une surface et la radiation solaire incidente. L'albédo est une valeur décimale entre 0 et 1. Par exemple, une surface ayant un albédo de 0,05 réfléchit 5% des rayons incidents et absorbe 95% de ces rayons. À titre indicatif, un enrobé bitumineux neuf a un albédo d'environ 0,05 et la neige a un albédo d'environ 0,80. Les valeurs d'albédo sont maintenues constantes durant toute l'année, il n'y a donc pas d'ajustement de l'albédo pour prendre en compte la couvert de glace et de neige à la surface de la route.

Par la suite, l'utilisateur doit saisir les données climatiques en valeurs mensuelles moyennes. Ainsi, la radiation solaire, la température de l'air et la vitesse du vent doivent être fournies. La radiation solaire incidente s'exprime en watt par mètre carré (W/m^2). La radiation solaire est un paramètre primordial afin de calculer la température d'une surface exposée au rayonnement du soleil. La radiation solaire peut-être mesurée ou calculée en fonction de la latitude et de l'enneigement tel qu'expliqué ci-bas. La vitesse du vent s'exprime en kilomètre par heure [km/h]. La vitesse du vent influence les échanges de chaleur par convection forcée entre la surface du revêtement et l'air. Enfin, la température de l'air s'exprime en degrés Celsius ($^{\circ}C$).

Le calcul des températures superficielles est effectué à l'aide du modèle simplifié décrit dans le guide d'utilisateur. Ce modèle a été développé et validé par Simon Dumais dans le cadre d'un projet de maîtrise réalisé au sein du programme ARQULUK. Les températures superficielles sont calculées en faisant le bilan d'énergie à la surface du revêtement. Les détails de ce bilan d'énergie et des équations constitutives du modèle sont disponibles dans le mémoire de maîtrise de Simon Dumais.

Calcul de la radiation solaire

La radiation solaire extraterrestre mensuelle (G_0) peut être obtenue à l'aide de la figure A.30 pour chacun des mois de l'année en fonction de la latitude. Pour obtenir l'albédo à la surface de la Terre (G), il suffit d'appliquer un paramètre d'ensoleillement (n/N) selon l'équation A.1. La paramètre d'ensoleillement correspond au nombre réel d'heures d'ensoleillement (n) par rapport au nombre maximal d'heures d'ensoleillement (N).

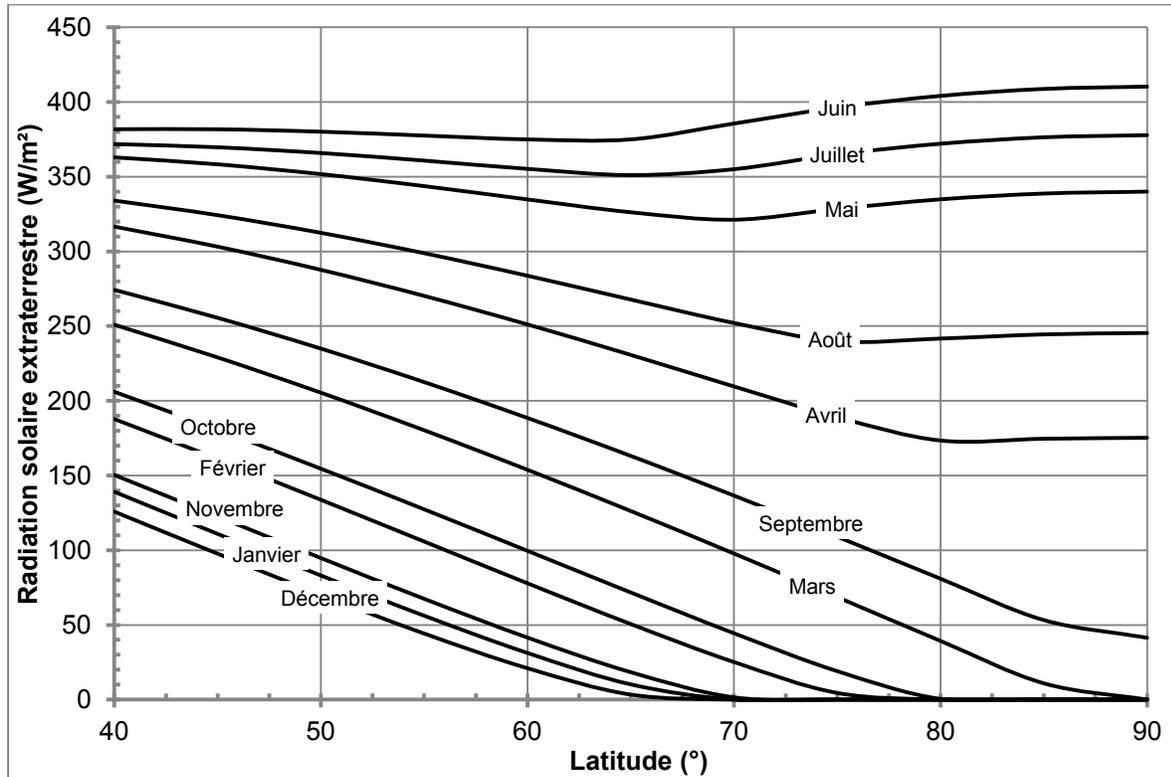


Figure A.30: Radiation solaire extraterrestre moyenne mensuelle pour différentes latitudes

Équation A.1: Radiation solaire à la surface de la Terre en fonction du facteur d'ennuagement

$$G = G_0 \left(0,25 + 0,54 \frac{n}{N} \right)$$

Annexe C

Évaluation de la réflectivité des revêtements routiers de la ville de Dawson City au Yukon

Une visite a été effectuée à Dawson City au Yukon en mai 2013 afin de mesurer l'albédo des différents types de revêtements routiers de la ville. L'objectif principal était de mesurer l'albédo de l'enrobé à liant coloré de la Front Street. La figure A.31 illustre l'endroit de différentes mesures effectuées. Trois types de revêtement routiers ont pu être analysés; le traitement bitumineux de surface (emplacement 3), l'enrobé coloré (emplacement 3 et 4) et la surface en gravier (emplacement 1 et 2). L'albédo des trottoirs en bois caractéristiques de la ville de Dawson a aussi été mesuré à titre indicatif à l'emplacement 5. Le tableau A.2 présente tous les résultats des essais d'albédo de Dawson City. Les figures correspondantes aux emplacements de mesure sont aussi indiquées dans ce tableau.



Figure A.31: Carte de l'emplacement des mesures d'albédo à Dawson City

Tableau A.2: Résumé des relevés d'albédo de Dawson City

Emplacement	Type de revêtement	Albédo	Description	No. de figure
1	Gravier	0,21	Coin Fifth Av. et Princess St.	A.32
2	Gravier	0,17	Sixth Av. face au no. 876	A.33
3a	BST	0,17	Entrée de la ville voie vers Dawson City	A.34
3b	BST	0,24	Entrée de la ville voie vers Whitehorse	A.34
3c	Enrobé coloré	0,21	Entrée de la ville voie vers Dawson City	A.34
4d	Enrobé coloré	0,25	Entrée de la ville voie vers Whitehorse	A.34
4a	Enrobé coloré	0,23	Front St. entre la Fifth et la Seventh Av. voie vers Dawson City	A.35
4b	Enrobé coloré	0,25	Front St. entre la Fifth et la Seventh Av. voie vers Whitehorse	A.35
5	Trottoir	0,41	Coin Fifth Av. et Mission St.	A.36



Figure A.32: Emplacement 1, surface de gravier au coin de la Fifth Avenue et de la Princess Street



Figure A.33: Emplacement 2, surface de gravier sur la Sixth Avenue



Figure A.34: Emplacement 3, surface de BST à gauche et d'enrobé coloré à droite, voie vers Dawson City en avant-plan et vers Whitehorse en arrière-plan



Figure A.35: Emplacement 4, surface d'enrobé coloré, voie vers Whitehorse en avant-plan et vers Dawson City en avant-plan



Figure A.36: Emplacement 5, trottoir de bois sur la Fifth Avenue

Couleur des granulats et couleur des rues de gravier

Les granulats utilisés pour recouvrir les routes de gravier et pour fabriquer le BST dans la région de Dawson City sont très pâles. Incidemment, le BST a une valeur d'albédo plus élevée que le BST de Beaver Creek. Il est donc surprenant d'obtenir une valeur relativement faible d'albédo pour les routes en gravier. Ces valeurs peuvent s'expliquer par le fait que les granulats ne demeurent pas réellement à la surface des routes de gravier. Ce sont plutôt les fines qui sont compactées en surface qui donne réellement la couleur au revêtement. La figure C.32 démontre clairement ce phénomène de compactage au niveau des sentiers de roues.

Effet des pneus et de la poussière

Il y a un effet notable du passage des pneus sur la chaussée sur la couleur de l'enrobé coloré. Cet effet est visible à l'entrée de la ville où se trouve le début de la surface d'enrobé coloré (figure C.37). La voie de gauche qui mène au centre-ville de Dawson City est en effet plus foncée vis-à-vis les sentiers de roues.



Figure A.37: Début de la Front Street, voie vers Dawson City à gauche et vers Whitehorse à droite

La figure A.37 permet aussi d'observer l'effet de la poussière sur le revêtement d'enrobé coloré. Une partie des véhicules circulant sur la voie de droite vers Whitehorse provient des rues de gravier de la ville de Dawson City. Ils transportent donc de la poussière qui se dépose à la surface du revêtement ce qui a pour effet d'augmenter l'albédo. Ce phénomène est particulièrement visible aux intersections comme à la figure A.38.



Figure A.38: Intersection de la Front Street et de la Fifth Avenue à Dawson City

En raison du noircissement provenant des pneus des véhicules et de la poussière provenant des rues de gravier de la ville, l'albédo de l'enrobé coloré et du BST est plus élevé pour les voies qui se dirigent vers Whitehorse et plus bas pour les voies qui se dirigent vers Dawson City.