

METHODES DE MESURES DU FROTTEMENT SUR ROUTES ENNEIGÉES OU VERGLACÉES

Prof. Dr. J. C. Wambold*, Prof. Dr. J. J. Henry* et Dr. Zóltan Radó**

*Professeur Honoraire en Génie Mécanique

** Associé de Recherche

Institut des Transports de Pennsylvanie

Pennsylvania State University

University Park, PA 16802, USA

TEL: +1-814-865-1891/FAX: +1-814-865-3039

Email: jcw@psu.edu

Email: jjhenry123@aol.com

Email: z.rado@worldnet.att.net

1 . Résumé

Les sociétés d'entretien des routes ont besoin d'un mécanisme relativement peu coûteux pouvant mesurer l'adhérence sur les chaussées en conditions hivernales et qui peut indiquer au chauffeur de chasse-neige si l'adhérence est suffisante ou non, en temps réel. Cette méthode pourrait aider le chauffeur à déterminer quand, où et en quelle quantité les produits abrasifs et/ou chimiques doivent être employés pendant l'entretien des routes enneigées ou verglacées, dans toutes sortes de conditions. Certaines études ont utilisé les mesures de frottement sous freinage comme indicateur. Cependant, cette méthode ne peut pas être employée en cas de trafic abondant.

Des études ont été menées sur le terrain, dans les installations de la NASA à Wallops ainsi que dans les états de l'Iowa, du Minnesota, du Michigan et en Norvège. Ces études ont utilisé le ROAR de Norsemeter, et par la suite le SALTAR, afin de déterminer si ce matériel est utilisable pour l'entretien des routes enneigées ou verglacées, s'il est fiable et durable. L'appareil de mesure est monté sur un chasse-neige et la mesure est obtenue en freinant une roue à 100% et en mesurant la force de frottement que le revêtement de la chaussée exerce sur la roue lorsque celle-ci recommence à tourner. Chaque mesure consiste en une mesure de la vitesse de glissement variable et enregistre le frottement maximum, le glissement lors du frottement maximum et une comparaison du frottement avec la pente de la courbe de glissement après frottement maximum. Des données sur les précipitations, l'état du revêtement, la température de la chaussée, la température de l'air, la vitesse de l'appareil de mesure et les valeurs de frottement sont enregistrées.

Le matériel, les procédures de mesure et les résultats sont décrits en détail. Cette recherche préliminaire montre que les différentes conditions de la chaussée peuvent être identifiées et que la valeur du frottement peut être déterminée pour savoir s'il faut saler beaucoup, peu ou pas du tout. De plus, un membre du personnel peut surveiller et évaluer l'efficacité des produits abrasifs et/ou chimiques employés.

2. Introduction

Un projet commun de Mesure d'Adhérence sur les Routes Hivernales a été mis en place en 1994-95 avec la collaboration de Norsemeter (Administration Norvégienne Responsable des Routes), le Conseil d'Administration Norvégien et le Laboratoire Norvégien de Recherche de la Route. Cette étude a établi des lignes directrices en matière d'entretien et a examiné les technologies actuelles de mesure d'adhérence, ainsi que le PIARC, projet de recherche sur le frottement et la texture. En se basant sur cette étude, Norsemeter a développé le ROAR (système d'analyse et d'enregistrement de la route). Ce système a été conçu pour être utilisé de manière autonome lorsqu'il est monté sur une remorque, ou pour être

installé sur une saleuse. Des études de terrain ont été menées dans le Minnesota et en Norvège pendant l'hiver 1995-96 dans le cadre d'une collaboration entre Minn DOT et Norsemeter. Ce travail a débouché sur un projet commun de chasse-neige qui incorporerait le matériel dernier cri sur une déneigeuse. Ce projet a été dirigé dans l'Iowa avec la participation du Minnesota et du Michigan. D'autres états se joignent maintenant au groupe et une étude coordonnée a lieu en Norvège. Ce texte est une récapitulation de ces études. Il décrit le matériel, les procédures de mesure, les résultats de cette recherche préliminaire et comprend également des données de l'étude norvégienne.

3. L'Appareil de Test—ROAR

L'appareil de mesure ROAR (figure 1) est un système de mesure intermittent muni d'une roue test à glissement variable. Il est monté sur une remorque à deux roues tirée par un véhicule. La roue test se situe dans l'alignement de la roue de gauche et est montée directement sur l'axe d'un système hydraulique qui contrôle le glissement de la roue et qui est programmé pour d'obtenir l'action de freinage désirée sur cette roue. Une action de freinage consiste en une diminution linéaire de la vitesse rotatoire de la roue allant de la rotation libre à la roue bloquée. Pendant cette action, le mouvement de torsion sur l'axe de la roue est mesuré et converti en un coefficient de frottement par l'ordinateur de l'appareil. Une charge statique verticale de 1,2 kN (300 lbf) est placée sur la roue qui a une suspension à quatre barres sans ressorts ni amortisseurs. Le pneu test est un pneu ASTM E-1551 [1] gonflé à 207 kPa (30 psi). L'instrument est prévu de façon à détecter le mouvement de torsion agissant sur la roue, qui est ensuite converti en coefficients de frottement par un ordinateur, et la vitesse de rotation de la roue qui est traduite en données de distance et de distance par unité de temps. L'ordinateur est programmé pour calculer plusieurs paramètres de frottement, y compris le coefficient de frottement maximum, la vitesse de glissement à laquelle le frottement maximum se produit, la pente de la courbe du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement, ainsi que d'autres données. Le programme de l'ordinateur utilise le modèle de frottement Rado [2] pour dériver ces paramètres. Les coefficients de frottement peuvent être calculés pour toutes les vitesses de glissement à partir d'une seule action de freinage, y compris les frottements avec taux de glissement minimal de 15 ou 18.5%, et pour d'autres vitesses que celles à laquelle la mesure est faite. Les valeurs mesurées sont préservées par l'ordinateur, sorties sur une imprimante sous forme de graphiques et enregistrées en fichiers sur disquettes.



Figure 1. La Remorque du ROAR Utilisée pour la Mesure de Frottement

Le ROAR de Norsemeter mesure la vitesse de glissement variable (voir Figure 2 ci-dessous).

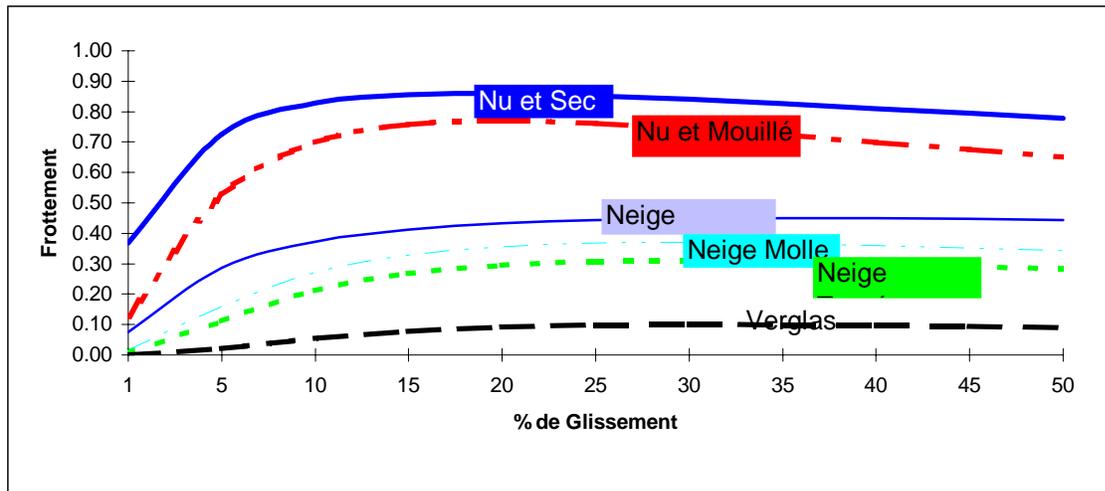


Figure 2. Courbe de Frottement Comparé au Taux de Glissement dans Six Types de Conditions [3]

La Figure 2 donne un exemple de tests de base sur revêtement sec et des exemples sur revêtement mouillé, couvert de neige fondue, de neige molle et de neige tassée, à partir de tests menés par MinnDOT, ainsi qu'un exemple de tests sur verglas mouillé faits en Norvège. Les données sont adaptées au modèle de Rado afin d'obtenir les trois coefficients nécessaires à la production de la courbe de frottement/vitesse de glissement. Ces trois coefficients sont μ_{peak} (valeur de frottement maximum), S_{peak} (vitesse de glissement à laquelle le frottement maximum se produit) et C (valeur qui donne la pente de la courbe, appelée le "facteur pente"). L'objectif était d'étudier ces valeurs afin d'établir ce qu'il faut pour déterminer le type de condition sur la chaussée et pour savoir si le salage est nécessaire. On notera que la Figure 2 montre que le frottement sur chaussée mouillée diminue plus rapidement avec la vitesse. Une corrélation a été établie entre ce phénomène et la macrotexture. On notera aussi que le taux de glissement auquel le frottement maximum se produit se trouve environ à 18% sur surface sèche, à 20% sur surface mouillée, et aux alentours de 30% en conditions hivernales. Ce fait, accompagné de la chute du frottement maximum semble donner des renseignements importants. Le facteur pente distingue aussi les neiges molle et fondue de la neige tassée et du verglas. D'autre part, le verglas se distingue de la neige tassée par le frottement faible.

Ce projet préliminaire [4] a réussi à établir des mesures plus valables et a montré que les constantes du modèle Rado peuvent être utilisées pour différencier les types de condition. Le frottement maximum accompagné de la vitesse de glissement lors du frottement maximum distinguent le verglas ou la neige des conditions sèches ou mouillées. Le facteur pente sépare ensuite la neige molle ou fondue de la neige tassée ou du verglas. Le projet a montré que les valeurs de frottement peuvent être surveillées en temps réel et que les décisions de salage semblent pouvoir être prises pour déterminer s'il faut saler ou non, ou pour répondre avec différents degrés de salage. Suite à ces résultats encourageants, il a été décidé de continuer l'étude aux Etats-Unis et en Norvège avec des expériences supplémentaires. Les états de l'Iowa, du Michigan et MinnDOT ont monté des appareils sur les saleuses et ont évalué leur utilisation l'hiver dernier.

Pendant la deuxième année d'essai du ROAR, les trois états ont apporté leurs appareils à la piste d'essai de St Paul, Minnesota [5]. L'appareil du Michigan était monté sur une remorque, celui de l'Iowa était monté juste derrière la cabine dans l'alignement de la roue gauche et celui du Minnesota était monté sur le pare-chocs avant dans l'alignement de la roue gauche. D'autre part, le Minnesota et l'Iowa ont fourni deux remorques de dérapage KJ Law ASTM E-274 [6] à titre de comparaison. Quatre emplacements ont été utilisés sur la piste d'essai pour tester les appareils. Le Tableau 1 montre la

Constante de Vitesse et la MTD (Mesure Volumétrique de la Profondeur Moyenne de Texture) pour chaque emplacement.

Tableau 1. Texture des sites d'essai à la piste de St. Cloud, MN

Emplacement sur la piste	Constante de vitesse [7] (Km/h)	Profondeur moyenne de texture [8] (MTD en mm)
1	74,0	0,75
2	16,2	0,24
3	46,3	0,51
4	182,2	1,71

Les tests ont été menés sur revêtement mouillé et sec aux vitesses suivantes: 32, 48, 64 et 80 km/h. Les résultats ont montré des comparaisons favorables des appareils pour les mesures de μ_{peak} et du frottement à 65 km/h avec des corrélations de R^2 de 0,8 et 0,75. Cependant l'appareil de l'Iowa a donné une pente différente de celle des autres appareils pour μ_{peak} . Les appareils ont été testés par la suite individuellement dans leur état respectif, en conditions hivernales. L'appareil de l'Iowa ne s'est pas très bien comporté du point de vue de la construction. En général, les appareils donnaient des mesures satisfaisantes, mais n'étaient pas durables. L'environnement associé à l'utilisation des déneigeuses est extrêmement rude et astreignant. La durabilité et le coût des ROARs ont mené Norsemeter à ensuite développer un appareil moins cher, de conception plus solide, monté sur un chasse-neige et appelé le SALTAR.

4. Le SALTAR

L'appareil de mesure (SALTAR) est un système de mesure intermittent muni d'une roue test à glissement variable. Il est monté sur le châssis de la déneigeuse derrière le chauffeur, dans l'alignement de la roue gauche. L'appareil utilise un frein électrique pour arrêter complètement la roue test. L'action de freinage est relâchée et la vitesse de rotation de la roue va du blocage au roulement libre. Pendant cette action, la vitesse de la roue est mesurée et la force de torsion exercée sur la roue est calculée et convertie en un coefficient de frottement. Une charge statique verticale de 70 kg (155 livres) est placée sur la roue test. Le pneu test est un pneu Bridgestone 8F-228 135R X 12, gonflé à 207 kPa (30 psi). L'ordinateur est programmé de manière à calculer le frottement moyen qui donne à l'utilisateur un degré de frottement de 1 à 5, une mesure de 1 étant médiocre et une mesure de 5 étant la meilleure. Pour l'évaluation et la recherche, le frottement exact calculé peut être enregistré.

L'élément mécanique principal du SALTAR est le système de la roue test. Le mécanisme de cette roue est composé d'une charpente en forme d'échelle extensible. Cette structure est faite de trois barres transversales et de deux cylindres verticaux (voir Figures 3 et 4).

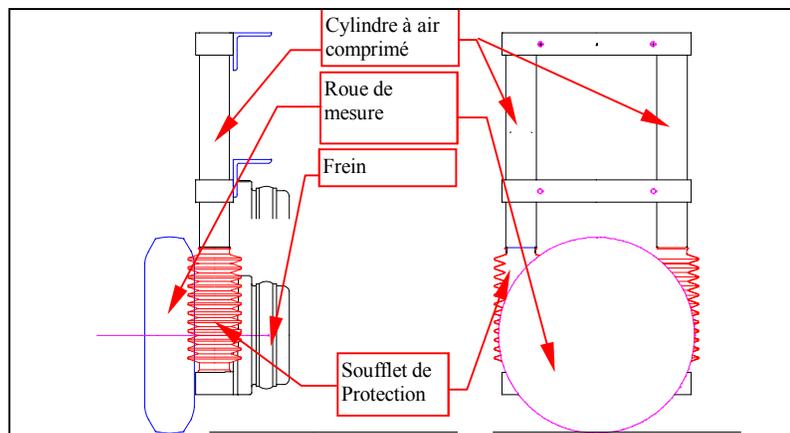


Figure 3: Le SALTAR, Appareil de Mesure de Frottement



Figure 4: Le SALTAR, Appareil de Mesure de Frottement Monté sur une Saleuse/Déneigeuse

L'ordinateur fonctionne à l'aide d'un boîtier muni d'un clavier et d'un affichage pour guider l'utilisateur. Ce boîtier est une télécommande qui tient facilement dans la main et est reliée au système de mesure. Il affiche également les résultats de la mesure en temps réel. Les indications des touches de contrôle et l'affichage sont disposés de manière à permettre à l'utilisateur la souplesse d'utilisation et la facilité d'observation. Etant donné sa petite taille, le boîtier peut être placé n'importe où dans la cabine du véhicule.

L'instrument de mesure de frottement SALTAR a été conçu avec l'idée de mobilité et d'adaptabilité. La symétrie et l'alignement de sa structure de montage font du SALTAR un système très modulaire. L'étroitesse du système dans la direction perpendiculaire au sens du déplacement et de la mesure permet de monter l'appareil pratiquement partout sur un gros chasse-neige ou une saleuse. L'appareil a été conçu pour être monté dans l'alignement de la roue gauche ou droite, ou au milieu du véhicule. Les caractéristiques simples et uniques du SALTAR font que le système peut être utilisé en marche avant et arrière sans difficulté. Donc, l'appareil peut être pivoté de 180° si le montage le nécessite.

5. Evaluation du SALTAR au Centre de Vol de la NASA à Wallops

Chaque année, la NASA organise un atelier sur le frottement des pistes d'envol dans ses installations de Wallops. Il s'y trouve actuellement 19 emplacements d'essais différents, d'un frottement sur revêtement mouillé allant de 0,01 à presque 1. En 1999, dix appareils différents de mesure de frottement étaient disponibles. Cependant les données ne sont actuellement connues que pour les six appareils suivants:

USFT: Version américaine de l'appareil de mesure de frottement sur les surfaces de piste d'envol venant de Suède, avec deux pneus différents.

SALTAR: Un appareil de mesure de frottement conçu par Norsemeter pour les saleuses.

SFT79: L'appareil de mesure de frottement Saab appartenant à Transport Canada. (1997)

BV11: Un appareil de mesure de frottement conçu en Suède et appartenant à la FAA.

RFT: Un appareil de mesure de frottement sur les surfaces de piste d'envol conçu par K.J. Law et appartenant à la FAA.

E274: Un testeur de dérapage de VADOT

Tous ces appareils ont été utilisés sur certains ou sur tous les 19 sites d'essais en mode d'arrosage automatique. Les valeurs de frottement mesurées par les différents appareils varient d'un pourcentage allant jusqu'à 50%. Le SALTAR donne toujours des valeurs situées dans la gamme de celles des autres appareils. Cependant, ses mesures de frottement augmentent lorsque la vitesse augmente, sauf dans

quelques cas (voir l'annexe). Tous les autres systèmes donnent généralement des valeurs qui diminuent lorsque la vitesse augmente. Une enquête sur le SALTAR a révélé que les calculs faits par Norsemeter devraient être sensibles à la vitesse. Cependant, le SALTAR a été conçu pour des vitesses de déneigeuses et de saieuses et en effet, à 50 km/h (32 mph), le SALTAR donne des mesure dans la gamme de celles des autres appareils. De plus, les mesures de frottement du SALTAR et celles de la remorque E-274 à 30 km/h sont identiques. On doit donc s'attendre à ce que pour les frottements peu élevés et les vitesses peu élevées, le SALTAR puisse donner de bonnes mesures de frottement.

Les résultats des tests avec le SALTAR sur revêtement mouillé se trouvent sur le graphique de la Figure 5. Ce graphique représente le frottement par rapport à la vitesse du SALTAR en comparaison avec d'autres appareils de mesure. Les courbes de ces autres appareils ont été ajoutées à celles du SALTAR et de la remorque de dérapage E-274. Dans ces séries de tests, la courbe du SALTAR indique un effet de frottement en augmentation lorsque la vitesse augmente. Une enquête a montré que cette augmentation est due, au moins en partie, à l'arrosage continu d'eau sur le pneu. En effet, l'épaisseur de la couche d'eau diminue lorsque la vitesse du véhicule augmente, ce qui fait augmenter le frottement. En conséquence, les tests ont montré que le SALTAR mesure le frottement de manière cohérente. Cependant, des test supplémentaires seraient nécessaires pour déterminer spécifiquement si la vitesse du véhicule joue aussi un rôle dans les résultats inverses de la courbe.

Puisqu'à l'origine le SALTAR a été conçu pour être utilisé en conditions hivernales, l'équipe de recherche a décidé de faire plus d'essais sur le terrain par conditions hivernales. Etant donné que l'hiver dernier a été anormalement doux dans le Midwest, le groupe de recherche a pris la décision d'envoyer le véhicule test dans un autre atelier de mesure de frottement sponsorisé par la NASA, à North Bay dans l'Ontario au Canada. Ce stage a été mené du 17 au 31 Janvier 2001, à l'aéroport Jack Garland de North Bay (Ontario). Le véhicule d'entretien de l'Iowa a participé à la deuxième semaine de stage pendant laquelle les véhicules de frottement étaient testés. Le but de cet atelier était d'essayer le SALTAR sur le terrain en conditions hivernales, sur des routes recouvertes de verglas et de neige tassée.

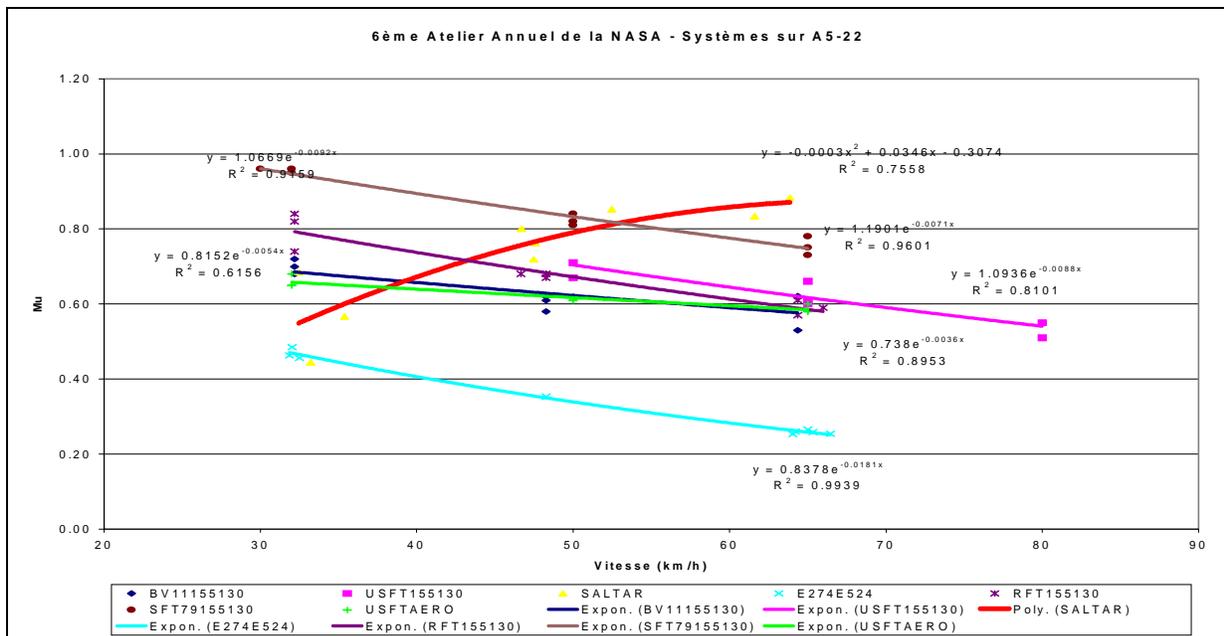


Figure 5. Exemple de Comparaison au 6ème Atelier de Mesure de Frottement sur Piste d'Envol, Mesures de Frottement du SALTAR par rapport au ASTM E-274 (May 1999)

6. North Bay (Canada)

Le SALTAR de l'Iowa a été emmené à North Bay et monté sur un chasse-neige en Janvier 2000. L'appareil a été testé en même temps que d'autres systèmes lors du Programme Commun de Mesure de Frottement sur Piste d'Envol en Conditions Hivernales. Les tests ont montré qu'à température très basse, -30°C, les conduits d'air comprimé doivent être mieux préparés pour les conditions hivernales car la moindre quantité d'eau dans les conduits gèle, causant une charge moins élevée sur le pneu test. Globalement, les résultats n'ont pas indiqué d'effet de vitesse, mais plutôt une dispersion des valeurs lors des frottements très faibles. Cette dispersion est due aux variations de la charge normale sur le pneu test, à cause des conduits d'air.

Les comparaisons d'ensemble des mesures du SALTAR indiquent que les valeurs de frottement sont faibles si on les compare à l'appareil de référence. Cependant, aucune calibration n'a été faite, car on n'a pu déterminer si les valeurs faibles sont dues à une pression faible de contact ou à une mesure faible avec une pression de contact adéquate. Puisque les données de Norvège n'indiquaient pas ce problème, ces données ont été utilisées pour faire les comparaisons.

La Figure 6 ci-dessous montre la réalisation de tests avec le SALTAR pendant le stage.



Figure 6. Le Véhicule de Iowa DOT à North Bay (Ontario)

7. Les Données du SALTAR en Norvège

Des essais similaires ont été réalisés en Norvège par l'Administration des Routes, au cours desquels le SALTAR et le ROAR ont été comparés. La figure 7 montre que le SALTAR donne des valeurs faibles par rapport au ROAR. Cependant, les valeurs du SALTAR semblent augmenter et diminuer de la même manière que celles du ROAR. Du sable chaud a été répandu sur la première partie du même tronçon de piste, suivi de sable froid placé au milieu du tronçon, et les mesures ont été répétées. La Figure 8 montre le résultat de ces essais et indique clairement que les mesures du SALTAR changent avec le degré de frottement, mais que les valeurs sont faibles. A partir de ces essais, une calibration a été réalisée. Les résultats se trouvent en Figure 9. Cette calibration a été ensuite appliquée aux données des Figure 8 et 9 qui ont alors été retracées pour obtenir les Figures 10 et 11. On estime qu'avec la calibration, le SALTAR mesure de manière satisfaisante.

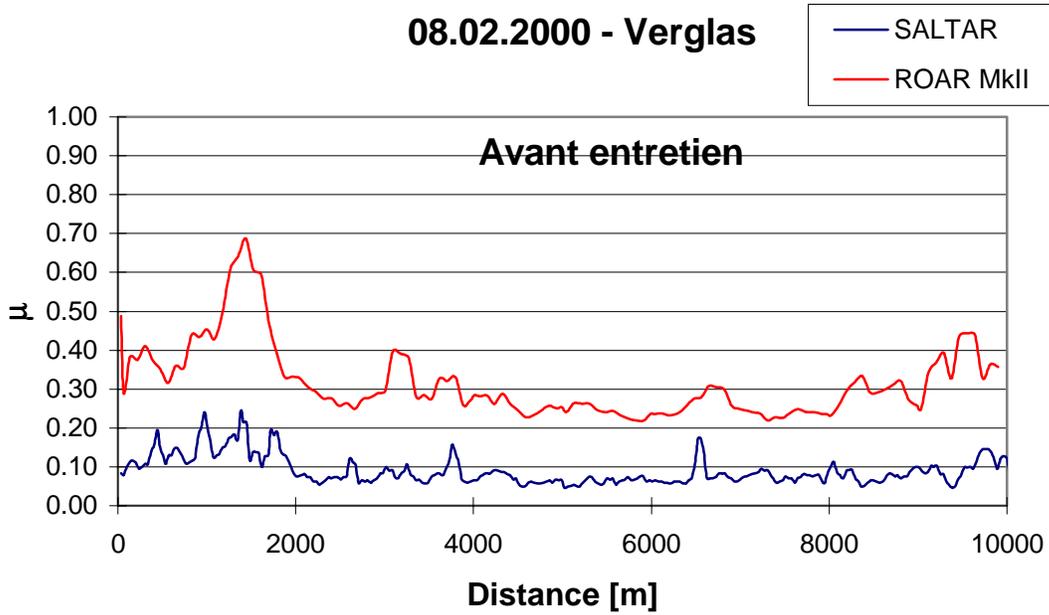


Figure 7. Le frottement mesuré par le SALTAR et le ROAR sur un tronçon verglacé

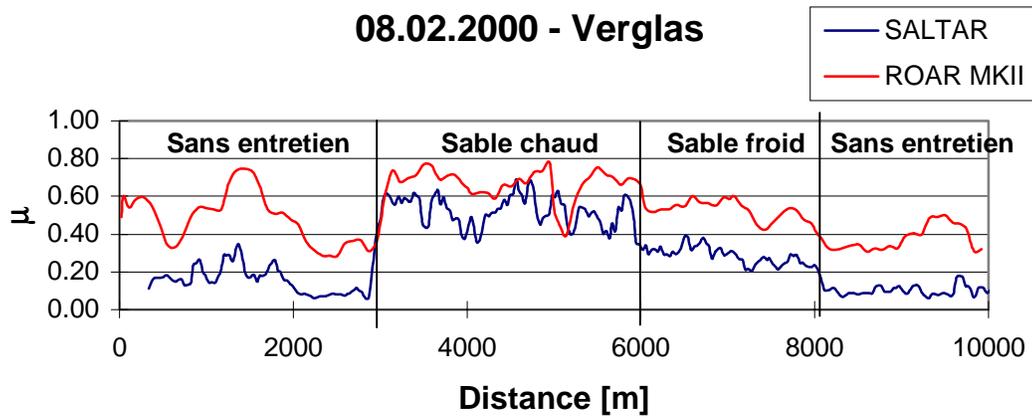


Figure 8. Route verglacée de la Figure 7 recouverte de sable chaud et froid sur les tronçons du milieu

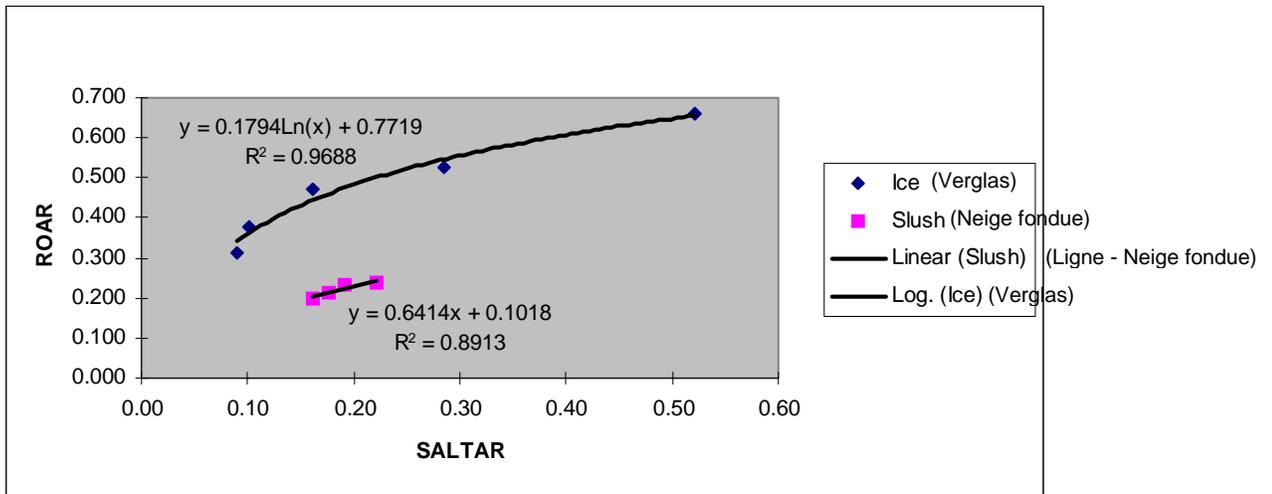


Figure 9. Corrélation entre le SALTAR et ROAR

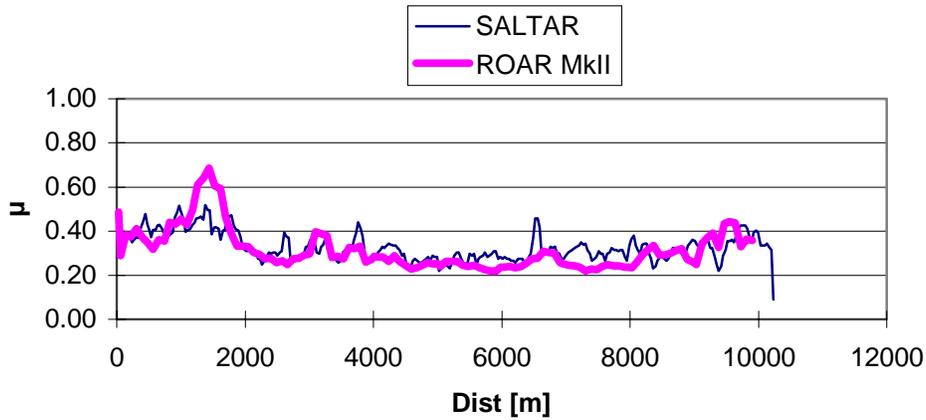


Figure 10: Corrélation appliquée aux données de la Figure 9

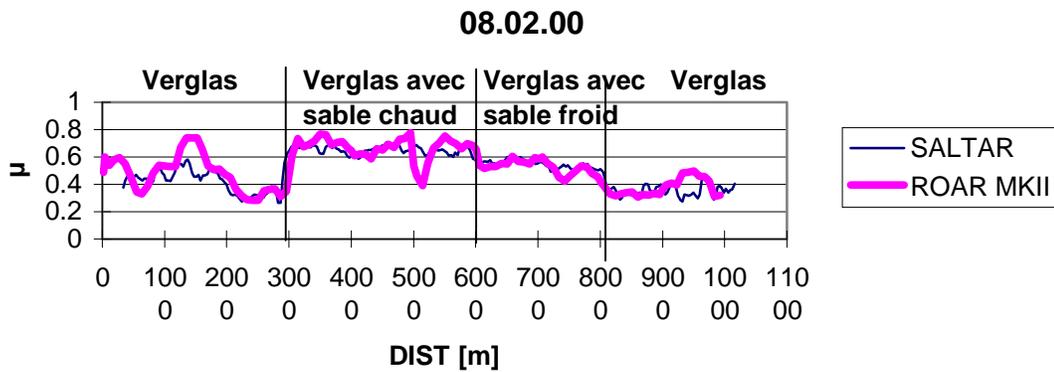


Figure 11: Correlations appliquées à la Figure 10

A partir d'essais à différentes vitesses sur neige tassée, on peut voir en figure 12 qu'une légère augmentation en frottement se produit avec la vitesse. Cette augmentation est loin d'être aussi prononcée que lors des tests de la NASA à Wallops.

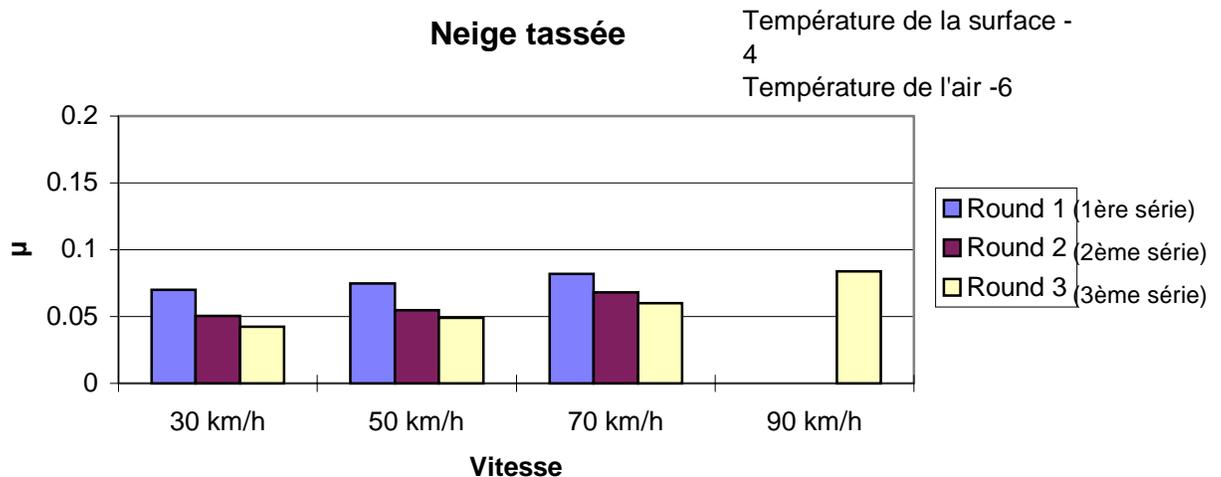


Figure 12. Différentes vitesses sur neige tassée

8. Conclusions

Bien que le SALTAR soit un prototype, il s'est montré capable de donner des niveaux de frottement fiables et s'annonce apt à mesurer le frottement sur les routes en conditions hivernales. Le système de freinage fonctionne selon ses caractéristiques et dans sa globalité, le principe marche bien. Des recherches supplémentaires seront nécessaires et des recommandations sont données ci-dessous:

- Développer un standard ASTM pour le SALTAR.
- Trouver un pneu standard (modèle et fabricant).
- Bien préparer le système d'air comprimé pour l'hiver.
- Développer une méthode de calibration.
- Eliminer la cause des mesures faibles.
- Améliorer la fiabilité des futures modèles.

Références

1. ASTM (1993): "Standard Specification for Special Purpose Smooth-tread Tire, operated on Fixed Braking Slip Continuous Friction Measuring Equipment", Standard No. E1551-93, *American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03*, Philadelphia, PA.
2. Zoltán Radó, *A Study of Road Surface Texture and Its Relationship to Friction*, PhD Thesis, 1994, Penn State University.
3. Wambold et al, *Evaluation of Ground Test Friction Measuring Equipment on Runways and Taxiways Under Winter Conditions*, A Joint Transport Canada/Norsemeter Winter Runway Friction Program Report, January 1996.
4. Fleege, E.J., Wambold, J.C. and Rado, Z., Variable Slip Friction Measurement for Snow and Ice Operations, 4th International Symposium Snow and Ice Control Technology, TRB, Aug. 11-16, 1996 Reno, Nevada.
5. *Concept Highway Maintenance Vehicle, Final Report: Phase One*, April 1997, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
6. ASTM (1997): "Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire, Standard No. E274-97, *American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03*, Philadelphia, PA.
7. Wambold, J. C., Antle, C. E., Henry, J. J., Rado, Z. (1995), "International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements", *Final Report, PIARC* Paris, France.
8. ASTM (1996): "Standard Test Method of Measuring Surface Macrotecture Depth using a Volumetric Technique", Standard No. E965-96, *American Society for Testing and Materials Book of Standards Part 04.03*, Philadelphia, PA.
9. *Concept Highway Maintenance Vehicle, Final Report: Phase Two*, December 1998, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.