

PROBLÉMATIQUE

Au Québec, le suivi du gel et du dégel dans les chaussées au moyen des tubes de gel a débuté en 1968. De 1973 à 1977, l'ensemble du réseau était divisé en deux zones de restriction des charges et on y comptait environ 75 sites de mesure instrumentés. À l'heure actuelle, on compte environ 90 tubes de gel répartis dans trois zones climatiques. Au début du printemps, le dégel observé dans les tubes signifie que la teneur en eau augmente dans les fondations de chaussée. La profondeur de dégel est un indicateur de la perte de la capacité de support et sert à déterminer les dates de début et de fin de la période de restriction des charges sur le réseau routier sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec (MTQ) afin d'en limiter la dégradation (bulletin *Info DLC*, vol. 1, n° 6, février 1996). Toutefois, la collecte des données dans les tubes est laborieuse, exige la mobilisation de ressources importantes et permet au MTQ de constater plutôt que de prédire la profondeur de dégel.

TRAVAUX RÉALISÉS

Afin d'améliorer la gestion du suivi de la période de gel et de dégel ainsi que de mettre au point un modèle permettant de prédire la profondeur du front de gel-dégel au moyen des seules données de température de l'air, un projet de recherche utilisant les nouvelles technologies de relevé de température de l'air et de la chaussée a été entrepris à l'automne 1999 en partenariat avec l'Université Laval. Trois stations de mesure de la température ont été aménagées : une à Montmagny (autoroute 20), une à Scott-Jonction (autoroute 73) et une à Champlain (autoroute 40). Un tube en PVC de 50 mm de diamètre a été placé dans un forage de 4 m de profondeur au centre d'une voie de la chaussée. Un câble comprenant onze thermistances, espacées à des profondeurs différentes, a été introduit à l'intérieur du tube rempli d'huile de silicone. Les thermistances permettent de mesurer les températures à différentes profondeurs dans la chaussée. Les stations sont aussi équipées d'un capteur extérieur de température atmosphérique. Elles comprennent un système d'acquisition de données relié par modem au Service des chaussées du MTQ. La récupération des données de température, relevées toutes les heures, se fait donc par communication téléphonique directe, selon une fréquence qui est fonction de l'importance du gel ou du dégel. Dans chacun des sites, un gèlètre (ou tube de gel) a été installé pour mesurer la profondeur du front de gel-dégel et la comparer avec celle déterminée par le modèle étudié.

MÉTHODOLOGIE

Des analyses statistiques de régression ont été réalisées pour mettre en relation les températures moyennes des couches avec celles de l'air de manière à pouvoir, connaissant la température de l'air, dresser un bilan thermique de la chaussée. Les températures mesurées par les thermistances ont permis de déterminer une stratigraphie thermique du sol, qui a été découpé en six couches où la température est uniforme (tableau 1). Ce découpage est indépendant de l'emplacement des stations. La figure 1 montre une distribution typique des températures relevées par les thermistances. Le gel progresse dans le sol de manière continue lorsque l'indice de gel cumulatif atteint $-1000\text{ }^{\circ}\text{C} \times \text{h}$, soit l'équivalent de huit jours à une température moyenne de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les sollicitations thermiques appliquées à la surface de la chaussée ont été divisées en huit classes établies selon la valeur journalière de l'indice de gel de l'air I_{gel} , exprimé en $^{\circ}\text{C} \times \text{h}$ (tableau 2). À l'intérieur de chaque classe, les valeurs de température de l'air sont moins dispersées. La relation obtenue par régression statistique entre la température de chaque couche et celle de l'air, pour chaque classe de sollicitation, montre que cette division en classes est justifiée pour obtenir une meilleure précision.

Le modèle Finlandais SSR [1] a été utilisé pour simuler la progression du gel et du dégel. Ce modèle établit un équilibre du bilan thermique au front de gel-dégel au moyen des températures calculées précédemment. L'ensemble des caractéristiques de la structure de chaussée (épaisseur des couches homogènes, densité, teneur en eau, propriétés thermiques, etc.) sont aussi considérées dans l'équation mathématique SSR. Dans le cas du gel, cet équilibre est obtenu entre les gradients thermiques provenant des sollicitations de température en surface, de la chaleur géothermique des couches en profondeur, de la chaleur latente du sol et du potentiel de ségrégation. La figure 2 montre la bonne concordance entre la courbe de pénétration du gel obtenue par l'équation et les points de mesure relevés durant l'hiver 1999-2000 à la station de Montmagny. Dans le cas du dégel, le modèle a été modifié de manière à ne tenir compte que du gradient thermique en réchauffement à travers les couches non gelées et de celui dû à la chaleur latente des couches gelées. La figure 3 présente les résultats de dégel à Montmagny au printemps 2000.

La méthodologie consiste donc à combiner le bilan thermique de chaque couche (modèle empirique) et la progression du front de gel-dégel (modèle analytique). Le premier est déterminé par une

régression statistique, et le deuxième par une relation mathématique. Le modèle ainsi mis au point permet de prédire l'évolution du gel et du dégel dans la chaussée.

COUVERTURE THERMIQUE DU RÉSEAU

La compilation des données horaires de température de 1993 à 1998 provenant des stations météorologiques d'Environnement Canada ainsi que des données de profondeur de gel maximale atteintes en 2000-2001 dans les gémètres [2], permet de regrouper ces derniers en 24 points de suivi du gel et du dégel où peuvent être installées des stations de mesure de la température de l'air. Celles-ci font l'objet d'un plan d'implantation proposé [3] pour assurer la couverture thermique du réseau routier en remplacement des 90 tubes de gel existants. Les températures mesurées par ces stations pourront aussi servir au réseau municipal adjacent.

CONCLUSION

Le modèle empirique-analytique mis au point démontre que la profondeur du front de gel-dégel dans une chaussée peut être prédite à partir du bilan thermique journalier dans la chaussée. Ce bilan résulte de relevés réalisés à des stations de mesure de la température de l'air. Ces nouveaux équipements devraient permettre au Ministère d'automatiser le suivi du gel et du dégel, d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les coûts.

Ce modèle de prédiction devrait mener à la révision des critères utilisés pour déterminer les périodes de restriction des charges au dégel.

RÉFÉRENCES

- [1] Saarelainen, S., 1992, *Modelling Frost Heave and Frost Penetration in Soils at Some Observation Sites in Finland - The SSR Model*, Technical Research Center of Finland (VTT), Government Printing Center, Helsinki, 120 pages.
- [2] Daigle, J.M., Beaulieu, M., avril 2001, *Étude de la propagation du gel dans la chaussée*, rapport STT16568, Université Laval.
- [3] Prophète, F., 2001, *Étude d'opportunité : implantation de stations de mesure de température pour le suivi du gel-dégel*, dossier 317(21)01, MTQ, Service des chaussées.

RESPONSABLE : Fritz Prophète, ing.
Service des chaussées

DIRECTEUR : 
Michel Labrie, ing.

Couche(cm)	Thermistance(cm)
De 10 à 17	10, 11, 15
De 17 à 50	20, 25, 35
De 50 à 125	65, 95
De 125 à 180	155
De 180 à 225	205
sup. à 255	305

Tableau 1 : Stratigraphie thermique

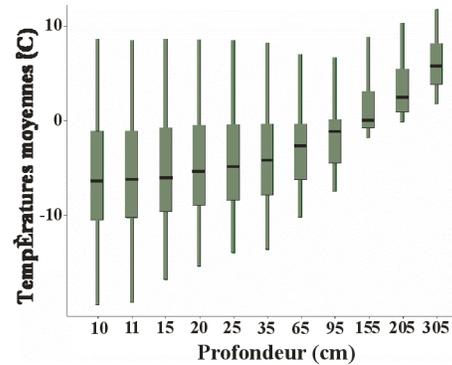


Figure 1 : Distribution des températures

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8
I_{gel} (°C x heure)	0 à -100	-100 à -200	-200 à -300	-300 à -400	-400 à -500	-500 à -600	-600 à -700	inf. à -700

Tableau 2 : Classes de sollicitation thermique journalière

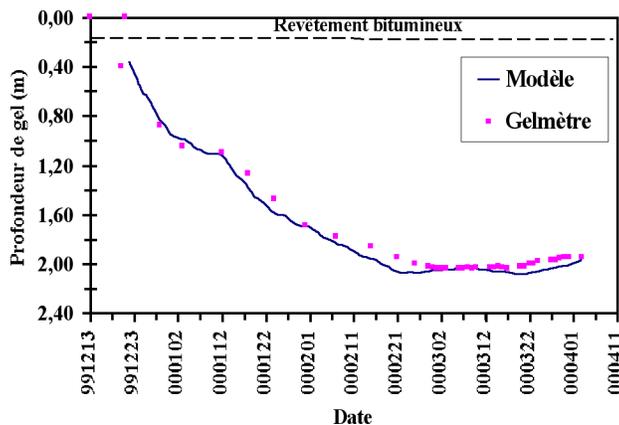


Figure 2 : Profondeur de gel à Montmagny en 1999-2000

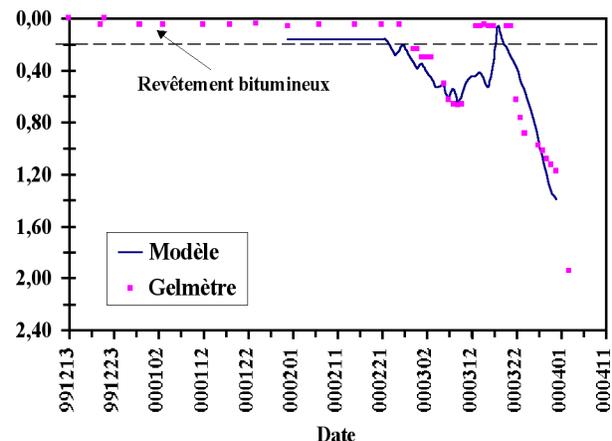


Figure 3 : Profondeur de dégel à Montmagny en 2000