

Guide d'utilisateur

Pour l'utilitaire de calcul des températures superficielles des surfaces revêtues v0.5b (23-01-2014)

Ce guide d'utilisateur est un complément d'information pour l'utilitaire de calcul des températures superficielles des surfaces revêtues v0.5b. Des bulles explicatives se trouvent aussi à quelques endroits dans l'utilitaire et permettent de guider l'utilisateur à travers ses principales fonctions.

L'utilitaire fonctionne sous le logiciel Microsoft Excel. Seulement la version 2010 de Microsoft Excel permet pour l'instant de profiter de l'ensemble des fonctions de l'utilitaire.

Quelques vérifications doivent être effectuées afin de s'assurer que l'utilitaire puisse fonctionner sur la version du logiciel Microsoft Excel utilisée.

Les macros doivent être activées. Le lien suivant explique comment activer les macros.

Pour Excel 2010 : <http://office.microsoft.com/fr-ca/excel-help/activer-ou-desactiver-les-macros-dans-les-fichiers-office-HA010354316.aspx>

Le complément « Solver » doit être chargé. Le lien suivant explique comment charger le complément « Solver ».

Excel 2010 : <http://office.microsoft.com/fr-ca/excel-help/charger-le-complement-solver-HP010021570.aspx>

L'utilitaire est divisé en plusieurs onglets permettant à l'utilisateur de naviguer facilement à travers ses différentes fonctions. Les onglets pour lesquels des informations sont offertes sont les onglets « Données », « Résultats », « Résultats_mensuels », « Abaque_IR », « Abaque_IR_annuelle » et « Abaque_températures ».

Table des matières

Liste des variables utilisées	3
Onglet « Données »	4
Onglet « Résultats »	8
Onglet « Résultats_mensuels »	9
Onglet « Abaque_IR ».....	10
Onglet « Abaque_IR_annuel ».....	10
Onglet « Abaque_température »	10
Bibliographie.....	10
Crédit	11
Annexe A – Modèle de prédictions des températures superficielles des surfaces routières revêtues.....	12
Bibliographie Annexe A	19

Liste des variables utilisées

X_d ou X_d : Profondeur du front de dégel

X_g ou X_g : Profondeur du front de gel

k_u : Conductivité thermique du sol non gelé

k_f : Conductivité thermique du sol gelé

IG_a: Indice de gel de l'air

IG_s: Indice de gel de la surface

ID_a: Indice de dégel de l'air

ID_s: Indice de dégel de la surface

IR_d : Indice de radiation de dégel

IR_g : Indice de radiation de gel

L_s ou L_s : Chaleur latente du sol gelé

L_w ou L_w : Chaleur latente de l'eau

w : Teneur en eau du sol

ρ_d : Masse volumique sèche du sol

ρ_w : Masse volumique de l'eau

n_d : Indice n de dégel

n_g : Indice n de gel

R_{abs} : Radiation solaire absorbée

R_{inc} : Radiation solaire incidente

Onglet « Données »

L'onglet « Données » permet de saisir les données nécessaires au calcul des températures superficielles. Il est divisé en trois sections soit « Données climatiques », « Paramètres de surface » et « Paramètres du sol ».

Données climatiques

La section « données climatiques » permet de saisir les données climatiques relatives au site à l'étude. Le climat est défini par la radiation solaire, la température de l'air et la vitesse du vent. L'utilisateur utilise des données mensuelles moyennes pour une année complète.

N.B. Même si l'utilisateur permet le calcul des températures superficielles pour une période allant jusqu'à cinq (5) ans, celui-ci utilise les mêmes données climatiques pour chacune des années. Si l'utilisateur désire effectuer une analyse prenant en compte les changements climatiques, il est possible d'effectuer plusieurs analyses en variant les données climatiques à chaque fois.

Radiation solaire

La radiation solaire au site peut être définie de quatre manières différentes : « Valeurs par défaut », « Radiation max et min », « Calcul avec la latitude » et « Valeurs mesurées ». Un menu déroulant permet à l'utilisateur de sélectionner l'option désirée.

Les « valeurs par défaut » sont représentatives d'un site nordique se trouvant à une latitude d'environ 60° ayant un faible couvert nuageux. Cette option n'offre pas une très grande précision, mais peut être utilisée pour obtenir un ordre de grandeur des températures superficielles.

L'option « Radiations max et min » permet de saisir des valeurs de radiations solaires mensuelles moyennes maximales et minimales. Une interpolation sinusoïdale distribue la radiation pour l'ensemble de l'année.

L'option « Calcul avec la latitude » permet à l'utilisateur de calculer les valeurs de radiation solaire mensuelle moyenne en saisissant la latitude du site à l'étude. N.B. Cette option surestime considérablement la radiation solaire, car le couvert nuageux n'est pas pris en compte. Les températures de surface calculées seront alors significativement plus élevées que la réalité.

L'option « Valeurs mesurées » permet à l'utilisateur de saisir les données de radiation solaire mensuelles. Celles-ci peuvent être obtenues directement sur le site à l'aide d'un pyranomètre. Il s'agit de l'option offrant la plus grande précision.

Température de l'air

La température de l'air au site peut être définie de trois manières différentes : « Valeurs par défaut », « Températures max et min » et « Valeurs mesurées ». Un menu déroulant permet à l'utilisateur de sélectionner l'option désirée.

Les « valeurs par défaut » sont représentatives d'un site nordique. Cette option n'offre pas une très grande précision, mais peut être utilisée pour obtenir un ordre de grandeur des températures superficielles.

L'option « Températures max et min » permet de saisir des valeurs de températures de l'air mensuelles moyennes maximales et minimales. Une interpolation sinusoïdale distribue les valeurs de températures pour l'ensemble de l'année.

L'option « Valeurs mesurées » permet à l'utilisateur de saisir les données de températures de l'air. Il s'agit de l'option offrant la plus grande précision.

Vitesse du vent

La vitesse du vent au site peut être définie de deux manières différentes : « Valeurs par défaut » et « Valeurs mesurées ». Un menu déroulant permet à l'utilisateur de sélectionner l'option désirée.

Les « valeurs par défaut » sont représentatives d'un site nordique. Cette option n'offre pas une très grande précision, mais peut être utilisée pour obtenir un ordre de grandeur des températures superficielles.

L'option « Valeurs mesurées » permet à l'utilisateur de saisir les données de vitesse du vent. Il s'agit de l'option offrant la plus grande précision.

Les valeurs utilisées pour l'analyse sont résumées dans un tableau se trouvant dans la section « Données climatiques ». Les valeurs dans ce tableau ne peuvent être modifiées par l'utilisateur.

Paramètres de surface

La section « Paramètres de surface » permet de saisir les données relatives aux surfaces à analyser notamment le nombre de surfaces, l'albédo des surfaces, l'évolution de l'albédo dans le temps ainsi que la durée de l'analyse.

Nombre de surfaces

Il s'agit du nombre de surfaces différentes que l'utilisateur désire analyser. Il est donc possible d'analyser entre une et trois surfaces ayant des albédos différents. Un menu déroulant permet à l'utilisateur de choisir le nombre de surfaces à analyser.

Évolution de l'albédo dans le temps

Il est possible de prendre en compte une aggradation ou une dégradation de l'albédo en fonction du temps. En sélectionnant « Oui » dans le menu déroulant, l'utilisateur aura la possibilité d'entrer des valeurs d'albédo différentes pour chacune des années de l'analyse.

Durée de l'analyse [année(s)]

Il s'agit de la durée en année de l'analyse que désire l'utilisateur. L'utilitaire peut procéder à une analyse d'une durée de un à cinq ans. Un menu déroulant permet à l'utilisateur de choisir la durée de l'analyse.

N.B. Si l'utilisateur choisit de ne pas prendre en compte l'évolution de l'albédo dans le temps, les résultats pour chacune des années seront les mêmes.

Albédo

L'albédo est le ratio entre la radiation solaire réfléchie par une surface et la radiation solaire incidente. L'albédo peut être mesuré sur le terrain à l'aide d'un pyranomètre (ASTM-E1918) ou en laboratoire avec une sphère d'intégration (ASTM-E903).

Paramètres de sol

L'utilitaire permet de calculer la pénétration du front de gel X_d et de dégel X_g à l'intérieur du remblai routier à l'aide de la formule de Stefan.

$$X_d = \sqrt{\frac{2k_u I D_s}{L_s}}$$

$$X_g = \sqrt{\frac{2k_f I G_s}{L_s}}$$

Avec chaleur latente de fusion du sol : $L_s = w \frac{\rho_d}{\rho_w} L_w$

chaleur latente du la glace : $L_w = 334 \text{ MJ/m}^3$

Conductivité thermique du sol gelé et non gelé : k_f et k_u

Calculer la profondeur de gel et de dégel

L'utilisateur peut activer le calcul de la profondeur du front de gel et de dégel en sélectionnant « Oui » dans la liste déroulante, il peut désactiver cette fonction en sélectionnant « Non ».

Conductivité thermique du sol gelé (k_f) et conductivité thermique du sol non gelé (k_u)

Des valeurs de conductivité thermique du sol en $\text{W/m}^\circ\text{C}$ doivent être saisies afin d'effectuer le calcul de la pénétration des fronts de gel et de dégel.

Teneur en eau du sol

La teneur en eau en pour cent du sol en place constituant le remblai doit être saisie afin d'effectuer le calcul de la pénétration des fronts de gel et de dégel.

Masse volumique sèche du sol

La masse volumique sèche en kg/m^3 du sol en place constituant le remblai doit être saisie afin d'effectuer le calcul de la pénétration des fronts de gel et de dégel.

Lancement de l'utilitaire

Suite à la saisie de l'ensemble des données nécessaires au calcul des températures superficielles, l'utilisateur doit appuyer sur le bouton « Cliquer ici pour démarrer l'analyse » afin de procéder au calcul. Attention, cette opération peut prendre jusqu'à 5 minutes selon la puissance de l'ordinateur utilisé.

Onglet « Résultats »

Indice de gel et de dégel

Les indices de gel et de dégel sont définis comme l'aire sous la courbe des températures quotidiennes moyennes. La figure 1 illustre l'indice de dégel et l'indice de gel. Les indices de gel et de dégel peuvent être définis pour la température de l'air et pour la température de la surface.

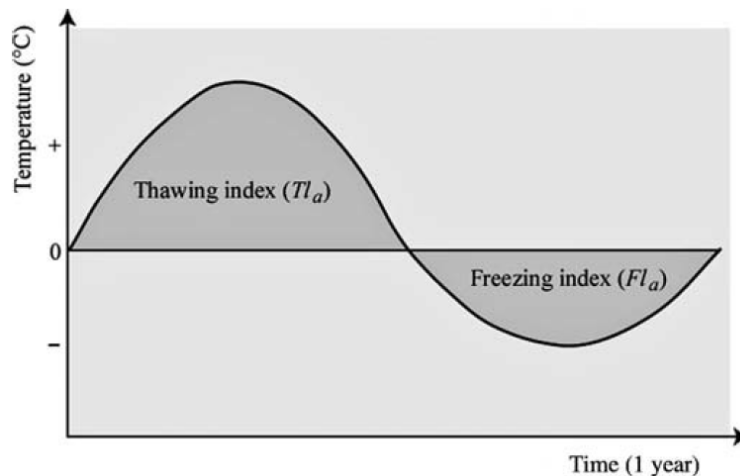


Figure 1: Représentation schématique de l'indice de gel et de l'indice de dégel (Doré et Zubeck, 2009)

L'utilitaire utilise des températures moyennes mensuelles. Les indices de gel et de dégel sont alors définis comme étant la somme des températures moyennes mensuelles multipliée par le nombre de jours par mois. Par exemple, pour un mois de mars ayant une température moyenne de -5°C , l'indice de dégel serait nul et l'indice de gel serait de $-5^{\circ}\text{C} \times 31 \text{ jours}$, donc de $-155^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour}$. N.B. En utilisant les températures moyennes mensuelles, l'utilitaire sous-estime légèrement les indices de gel et de dégel annuel par rapport à des indices calculés à partir des températures quotidiennes moyennes.

L'intérêt du concepteur est de connaître les températures de la surface à partir des températures de l'air. Deux approches permettent de relier ces températures, l'indice de radiation et l'indice n. Ces deux approches sont interchangeables.

Indice de radiation

Dysli (1991) a proposé une approche reliant les indices de gel et de dégel de l'air et de la surface en se basant sur la radiation solaire comme étant le principal facteur influençant la balance d'énergie à la surface d'un revêtement routier. Dysli définit l'indice de radiation (IR) comme $IG_s = IG_a + IR$.

À partir de cette approche, l'utilitaire utilise deux indices de radiation, un pour le gel (IR_g) et l'autre pour le dégel (IR_d) et sont définis comme $IG_s = IG_a + IR_g$ et $ID_s = ID_a + IR_d$ respectivement.

Indice n

Les indices n de gel (n_g) et de dégel (n_d) sont définis comme $n_g = IG_s / IG_a$ et $n_d = ID_s / ID_a$.

Températures mensuelles

Les températures moyennes annuelles de l'air et des surfaces ainsi que les températures minimales et maximales mensuelles moyennes pour l'air et les surfaces sont disponibles dans l'onglet « Résultats ». Les températures mensuelles plus détaillées sont disponibles dans l'onglet « Résultats_mensuels ».

N.B. Il ne s'agit des températures maximales et minimales quotidiennes. Ces températures ne peuvent donc être utilisés à des fins de conception des enrobés bitumineux.

Profondeur de gel et de dégel

Les profondeurs de pénétration du front de gel et de dégel en mètre sont affichées pour chacune des surfaces.

Le rapport entre la profondeur de gel et de dégel X_g/X_d permet de constater si la balance d'énergie à la surface du revêtement contribue à la dégradation ($X_g/X_d < 1$) ou à l'aggradation ($X_g/X_d > 1$) du pergélisol.

Onglet « Résultats_mensuels »

L'onglet « Résultats_mensuels » affiche les températures mensuelles moyennes pour tous les mois de l'analyse pour chacune des surfaces. Les données climatiques ainsi que l'albédo des surfaces sont affichés et permettent à l'utilisateur de produire des graphiques ou d'utiliser les données pour la production de rapport.

L'utilitaire produit des abaques pouvant être utilisés pour obtenir rapidement des valeurs d'indices de radiation et des températures de surfaces. Ces abaques utilisent une vitesse du vent fixe à 5 m/s. Si la vitesse du vent au site est largement différente, il est préférable de ne pas utiliser ces abaques. Ces abaques utilisent la radiation solaire moyenne mensuelle absorbée (R_{abs}). Il s'agit de la radiation solaire moyenne mensuelle incidente (R_{inc}) multipliée par la réflectivité solaire de la surface. $R_{abs} = (1 - \text{albédo}) * R_{inc}$

N.B. Les certaines variables utilisées dans le modèle possèdent des valeurs différentes entre les conditions d'été et d'hiver. Les abaques qui seront décrits présentent les résultats pour des températures de 0°C en fonction des paramètres d'été et d'hiver. Il importe au concepteur de choisir la situation représentant le mieux la surface pour le mois analysé. Les détails concernant les paramètres d'été et d'hiver se trouvent à l'annexe A.

Onglet « Abaque_IR »

Cet abaque permet d'obtenir les indices de radiation de gel et de dégel mensuelle d'une surface à partir de la radiation solaire absorbée pour différents indices de gel et de dégel de l'air.

Onglet « Abaque_IR_annuel »

Cet abaque permet d'obtenir les indices de radiation de gel et de dégel annuelle d'une surface à partir de la radiation solaire absorbée pour différentes températures moyennes de l'air. Pour obtenir l'indice de gel, la radiation solaire totale absorbée est la somme des radiations mensuelles moyennes absorbées pour la durée de la période ou les températures mensuelles moyennes sont inférieures à 0°C. Pour obtenir l'indice de dégel, la radiation solaire totale absorbée est la somme des radiations mensuelles moyennes absorbées pour la durée de la période ou les températures mensuelles moyennes sont supérieures à 0°C.

Onglet « Abaque_température »

Cet abaque permet d'obtenir la température superficielle mensuelle moyenne d'une surface à partir de la radiation solaire absorbée pour différentes températures moyennes de l'air.

Bibliographie

Dysli, M. (1991). Le gel et son action sur les sols et les fondations. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes.

Doré, G. and H. K. Zubeck (2009). Cold regions pavement engineering. Reston, VA New York ; Toronto, ASCE Press ; McGraw-Hill.

Crédit

Utilitaire développé par **Simon Dumais**, étudiant à la maîtrise en génie civil à l'Université Laval (simon.dumais.2@ulaval.ca), sous la direction de **Monsieur Guy Doré**, professeur au département de génie civil de l'Université Laval, dans la cadre du programme **ARQULUK** sur la préservation des infrastructures de transport dans le Nord du Canada.



En partenariat avec



En collaboration avec



Annexe A – Modèle de prédictions des températures superficielles des surfaces routières revêtues

Introduction

Plusieurs modèles de prédiction des températures de surface pour les revêtements routiers existent (Solaimanian et Kennedy 1993, Hermansson 2001, Hermansson 2004, Gui et al. 2008, Hall et al. 2012, Qin et al. 2013). Ceux-ci nécessitent souvent de faire appel à une résolution par éléments finis. De plus, ces modèles sont souvent développés afin d'obtenir les températures maximales atteintes à l'intérieur revêtement pour guider le choix de la classe de bitume utilisé pour l'enrobé bitumineux. Ils utilisent donc des données climatiques horaires ou quotidiennes. Leur utilisation est donc complexe et laborieuse. Le modèle proposé dans le cadre du projet est une simplification du modèle proposé par Hermansson (2001, 2004). Ce modèle ne se limite pas à au calcul des températures estivales et permet d'obtenir les températures du revêtement en conditions hivernales. Le modèle simplifié proposé ici utilise des données climatiques mensuelles dans sa résolution. Ainsi, la quantité de données à traiter et à obtenir est réduite de manière significative ce qui facilite grandement l'utilisation du modèle.

Dans ce chapitre, les équations constitutives du modèle seront d'abord présentées. Par la suite, la calibration du modèle à l'aide des données de température obtenues au site expérimental de Beaver Creek sera présentée.

Équations constitutives

Tel que mentionné précédemment la plupart des équations et des coefficients utilisés proviennent du modèle proposé par Hermansson (2001, 2004) se basant sur le modèle de Solaimanian et Kennedy (1993). La figure A1 présente les phénomènes d'échange de chaleur se produisant à la surface d'un revêtement routier pris en compte dans le modèle.

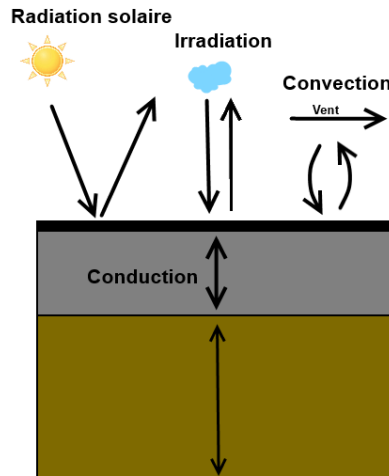


Figure A1: Schématisation des échanges de chaleur à la surface d'un revêtement routier

Le flux de chaleur dû à l'évaporation de l'eau provenant des eaux de pluie est négligeable et il est donc ignoré dans ce modèle (Gui et al. 2008). De par leur nature, les chaussées revêtues sont conçues pour évacuer les eaux de pluie rapidement par ruissellement pour assurer la sécurité des usagers. De plus, afin de prendre en compte cet apport de chaleur, il faudrait fournir au modèle des données de précipitations. Afin de rendre le modèle aussi simple que possible, la quantité de données climatiques à fournir doit être minimale.

La balance d'énergie à la surface du revêtement peut donc être exprimée par l'équation A1. 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 à l'intérieur du remblai.

Équation A1: Balance d'énergie à la surface d'un revêtement routier

$$q_{total} = q_{radiation_solaire} + q_{radiation_infrarouge} + q_{convection} + q_{conduction}$$

Radiation solaire

L'apport de chaleur principal à la surface du revêtement provient de l'absorption de la radiation solaire. Ce flux est décrit par l'équation A2.

Équation A2: Flux de chaleur dû à la radiation solaire

$$\begin{aligned} q_{radiation_solaire} &= q_{radiation_solaire_incidente} - q_{radiation_réfléchie} \\ &= (1 - \text{albédo})q_{radiation_solaire_incidente} \end{aligned}$$

Tel que mentionné précédemment, le modèle ne prend pas en compte les précipitations pluvieuses, ainsi aucun facteur de correction afin de considérer la variation de l'albédo de la surface mouillée n'est appliqué. En fait, l'albédo de surface varie lorsque la surface est mouillée ce qui devrait être pris en compte afin d'ajouter de la précision au modèle. Par contre, comme la

radiation solaire incidente est habituellement négligeable lorsque la chaussée est mouillée, l'impact de cette variation sur les températures superficielles est minime.

La variation de l'albédo durant l'hiver lorsque la chaussée est partiellement couverte par de la glace et de la neige est quant à elle prise en compte dans le modèle. Hermansson (2004) propose d'utiliser un albédo de 0,40 pour les surfaces revêtues d'enrobé bitumineux. Par contre, l'albédo d'été utilisé est de 0,14. Comme l'objectif de ce projet est d'évaluer la performance thermique des surfaces en fonction de leur albédo, il est logique que l'albédo d'hiver varie en fonction de l'albédo de la surface l'été. Suite à des observations sur le terrain et aux valeurs d'albédo proposées par Hermansson, environ 40% de la surface est couverte de glace et de neige durant l'hiver. L'albédo de la neige et de la glace est d'environ 0,80 (Marvart et Castaner 2003). Ainsi, l'équation A3 décrit l'albédo de la surface durant l'hiver en fonction de l'albédo d'été.

Comme la radiation solaire incidente est faible durant l'hiver pour les sites utilisés pour la calibration du modèle, l'effet de l'albédo l'hiver est négligeable et il est difficile d'évaluer si la corrélation utilisée est adéquate. De plus, le couvert de neige sur la route est fonction du nombre de véhicules utilisant la route et des opérations de déneigement. Afin d'améliorer la précision de la valeur d'albédo d'hiver utilisé dans le modèle, il serait nécessairement de développer une corrélation considérant tous les facteurs influençant celle-ci.

Équation A3: Relation entre l'albédo d'été et l'albédo d'hiver

$$albedo_{hiver} = 0,6 \cdot albedo_{été} + 0,4 \cdot albedo_{neige} = 0,6 \cdot albedo_{été} + 0,4 \cdot 0,8$$

Radiation infrarouge

L'échange de chaleur par radiation infrarouge est décrit par l'équation A4. Les paramètres d'émissivité de la surface (ϵ_s) et du ciel (ϵ_{ciel}) sont définis par défaut dans le modèle comme 0,85 et 0,8 respectivement. La valeur de 0,85 pour l'émissivité de la surface est suggérée par Hermansson (2004). Il serait possible de faire varier cette valeur si le type de revêtement possède une émissivité significativement différente. Par contre, il peut être coûteux et complexe de déterminer l'émissivité exacte d'un matériau de revêtement. L'émissivité du ciel est de 0,70 lorsque le ciel est complètement dégagé (Hermansson 2004). Pour prendre en compte le couvert nuageux, l'émissivité du ciel utilisé par défaut par le modèle a été fixée à 0,80 suite à une étude paramétrique.

Équation A4: Flux de chaleur dû à la radiation infrarouge

$$q_{radiation_infrarouge} = q_{réfléchi} - q_{absorbé} = \sigma(\epsilon_s T_s^4 - \epsilon_{ciel} T_{air}^4)$$

Avec

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

T_s = Température de surface (Kelvin)

T_{air} = Température de l'air (Kelvin)

Convection

L'échange de chaleur par convection entre l'air et la surface est décrit par l'équation A5. Le coefficient de convection (h_c) utilisé dans ce modèle décrit par l'équation A6 (Solaimain et Kennedy 1993) fait intervenir la vitesse du vent (U) en m/s comme paramètre principal. Il est possible de faire varier les coefficients « a » et « d » contrôlant la convection libre et la convection forcée afin de considérer les variations de conditions de surface influençant la convection. Les paramètres proposés par Hermansson (2004) sont utilisés dans ce modèle et se retrouvent au tableau A1. Ainsi, la convection forcée durant l'hiver est ignorée et c'est la convection libre qui gouverne les échanges de chaleur.

Équation A5: Flux de chaleur dû à la convection

$$q_{convection} = h_c(T_s - T_{air})$$

Équation A6: Coefficient de convection

$$h_c = 698,24a[0,00144T_m^{0,3}U^d + 0,00097Abs(T_s - T_{air})^{0,3}]$$

Avec

T_m : Température moyenne entre la surface et l'air en Kelvin

Tableau A1: Coefficients utilisés dans le calcul du coefficient de convection

	a	d
Été	1,1	0,5
Hiver	3,0	0,0

Tel que mentionné précédemment, les paramètres d'albédo et les coefficients de convection varient en fonction des conditions climatiques. Pour ce modèle simplifié, seulement deux états climatiques seront considérés, l'été et l'hiver. L'état climatique des paramètres est défini par les données climatiques mensuelles moyennes fournies au modèle. Hermansson (2004) propose de considérer la radiation solaire et la température de l'air afin de tenir compte des redoux hivernaux ou des conditions climatiques variables au gel et au dégel. Afin de simplifier le modèle, les conditions d'hiver seront appliquées si la température mensuelle moyenne de l'air du mois courant et du mois suivant est sous 0°C. C'est-à-dire que les conditions d'hiver sont en vigueur dès le premier mois où la température de l'air est sous 0°C jusqu'à l'avant-dernier mois de gel. Le dernier mois de gel est considéré comme une période de dégel et ce sont les conditions d'été qui s'appliquent. Ces critères ont été choisis suite à une étude paramétrique. Par contre, ce critère néglige le fait qu'il est possible de trouver des conditions hivernales et estivales à l'intérieur du même mois et nuit à la précision du modèle. Les températures obtenues lors des mois transitoires durant le gel et le dégel sont particulièrement affectées.

Conduction

Les échanges de chaleur dus à la conduction en sein des remblais sont complexes à quantifier ce qui nécessite souvent l'utilisation d'analyse par éléments finis. Afin de simplifier le modèle, il a été nécessaire de modéliser le flux dû à la conduction différemment de l'approche d'Hermansson. Berg observe sur des données provenant de sections d'essai similaires à celles de Beaver Creek que le flux de chaleur transmis au sol est environ 10% du flux de chaleur absorbé par la radiation solaire. Pour une surface possédant un albédo de 0,15, il s'agit alors de 8,5 % de la radiation incidente qui est transmise au sol. L'utilisation de la radiation incidente comme paramètre pour évaluer la conduction contribue grandement à rendre 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 n'est plus fonction de la radiation solaire. La méthode proposée ici est d'estimer le flux de conduction à l'aide d'une fonction sinusoïdale ayant une amplitude de 8,5 % de la radiation incidente mensuelle moyenne maximale et une période d'un an présentant un maximum de conduction vers le sol au mois de mai tel que présenté à l'équation A7.

Équation A7: Flux de chaleur dû à la conduction

$$q_{conduction} = 0,085R_{incidente_max}\sin\left(\frac{(mois - 2)\pi}{6}\right)$$

Afin de valider cette méthode les flux de chaleur vers le sol ont été calculés à l'aide des données de température mesurées par des thermistances se trouvant au centre ligne de la section d'essai de traitement bitumineux de surface à granulats clairs à Beaver Creek pour les années 2010 et 2011. Le tableau 2 et la figure A2 présentent les flux mesurés avec les thermistances et ceux calculés à l'aide de l'équation 6.

Tableau A2: Flux de conduction vers le sol

	Flux mesuré (2011)	Flux mesuré (2011)	Interpolation sinusoïdale
	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
Janvier	-9,5	-10,4	-10,4
Février	-3,9	-6,9	0,0
Mars	0,5	-2,0	10,4
Avril	8,0	9,0	18,0
Mai	12,2	12,2	20,7
Juin	9,7	8,6	18,0
Juillet	8,5	7,1	10,4
Août	5,3	4,4	0,0
Septembre	-1,4	0,2	-10,4
Octobre	-7,5	-6,2	-18,0
Novembre	-9,3	-15,1	-20,7
Décembre	-14,6	-7,3	-18,0

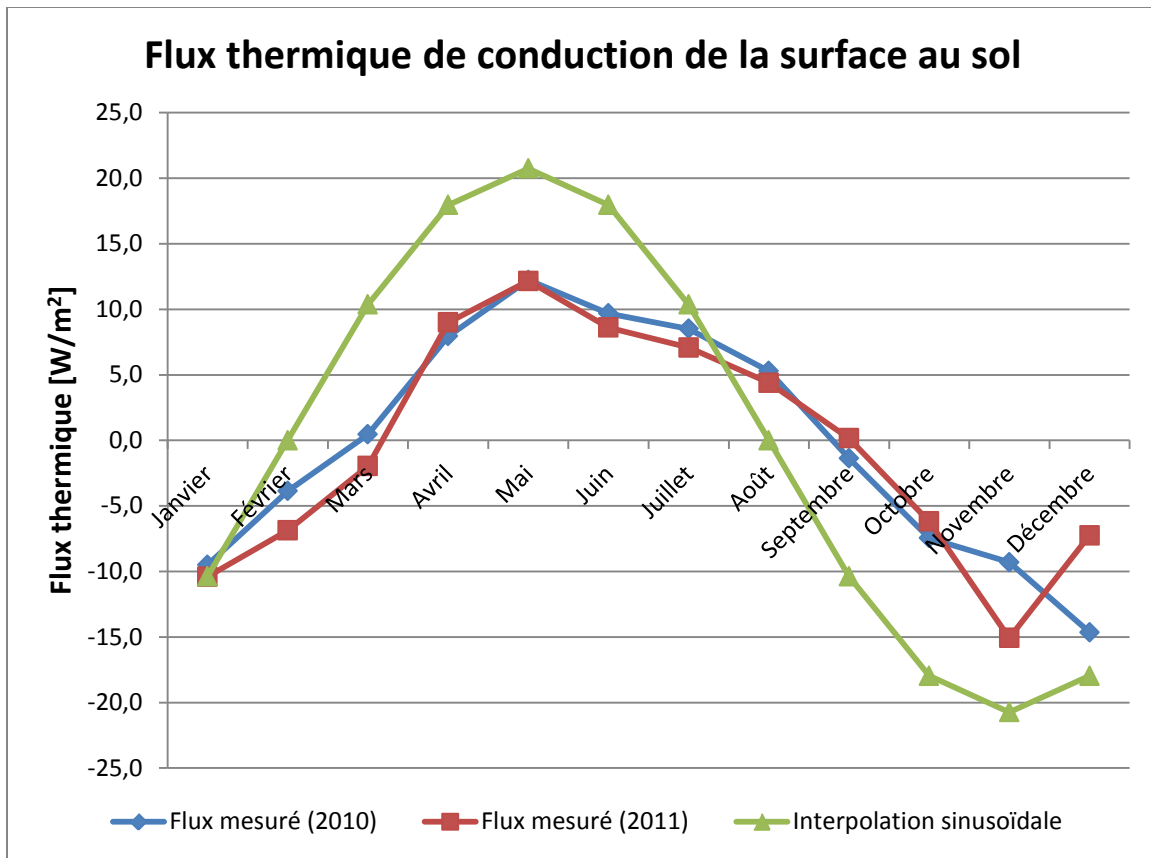


Figure A2: Flux de conduction vers le sol

L'amplitude du flux thermique calculé est supérieure à l'amplitude du flux thermique mesuré par les thermistances. Comme les thermistances se trouvent à une profondeur de 0,3 et 1,7 m, une partie de l'énergie transmise au sol est absorbée et l'amplitude du flux thermique diminue donc en profondeur.

Il est à noter que le flux thermique transmis au sol est fonction de la température du revêtement et donc de la radiation absorbée et non de la radiation incidente comme l'équation 6 le suggère. De plus, le flux thermique de conduction est fonction des propriétés thermiques du matériau de remblais. Afin d'améliorer la précision du modèle, il serait nécessaire que l'interpolation sinusoïdale prenne en compte l'albédo de la surface et les propriétés de transfert thermiques du sol. Comme les petites variations du flux de conduction ($\Delta q < 10 \text{ W/m}^2$) n'ont pas une influence importante sur les températures de surfaces ($\Delta T < 0,6^\circ\text{C}$ pour $\Delta q = 10 \text{ W/m}^2$), l'équation 6 permet de modéliser convenablement le flux de conduction.

Validation du modèle

Le modèle a été validé en utilisant les données disponibles pour la section d'essai de Beaver Creek décrite précédemment. La figure A3 présente les données mensuelles moyennes de température superficielle calculées à l'aide du modèle en ordonnée et celles mesurées sur le site en abscisse. La valeur de R^2 se trouvant très près de l'unité indique une grande précision du

modèle. L'écart maximal entre les données calculées et celles mesurées est de 1,21°C pour les températures d'été et de 3,73°C pour les températures d'hiver. L'écart moyen est de 0,97°C et l'écart type est de 0,95 °C. Comme il s'agit d'un modèle simplifié, la précision obtenue est très satisfaisante en considérant que le modèle non simplifié d'Hermansson 2004 possède un écart moyen de 1,4°C et un écart type de 0,32°C avec un écart maximal de 2,3°C pour les températures d'hiver et de 1,8°C pour les températures d'été. Hermansson utilise par contre des données horaires pour le calcul des températures superficielles et non des données mensuelles.

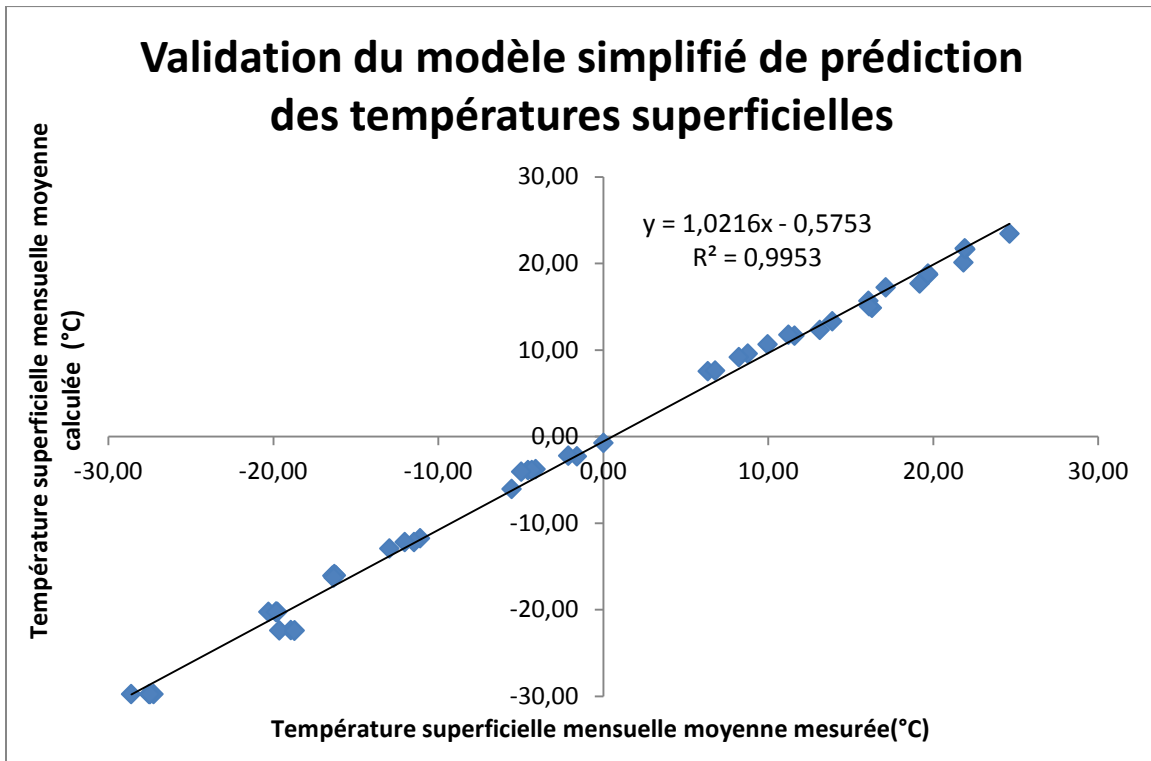


Figure A3: Validation du modèle

Bibliographie Annexe A

Berg, R. L., et al. (1985). Effect of Color and Texture on the Surface Temperature of Asphalt Concrete Pavements, State of Alaska Department of Transportation and Public Facilities.

Gui, J., et al. (2007). "Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures." Journal of Materials in Civil Engineering **19**(8): 683-690.

Hall, M., et al. (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.

Hermansson, Å. (2001), "Mathematical Model for Calculation of Pavement Temperatures: Comparisons of Calculated and Measured Temperatures," Transportation Research Record **1764**: 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.

McEvoy, A. J., et al. (2012). Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Academic Press.

Qin, Y., et al. (2013). "Modeling Cold Region Ground Temperatures with a Heat Flux Upper Boundary Model." Journal of Cold Regions Engineering **27**(1): 29-43.

Solaimanian, M., et Kennedy, T.W. (1993), "Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation." Transportation Research Record **1417**: 1-11.