

# INEGALITE DE L'ENNEIGEMENT ET RELATION AVEC L'ASSURANCE DE LA QUALITE DANS LE CADRE DES OPERATIONS D'HIVER

Max S. Perchanok

Direction de la construction et des opérations, Division des opérations

Ministère des Transports de l'Ontario

301, rue St. Paul, St. Catharines (Ontario)

Canada L2R 7R4

TÉL. : 905-704-2990 / TÉLÉC. : 905-704-2848

## 1. Résumé

Il est difficile de maintenir l'uniformité du niveau de service dans le cadre des opérations d'hiver sur un vaste réseau routier où les conditions d'enneigement sont suivies qualitativement à des intervalles espacés. La mise au point de la méthode du glissement variable en matière de mesure de l'adhérence permet de mesurer ou de classer automatiquement les conditions d'enneigement avec une fiabilité connue.

Quatre méthodes de mesure de l'adhérence permettant d'améliorer l'assurance de la qualité ont été examinées : l'adhérence d'ensemble sur un tronçon de route, la classification ponctuelle de l'état de la chaussée, la mesure ponctuelle des surfaces couvertes de neige et la fréquence et la longueur des parcelles enneigées. La classification automatique des types de surface est fiable dans des conditions limitées, tandis que la mesure de la fraction d'enneigement est très fiable. L'adhérence d'ensemble et la longueur des parcelles enneigées sont étroitement reliées entre elles et au temps écoulé depuis l'épandage de sel routier. Les critères d'espacement de l'échantillonnage varient selon l'inégalité de l'enneigement, le nombre maximum d'échantillons étant requis au milieu de la plage des valeurs d'adhérence.

## 2. Introduction et contexte

En hiver, la description de la qualité de la chaussée est importante à maints égards dans le cadre de l'entretien du réseau routier. L'assurance de la qualité, c'est-à-dire le suivi des opérations sous contrat pour assurer le respect des niveaux de service définis, en fait partie.

Les niveaux de service relatif à l'enlèvement de la neige sur les routes de l'Ontario, qui varient selon le volume de circulation et la situation géographique, précisent le délai maximum imparti pour dégager complètement la chaussée après la fin d'une tempête de neige ou exigent, sur les routes à plus faible circulation où il n'est pas nécessaire de dégager complètement la chaussée, qu'une surface de traction (MTO, 1998) soit maintenue exempte de neige libre, d'ornières et de nids de poule. Le déneigement et l'épandage de sel ou de sable se poursuivent tant qu'on n'atteint pas les conditions spécifiées.

On observe la chaussée plusieurs fois par jour et on en signale l'état en utilisant un lexique standard de descripteurs qualitatifs pour planifier les opérations quotidiennes d'entretien hivernal. Les administrateurs de contrat les vérifient à intervalles irréguliers pour s'assurer que les entrepreneurs se conforment aux normes. L'entrepreneur qui n'y satisfait pas est passible de sanctions. Les vérifications au hasard offrent la souplesse souhaitable pour traiter avec chaque entrepreneur, mais peuvent favoriser l'application non uniforme des normes dans la province. Un système de mesures objectives et répétables, comme celles que donnent les dispositifs de mesure de l'adhérence, peut favoriser l'application uniforme des normes.

On a observé depuis longtemps une correspondance générale entre les caractéristiques d'enneigement et la mesure traditionnelle de l'adhérence par glissement fixe ou roue bloquée. Cependant, la répétabilité des mesures entre les échantillons et les dispositifs de mesure peut être insuffisante pour obtenir la confiance statistique nécessaire aux fins de l'assurance de la qualité.

Il est possible d'améliorer l'information obtenue dans le cadre des mesures d'adhérence grâce à des dispositifs à glissement variable qui mesurent l'adhérence sur une plage de coefficients ou de vitesses de glissement à chaque endroit échantillonné. Les expériences sur chaussée dégagée démontrent que les mesures du glissement variable définissent la relation entre l'adhérence et la vitesse de glissement

– propre à un pneu, à une pression de contact et à un type de surface donnés – et peuvent servir à mesurer la texture de la surface (PIARC, 1992).

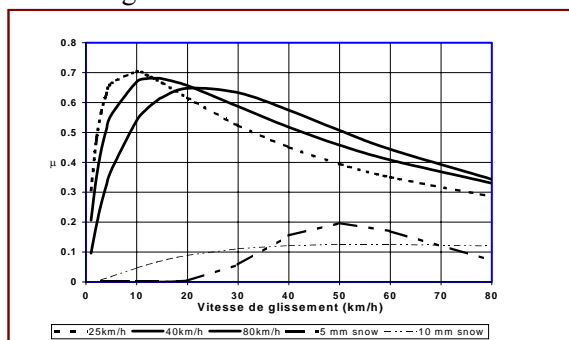
La courbe peut être représentée par trois paramètres (Rado, 1994) : la résistance maximale ( $F_p$ ), la vitesse de glissement à laquelle la résistance maximale se produit ( $V_{crit}$ ) et la résistance de la roue bloquée ( $F_{60}$ ) (figure 1).  $F_p$ , qui est la valeur d'adhérence maximale de la relation glissement-adhérence, correspond au seuil de déclenchement des systèmes de freinage ABS sur chaussée humide.  $V_{crit}$  se produit habituellement à un coefficient de glissement de l'ordre de 10 à 20 % sur l'asphalte humide.  $F_{60}$  qui désigne l'adhérence à une vitesse de glissement de 60 km/h, correspond approximativement à la vitesse de glissement à laquelle se produit l'adhérence de roues bloquées sur l'asphalte humide dans des conditions normales d'essai.

Les données accrues recueillies par la méthode de la mesure du glissement variable permettent d'estimer l'adhérence maximale et de sélectionner un point de comparaison sur la courbe adhérence-glissement qui maximise la sensibilité aux conditions d'essai (figure 1) comparativement aux dispositifs de mesure à coefficient de glissement fixe.

Andresen et Rado (1995), Fleege et Wambold (1998) et Perchanok (1998) ont présenté des études de cas selon lesquelles les formes de la courbe peuvent varier selon les différents types d'enneigement à la surface d'une route (figure 1). Si les résultats des études de cas peuvent s'appliquer à toutes les conditions d'enneigement, on peut alors utiliser les mesures adhérence-glissement variable pour améliorer le suivi de l'assurance de la qualité des opérations hivernales.

Le présent document a pour objet d'étudier la correspondance entre l'adhérence superficielle et les descripteurs d'enneigement durant les tempêtes et de démontrer les capacités et les limites de son utilisation pour suivre le résultat final des activités d'entretien.

**Figure 1.** Adhérence, vitesse de glissement et vitesse de remorquage, sur chaussée dégagée et sur chaussée enneigée



### 3. Méthode

Cette étude a examiné quatre méthodes de mesure de l'adhérence aux fins d'assurance de la qualité :

#### L'adhérence d'ensemble

La moyenne et la variance de  $F_p$  sont décrites pour un tronçon de route de longueur connue. On peut utiliser cette méthode lorsque les normes précisent un seuil d'adhérence moyenne. Si le seuil est atteint comme valeur moyenne, l'opération est alors réussie et les normes sont respectées. Elle constitue une amélioration par rapport à la description visuelle, qualitative, parce qu'elle :

- i) fournit une mesure objective et répétable;
- ii) peut être appliquée à des tronçons de route longs ou courts;
- iii) facilite l'analyse statistique;
- iv) a un rapport physique avec l'adhérence des pneus, les distances d'arrêt et la sécurité de conduite.

Elle ne fournit pas d'information directe sur les caractéristiques physiques, l'étendue ou l'emplacement des parties enneigées de la route.

#### La classification ponctuelle du type d'enneigement

Les études de cas laissent entendre que la mesure du glissement variable peut être utilisée pour classer automatiquement le type de matériau sous le pneu de mesure. Ceci constitue une amélioration par rapport à la simple mesure de l'adhérence en fournissant de l'information sur les caractéristiques physiques de la surface.

### La mesure ponctuelle de la fraction d'enneigement

Les mesures de l'adhérence servent à prévoir la fraction d'enneigement. Celle-ci est une mesure d'accompagnement du type d'enneigement, mais elle en diffère par le fait qu'elle varie continuellement plutôt que par types discrets.

### La mesure de la longueur des parcelles enneigées

Les parcelles peuvent être définies comme des segments discrets d'une surface ayant des caractéristiques internes homogènes. On peut faire appel à la modélisation prédictive établissant un lien entre l'adhérence à un point de mesure et le type ou la fraction d'enneigement pour diviser la surface à l'étude en segments de condition connue. Cela constitue une amélioration par rapport à la simple mesure et à la classification ou à la description ponctuelle en fournissant de l'information sur l'espacement et la longueur de différentes qualités de surface.

Les différents modèles utilisés pour chaque étude reposent sur différentes hypothèses relatives aux données. Ces méthodes et hypothèses sont décrites ci-dessous.

## **4. Collecte des données**

On a recueilli trois ensembles de données sur les mesures adhérence-glisserment variable et deux ensembles sur les conditions d'enneigement.

La résistance au glissement a été mesurée avec un dispositif de mesure d'adhérence Norsemeter monté sur une remorque tirée par une fourgonnette. On a mesuré la résistance sur une plage de vitesses de glissement en appliquant progressivement un frein hydraulique à une roue de mesure de 35 cm de diamètre chaussée d'un pneu sans sculpture jusqu'à ce qu'elle se bloque. La pression hydraulique sur un cycle de freinage de 1,7 seconde a été mesurée sur une rotation de 0,025 m de la roue. Les cycles de mesure étaient séparés par un court intervalle, choisi par l'opérateur et normalement réglé à 1,0 seconde, permettant à la roue de reprendre sa rotation. La pression hydraulique du système de freinage a été convertie en coefficient d'adhérence  $\mu = f_v / f_h$  où  $f_v$  correspond à la charge statique du pneu de mesure et  $f_h$  à la résistance horizontale calculée à partir de la pression du système de freinage. Le logiciel d'acquisition de données a tracé une courbe à partir des données de chaque cycle de freinage et a fourni des valeurs  $F_p$ ,  $F_{60}$ ,  $V_{crit}$  et un paramètre de validité de l'ajustement (Norsemeter, 1997). La distance d'échantillonnage couverte à chaque cycle de freinage variait selon la vitesse du véhicule tracteur et s'établissait en moyenne à 40 m pour toutes les données recueillies sur route. La vitesse moyenne de remorquage était d'environ 60 km/h. On a noté la distance parcourue et l'heure au début du cycle de mesure de chaque échantillon.

L'ensemble de données acquises pour l'étude sur l'adhérence comme quantité globale a été mesuré en 12 passes dans une direction sur un tronçon de 8 km de route asphaltée à 2 voies sur une période de 24 heures lors d'une importante tempête de neige le 9 janvier 1999. La période de mesure comprenait deux cycles d'accumulation de la neige et deux cycles d'enlèvement de la neige durant lesquels la surface a été dégagée quatre fois, avec épandage de sel quatre fois et de sable deux fois.

Les données sur la classification des types d'enneigement ont été recueillies à l'aide de la remorque de mesure de l'adhérence sur routes (MTO, 2001) et sur des pistes d'aéroport glacées (Boccanfuso, 1999) dans une grande variété de conditions d'enneigement au cours de trois hivers. Les surfaces mesurées ont été simultanément filmées au caméscope à partir du véhicule tracteur ou à l'aide d'une caméra de surveillance sur le côté de la route. Les types de surface ont été classés en utilisant les images et les sons enregistrés sur bandes vidéo et les classifications ont été assorties au point central approximatif de chaque échantillon de 40 m de longueur en utilisant les indications temporelles des données et des bandes vidéo. Les types de surface ont été classés seulement lorsque la surface semblait être uniformément couverte ou dégagée.

On a eu recours à une méthode semblable pour obtenir des données d'analyse de la fraction d'enneigement en utilisant un sous-ensemble des données du 9 janvier 1999. La fraction d'enneigement a été mesurée en divisant la voie de roulement en trois segments carrés latéraux de 1,2 m de côté et en estimant la fraction d'enneigement de chaque segment. Seul le segment où roulait le pneu de mesure de l'adhérence a été retenu pour l'analyse.

L'ensemble de données acquises pour l'étude sur l'adhérence comme quantité globale a aussi servi à l'analyse des segments enneigés.

## 5. Analyse des données

### L'adhérence en tant que quantité globale

On a étudié les variations de  $F_p$  durant une tempête de neige en comparant la structure de variance et les intervalles de confiance résultants avec les valeurs moyennes pour toutes les passes de mesure effectuées durant la tempête de neige du 9 janvier 1999.

Les intervalles de confiance sur la valeur moyenne d'un grand ensemble de données normalement distribuées peuvent être évalués selon la formule i.c. =  $1,96/(\sigma/\theta n)$ , où  $\sigma = \theta n \sqrt{3x^2 - (3x)^2/n(n-1)}$ . Si l'intervalle de confiance est spécifié, le nombre d'échantillons requis ou l'intervalle d'échantillonnage maximum peut être estimé à  $n = (\sigma (1,96/c.i.))^2$ .

Dans cette étude, l'intervalle d'échantillonnage requis sur un tronçon de route de 8 km a été comparé dans une variété d'états réels de surface durant une tempête de neige, avec un intervalle de confiance de 95 % sur la moyenne de 0,05 unité d'adhérence.

On a d'abord étudié la structure de variance de chaque passe de mesure à l'aide de deux chiffres qui résument les caractéristiques de la distribution de fréquence : la variance et l'asymétrie. On définit la variance comme  $\sigma^2$  et l'asymétrie comme une mesure de l'asymétrie d'une distribution de part et d'autre de la moyenne, où asymétrie = 0 est symétrique, asymétrie > 0 indique une distribution à droite et asymétrie < 0 indique une distribution à gauche.

Les transformations ont été appliquées à chaque passe pour minimiser l'asymétrie et normaliser  $F_p$  avant d'estimer  $\sigma$  et  $n$ . Les tendances relatives aux caractéristiques de distribution et aux intervalles de confiance ont ensuite été comparées.

### Classification ponctuelle des types d'enneigement

On a fait appel à l'analyse discriminante pour savoir si on pouvait utiliser l'adhérence pour classer les types de neige à la surface d'une route goudronnée. L'analyse discriminante identifie une combinaison linéaire de variables prédictives qui maximisent les différences entre deux groupes prédéfinis ou plus et classe chaque cas observé dans l'un des groupes (Klecka, 1975).

L'analyse discriminante demande que les données possèdent les caractéristiques suivantes :

- 1) distribution normale au sein des groupes,
- 2) égalité de variance entre les groupes et variance indépendante de la moyenne,
- 3) relations linéaires entre les variables prédictives,
- 4) distribution égale des cas entre les groupes.

Les ensembles de données brutes ne correspondaient pas aux hypothèses et on a appliqué des transformations exponentielles fondées sur une analyse des niveaux d'écart (SPSS, 1999) afin de normaliser les distributions et d'égaliser la variance entre les groupes. Les déterminants logarithmiques, qui sont un indicateur de covariance entre les groupes, ont été utilisés comme norme d'acceptation des transformations de sorte que les modèles dans lesquels les déterminants logarithmiques variaient de signe ou de plus de 100 % entre les groupes étaient rejetés.

La linéarité des relations variables a été étudiée à l'aide de diagrammes de dispersion des transformations et des données sélectionnées.

La dernière hypothèse s'assure que les fonctions discriminantes répondent à la force des relations variables et non au nombre de répétitions de ces relations. Les ensembles de données ont été recueillis de manière non contrôlée qui ne représentait pas également toutes les conditions variables ou tous les groupes; par conséquent, des facteurs de pondération ont été calculés pour chaque analyse afin d'égaliser les répétitions dans chaque groupe.

On a évalué la pertinence du modèle en comparant des classifications prévues à des classifications connues à l'aide d'un ensemble de données de validation. Les résultats ont été évalués séparément pour chaque type de neige parce que le nombre de cas variait largement selon le type et que les types de neige peuvent en général avoir une fréquence différente par rapport à cet ensemble de données. Dans l'ensemble de données de validation, chaque cas a été classé en utilisant un modèle calculé à partir de tous les cas, sauf celui qui était en train d'être classé (SPSS, 1999).

### Mesure ponctuelle de la fraction d'enneigement

On s'est servi de l'analyse de régression multiple pour mettre au point un modèle de prédiction de la fraction d'enneigement à partir des paramètres adhérence-glisserment variable. À la différence du type d'enneigement, la fraction d'enneigement est une quantité continue qui peut avoir des valeurs comprises entre 0 et approximativement 1. La régression multiple est un outil valable où la variable aléatoire est déterminée par la valeur d'une ou de plusieurs variables continues ou discrètes.

L'analyse de régression multiple exige que les données d'entrée possèdent les caractéristiques suivantes :

- 1) les cas sont indépendants et leur distribution est normale;
- 2) les relations entre les variables sont linéaires;
- 3) les résidus sont distribués au hasard.

On a évalué la normalité à l'aide du coefficient d'asymétrie. Les transformations ont été appliquées à chaque variable et celle dont le résultat d'asymétrie était le plus proche de zéro a été utilisée pour mettre au point les modèles de régression. La linéarité entre les variables transformées et la distribution aléatoire des résidus a été évaluée à l'aide de diagrammes de dispersion.

#### Mesure de l'inégalité de l'enneigement

Chaque passe de glissement variable continu enregistré le 9 janvier 1999 a été divisée en segments de chaussée dégagée et de chaussée enneigée à l'aide d'un seuil arbitraire de  $F_p$ . Les segments dont le facteur  $F_p$  était supérieur à 0,30 ont été définis comme chaussée dégagée et ceux dont le facteur  $F_p$  était égal ou inférieur à 0,30 ont été définis comme enneigés.

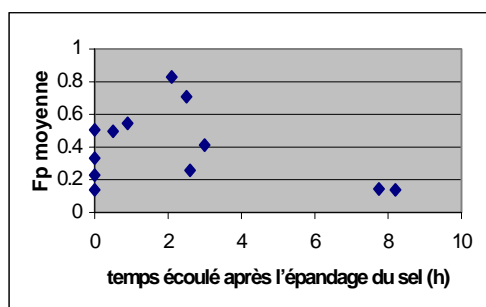
Les coefficients de variance et d'asymétrie ont été estimés pour chaque passe. Les données ont été analysées pour montrer les relations entre les caractéristiques de distribution, des mesures d'adhérence similaires et les opérations d'enlèvement de la neige durant une tempête.

## 6. Résultats

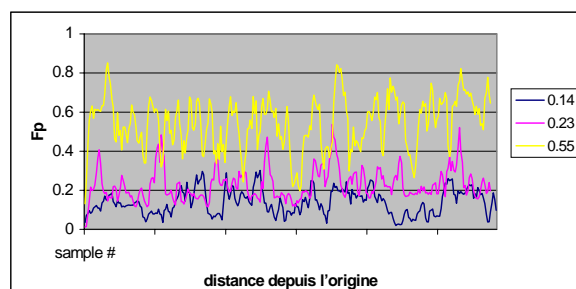
### L'adhérence en tant que quantité globale

$F_p$  a augmenté et diminué pendant deux cycles durant la période à l'étude, mais la comparaison des valeurs moyennes avec les moments d'épandage du sel indique une tendance à l'augmentation de  $F_p$  durant les deux heures suivant l'épandage du sel, puis à la diminution de  $F_p$  par la suite (figure 2). Trois tracés échantillons réalisés au moment où les moyennes de  $F_p$  étaient faibles, moyennes et élevées indiquent que la variance augmentait avec la valeur moyenne de  $F_p$  (figure 3).

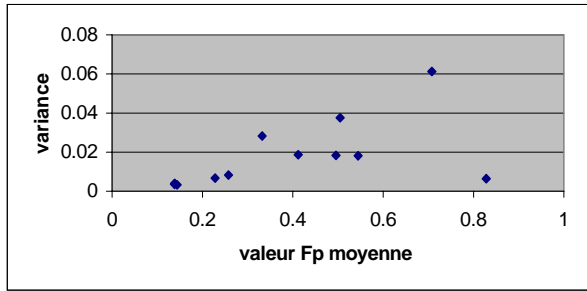
La variance n'a pas été directement mise en corrélation avec l'adhérence moyenne, mais elle a atteint son maximum aux valeurs moyennes (figure 4). La distribution des valeurs de  $F_p$  représentée par le coefficient d'asymétrie était normale durant les passes de mesure donnant des valeurs minimums de  $F_p$ , fortement distribuée à droite durant les passes donnant de faibles valeurs moyennes de  $F_p$ , et passant graduellement à une forte distribution à gauche avec l'augmentation de  $F_p$  (figure 5). Les tendances de variance et d'asymétrie aux valeurs moyennes de  $F_p$  laissent supposer que  $F_p$  ne représente pas une variation continue des caractéristiques de surface. Au lieu de cela, les valeurs moyennes faibles regroupent de nombreuses valeurs faibles et quelques valeurs élevées et les valeurs moyennes élevées, de nombreuses valeurs élevées et quelques valeurs beaucoup plus faibles. Au milieu de la plage des valeurs de  $F_p$ , les nombres de lectures élevées et faibles s'équilibrent. La référence aux valeurs moyennes illustrées à la figure 2 indique qu'on a observé des tendances similaires sur deux cycles consécutifs d'accumulation et d'enlèvement de la neige.



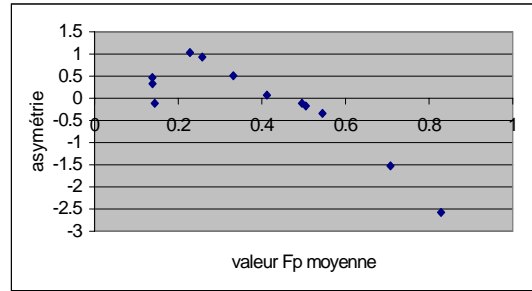
**Figure 2.** Effet d'épandage du sel sur la valeur  $F_p$  moyenne



**Figure 3.**  $F_p$  sur trois passes de mesure

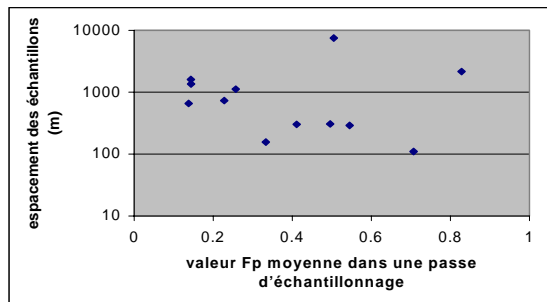


**Figure 4.** Changement de variance en fonction de la valeur  $F_p$  moyenne



**Figure 5.** Changement d'asymétrie en de la valeur  $F_p$  moyenne

En utilisant des transformations de normalisation appropriées pour chaque distribution, on a estimé l'espacement des échantillons nécessaire pour définir des intervalles de confiance de 95 % à  $\pm 0,05$  unité de la moyenne près (figure 6). L'espacement d'échantillonnage maximum permis par l'intervalle de confiance était de 1 000 m pour une passe dont la valeur  $F_p$  moyenne était inférieure à 0,2 et de 100 m pour une passe dont la valeur  $F_p$  moyenne était de 0,7.



**Figure 6.** Variation de l'intervalle d'échantillonnage en fonction de la valeur  $F_p$  moyenne,  $\pm 0,05$

### Classification des types de neige

Les conditions d'enneigement de route ou de piste d'atterrissage ont été classées à l'origine en 13 types. Ceux-ci ont été regroupés en trois systèmes de classification illustrés aux tableaux 1, 2 et 3 qui comportent respectivement deux, trois et six groupes.

Les tracés en boîte illustrant la médiane, les déviations quartiles et les valeurs aberrantes de  $F_p$ , de  $F_{60}$  et de  $V_{crit}$  pour la classification en six groupes (figure 7) laissent supposer qu'aucune variable prise seule n'est susceptible de faire la distinction entre l'ensemble des groupes et que la classification peut être améliorée en utilisant deux ou trois variables ensemble.

Les modèles discriminants ont été mis au point en utilisant des variables prédictives de  $F_p$ , de  $F_{60}$  et de  $V_{crit}$  individuellement et ensemble pour chacune des classifications des types de neige. Les meilleurs résultats pour la classification comportant deux groupes ont été obtenus en utilisant  $F_p$  seule comme variable prédictive. Les hypothèses du modèle ont été vérifiées en utilisant  $F_p$  sous une forme brute.

**Tableau 1.**

Classification en deux groupes des types de neige

1-A	1-B
Chaussée dégagée sèche, Chaussée dégagée humide	Neige damée, glace nue, neige sur glace

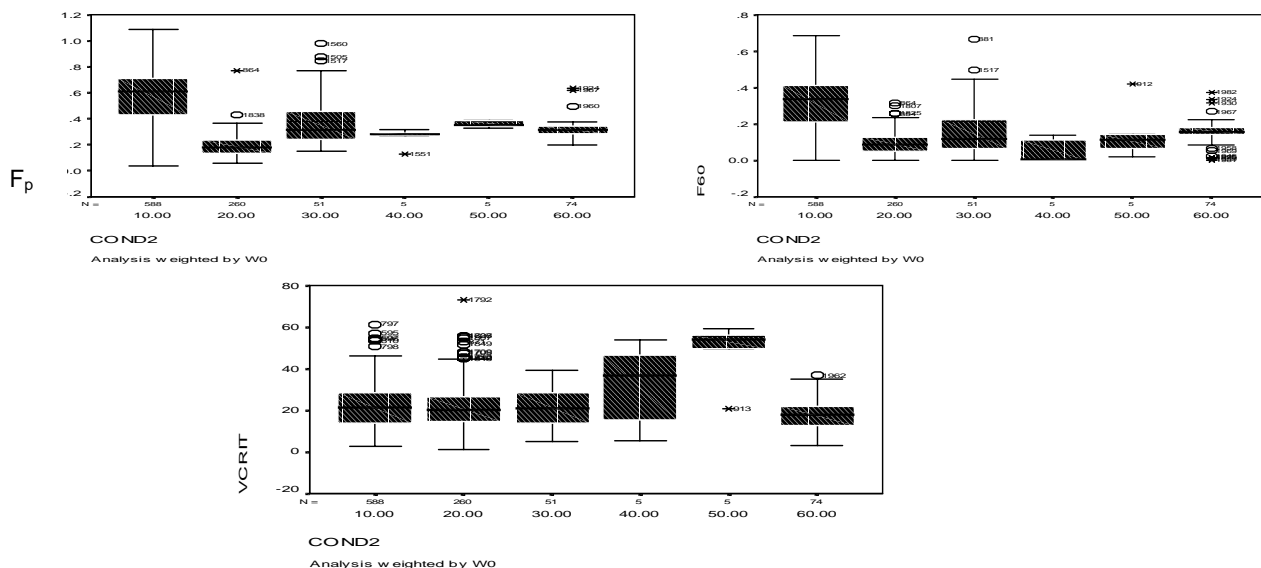
**Tableau 2.**

Classification en trois groupes des types de neige

2-A	2-B	2-C
Chaussée dégagée sèche, chaussée dégagée humide	Neige damée, glace nue, neige sur glace	Neige fondante, neige humide

**Tableau 3.** Classification en six groupes des types de neige

3-A	3-B	3-C	3-D	3-E	3-F
Chaussée dégagée sèche, chaussée dégagée humide, Neige fondante	Neige mouillée, glace nue, neige sur glace	Neige mince, neige dispersée	Neige damée	Neige damée sablée	Neige damée sur glace, neige humide sur glace, neige sur ornières de glace



**Figure 7.** Tracés en boîte de  $F_p$ , de  $F_{60}$  et de  $V_{crit}$  à partir de l'ensemble de données de classification (la cond. 2 est définie au tableau 4)

L'analyse fondée sur les deux groupes a classé correctement 96 % des cas à validation croisée avec 92,5 % des chaussées dégagées et 99,6 % des chaussées enneigées correctement classifiées.

Avec le mode de classification à trois groupes, on a obtenu les meilleurs résultats en utilisant les variables prédictives de  $F_p$ , de  $F_{60}$  et de  $V_{crit}$  ensemble. Les hypothèses du modèle ont été vérifiées en utilisant  $F_p$  et  $V_{crit}$  sous forme brute et  $F_{60}$  transformée en racine carrée.

L'analyse a donné deux fonctions discriminantes canoniques et trois fonctions de classification qui ont correctement classé 66 % des cas à validation croisée avec 70,1 % des chaussées dégagées, 99,6 % des chaussées enneigées et 31,6 % des chaussées recouvertes de neige fondante ou de neige mouillée correctement classifiées. Cela indique que la classification n'était pas fiable dans des conditions de neige fondante et de neige mouillée avec contact partiel avec la chaussée. La mauvaise classification entre les groupes indique que l'adhérence sur les surfaces mouillées ou la neige mouillée ressemble davantage à l'adhérence sur la chaussée dégagée qu'à celle sur la chaussée complètement recouverte de neige.

On a obtenu les meilleurs résultats dans la classification en six groupes en utilisant les variables prédictives de  $F_p$  et de  $F_{60}$  ensemble. Les hypothèses du modèle ont été vérifiées en utilisant  $F_p$  et  $F_{60}$  transformée en racine carrée.

L'analyse du groupe 3 a donné deux fonctions discriminantes canoniques et six fonctions de classification qui ont correctement classé 50,6 % des cas à validation croisée répartis comme l'indique le tableau 4. Le pourcentage à l'intersection d'une rangée et d'une colonne indique la proportion des cas d'un groupe qui ont été classés dans leur groupe même ainsi que dans un autre groupe. Une intersection de 100 % d'un groupe avec lui-même signale une classification parfaite de ce groupe.

Les classifications des types de neige en deux, trois et six groupes ont reconnu avec succès les types de surface entièrement recouverte de neige ou de glace ou la chaussée dégagée. La classification a été moins efficace entre la neige damée ou la glace et la neige sur glace ainsi qu'entre la neige damée et la neige damée sablée. La classification la moins réussie a été celle de la neige mince ou dispersée, où le contact partiel avec la chaussée peut avoir eu lieu.

L'analyse discriminante laisse entendre que la méthode de mesure à glissement variable peut faire la distinction entre les types de chaussée dégagée ou enneigée lorsque la surface est homogène, mais ne peut pas le faire dans des conditions de contact partiel avec la chaussée.

**Tableau 4.** Résultats de l'analyse discriminante, classification à six groupes  
Résultats obtenus avec des échantillons à validation croisée

Groupe	% de classification dans le groupe					
	10	20	30	40	50	60
10. chaussée dégagée, neige fondante	74,5	6	2,4	5,4	8,5	3,2
20. neige humide, glace nue, neige dispersée sur la glace	0,4	71,5	0,8	13,8	3,1	10,4
30. neige mince ou dispersée	29,4	15,7	3,9	23,5	17,6	9,8
40. neige damée	0	20	0	60	0	20
50. neige damée sablée	20	0	20	20	40	0
60. neige damée, neige humide sur glace, neige sur ornières de glace	5,4	2,7	17,6	13,5	13,5	47,3

### Mesure de la fraction d'enneigement

On a mesuré la fraction d'enneigement de 34 échantillons de l'ensemble de données d'adhérence du 9 janvier 1999. Les hypothèses du modèle ont été vérifiées en utilisant une version logarithmique transformée de  $F_p$  les valeurs brutes de  $F_{60}$  et les valeurs brutes de  $(V_{crit}/\text{vitesse de remorquage})$ . Cette dernière variable est interprétée comme le coefficient de glissement à  $F_{60}$ .

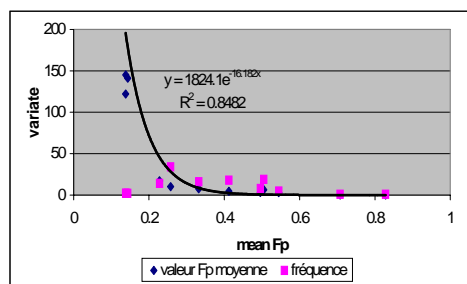
L'équation du modèle, fraction d'enneigement =  $0,419 + 0,688 F_p - 0,775 F_{60} - 0,245 V_{crit}$ , avait des coefficients de régression significatifs à  $\alpha < 0,01$  et expliquait 94 % de la variance de la fraction d'enneigement. En outre, 88 % de la variance a été expliquée par  $F_p$ , 3 % par  $F_{60}$  et 3 % par  $V_{crit}$ . L'erreur-type de l'estimation et la valeur résiduelle moyenne de la fraction d'enneigement étaient toutes deux inférieures à 0,005.

Cela indique que la fraction d'enneigement sous la roue de mesure était prévisible de façon fiable en utilisant la méthode du glissement variable et laisse entendre que les mesures d'adhérence-glissement variable peuvent servir à estimer la fraction d'enneigement aux fins d'assurance de la qualité.

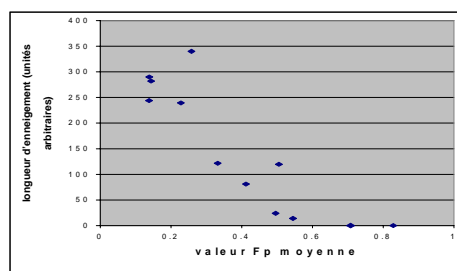
### Inégalité de l'enneigement

La longueur moyenne des parcelles d'enneigement pour chaque passe de mesure a été estimée à l'aide d'une simple valeur seuil de  $F_p$ . La longueur moyenne des parcelles de neige avait une relation logarithmique inverse avec la valeur  $F_p$  moyenne, indiquant qu'une petite augmentation de l'adhérence était associée à une forte diminution de la longueur moyenne des parcelles de neige à de faibles valeurs d'adhérence durant la tempête du 9 janvier 1999 (figure 9). La plus haute fréquence des parcelles de neige était associée aux valeurs moyennes de  $F_p$ . Cela est conforme aux tendances observées dans la variance de  $F_p$  avec les valeurs moyennes de  $F_p$  pour chaque passe de mesure (figure 4).

La longueur totale d'enneigement a été calculée à chaque passe de mesure (figure 10). Elle indique une tendance linéaire par rapport à  $F_p$  et fournit une mesure de l'efficacité des activités d'entretien.



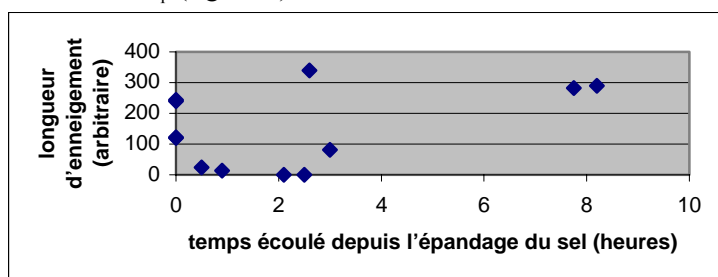
**Figure 9.** Longueur moyenne et nombre total de parcelles de neige



**Figure 10.** Longueur d'enneigement et valeur  $F_p$  moyenne



La figure 11 indique que la longueur totale d'enneigement a diminué jusqu'à trois heures après l'épandage du sel et qu'elle a augmenté pendant des périodes plus longues, conformément à la tendance de  $F_p$  (figure 2).



**Figure 11.** Longueur d'enneigement et activités d'entretien

L'analyse de la longueur d'enneigement appuie les conclusions de l'analyse de  $F_p$  selon laquelle les variations de l'adhérence moyenne résultent de changements dans la structure de variance des parcelles discrètes à adhérence faible et élevée, qui sont des parcelles de chaussée dégagée et couverte de neige, et non d'un changement continu et graduel de l'adhérence à tous les points de la surface de mesure.

## 7. Discussion et conclusions

L'analyse de l'adhérence maximale estimée à partir des mesures d'adhérence-glissement variable durant une tempête de neige a démontré que la variance suivait des tendances prévisibles en ce qui concerne la valeur moyenne et la distribution de l'enneigement. Les changements de la structure de variance ont fait en sorte que les critères relatifs à l'intervalle d'échantillonnage varient selon la valeur moyenne durant une tempête, passant d'environ 100 mètres aux valeurs médianes de la  $F_p$  moyenne à plus de 1 000 mètres aux valeurs extrêmement élevées et faibles de la  $F_p$  moyenne, pour des intervalles de confiance de 95 % de +/-0,05 unité. Les modèles de variance ont été constants durant deux cycles d'accumulation et d'enlèvement de la neige sur une période de 24 heures.

Deux types de surface, dégagée et entièrement couverte de neige ou de glace, ont été reconnus avec succès en utilisant la valeur  $F_p$  seule. La classification de nombreux types de surface regroupés en trois ou six groupes différents a été moins réussie. Les surfaces non rigides où le pneu de mesure pouvait entrer en contact partiel avec la chaussée ont été mal classifiées en utilisant l'un ou l'autre ou plusieurs des critères de classification que sont  $F_p$ ,  $F_{60}$  et  $V_{crit}$ .

La fraction couverte de neige de la surface de la chaussée parcourue par la roue de mesure a été prévue de façon fiable en faisant appel à la régression multiple avec  $F_p$ ,  $F_{60}$  et  $V_{crit}$ . Cela indique que la fraction d'enneigement peut être mesurée de façon fiable à l'aide d'un appareil de mesure d'adhérence à glissement variable.

Lorsqu'on a utilisé un seuil de  $F_p$  pour distinguer les segments de chaussée dégagés de ceux couverts de neige, la longueur moyenne des parcelles de neige sur une passe donnée avait une relation exponentielle inverse avec la valeur  $F_p$  moyenne, alors que le nombre de parcelles de neige était plus élevé avec les passes de mesure donnant des valeurs  $F_p$  moyennes.

La correspondance entre la variance maximum de  $F_p$  et le nombre maximum de parcelles de neige à des valeurs moyennes de  $F_p$  indique que la valeur moyenne de  $F_p$  correspond à un ensemble de parcelles discrètes de neige à faible adhérence et de chaussée dégagée à forte adhérence plutôt qu'à un changement continu et graduel de l'adhérence à tous les points de la surface de mesure.

$F_p$  a augmenté et la longueur totale d'enneigement a diminué au cours des deux premières heures après l'épandage de sel, puis a augmenté par la suite. Cela suppose que l'on peut utiliser soit  $F_p$ , soit la longueur d'enneigement pour mesurer le niveau de service, en se basant sur le temps écoulé pour dégager une chaussée ou parvenir à un autre critère de qualité superficielle.

Cette étude démontre que les mesures d'adhérence par glissement variable peuvent améliorer ou remplacer les observations qualitatives pour mesurer de façon objective et répétée la conformité aux normes de service d'après l'importance de l'enneigement à la surface de la route. Il faudra davantage de travail pour l'appliquer à la classification des types de neige.

## 8. Remerciements

Cette étude a été entreprise dans le cadre du projet Maintenance 2001 de la Division des opérations du ministère des Transports de l'Ontario. L'auteur remercie de leur soutien le Bureau d'entretien de la Direction de la construction et des opérations et le bureau de district d'Owen Sound qui lui a fourni le personnel et l'infrastructure ayant permis la réalisation des essais et l'analyse des résultats ainsi que l'exploitation sur le terrain. Certaines données ont été recueillies conjointement dans le cadre du Programme de recherche conjoint sur la glissance des chaussées aéronautiques l'hiver parrainé par Transports Canada à l'aéroport Jack Garland de North Bay (Ontario).

## 9. Bibliographie

Andresen, H, et Z. Rado, 1995, *Tire Friction on Winter Surfaces*. Symposium Summer-Winter Integrated Field Technologies (SWIFT), Transports Canada, Winnipeg.

Boccanfuso, A., 1990, Gestion du Programme de recherche conjoint sur la glissance des chaussées aéronautiques l'hiver, dans les actes de la 2<sup>e</sup> Réunion internationale sur la performance des aéronefs sur des pistes contaminées, Montréal, Centre de développement des transports, Transports Canada, TP 13579 (novembre 1999).

Fleege, E.J. et J.C. Wambold, 1998, *Variable Slip Friction Measurement Techniques for Snow and Ice Operations*, X<sup>e</sup> congrès international AIPCR de la Viabilité hivernale, AIPCR-Association mondiale de la route, publié par l'Institut suédois de recherche sur la route et le transport, Linköping.

Klecka, W.R., 1975, *Discriminant Analysis*, dans *Statistical Package for the Social Sciences*, H.H. Nie et al, rédacteurs, McGraw-Hill, New York, 1975.

MTO, 1998, *Politique d'entretien 98-01*, Division des opérations, ministère des Transports de l'Ontario, St. Catharines, Ontario.

MTO, 1999, Site Web du projet Maintenance 2001.

Norsemeter, 1997, *ROAR Owner's Manual*, Norsemeter AS, Norvège.

Perchanok, M., 1998, *Friction Based Measures for Snow Clearing Operations*, X<sup>e</sup> congrès international AIPCR de la Viabilité hivernale, AIPCR-Association mondiale de la route, publié par l'Institut suédois de recherche sur la route et le transport, Linköping.

AIPCR, 1992, *Expérience internationale de comparaison et d'harmonisation des mesures de glissance et de texture*, Publication 01.04.T, 1992.

Rado, Z., 1994, *A Study of road surface texture and its relationship to friction*, thèse de doctorat, Department of Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, 169 p.

SPSS, 1999, *Statistical Package for the Social Sciences, Base 9.0 Applications Guide*, SPSS Inc., Chicago, 1999.