

CRITÈRES DE CONCEPTION DES ROUTES EN ZONES DE CONGÈRES

Skuli Thordarson et Harald Norem
Université des Sciences et des Techniques de Norvège (NTNU)
Département d'ingénierie des routes et des voies ferrées
7491 Trondheim, Norvège
Tel: +47 / 73-59-47-10/Fax: +47 / 73-59-70-20
Courriel: thordars@stud.ntnu.no

Résumé

Par vents forts, les congères posent des problèmes sur les routes dans beaucoup de pays au climat hivernal rigoureux. Les coûts de déneigement élevés, la fermeture des routes et les problèmes de sécurité sont les résultats typiques des grandes accumulations de neige et de la mauvaise visibilité le long de bon nombre de routes dans les régions exposées.

Cet article fait état de quelques résultats d'un programme de recherches comprenant des simulations numériques et des observations in situ. Le but de ces recherches est d'approfondir les connaissances sur le comportement des congères sur les routes, mais aussi de développer des critères de conception pour améliorer la construction des routes et autoroutes dans les régions montagneuses et dans les autres régions exposées à des vents forts et à des précipitations neigeuses fréquentes.

L'étude est principalement basée sur la CFD - Computation Fluid Dynamics – (Simulation numérique en mécanique des fluides) et investigations in situ. Les simulations de vents et de congères ont été comparées aux études de couches de neige effectuées sur des routes en Islande et en Norvège. Les résultats ont été utilisés pour lister une série de conseils pour les ingénieurs du génie civil. Un objectif important de cette étude a été d'utiliser la CFD pour établir des relations géométriques qui pourraient s'appliquer aux projets de construction routière. Les résultats présentés ici comprennent des lignes directrices permettant d'évaluer le rendement des zones naturelles de déposition de neige ainsi que la capacité d'équilibre des congères. D'ailleurs, est présenté un exemple de flux tridimensionnel sous une coupe transversale d'une route escarpée. Enfin est aussi présentée une étude théorique sur la performance de différents types de barrières de sécurité dans les zones de congères. Nous concluons que la CFD est un outil utile pour le développement de lignes directrices en matière de génie des routes dans les zones de congères.

1. Introduction

1.1 Origine

Dans certaines régions aux climats hivernaux extrêmes, les problèmes routiers peuvent être nombreux. Quelques problèmes majeurs sont les surfaces rendues glissantes par la glace et la neige, la quantité excessive de neige sur la route due aux précipitations neigeuses et aux congères, ainsi que la visibilité réduite pendant les tempêtes de neige. Une étude financée par l'Union européenne [1] a montré que, dans le Nord de la Scandinavie, plus de la moitié du budget d'entretien des routes est réservé pour la période hivernale. Selon cette étude, seul le coût d'enlèvement de la neige peut représenter jusqu'à 80% du budget d'entretien hivernal.

En ce qui concerne les problèmes dus aux congères, leur impact dépend fortement de la conception la route et de son emplacement par rapport aux paysage environnant et facteurs

climatiques. C'est la raison pour laquelle, dans les zones de congères, un meilleur état des routes peuvent réduire les frais d'entretien, donner un niveau de sécurité plus élevé et permettre un meilleur accès à la circulation.

1.2 Simulations numériques de vent

La méthode numérique CFD (Computational Fluid Dynamics) permet de calculer les courants de vent du terrain adjacent à la route. Sachant les relations entre la distribution de la vitesse du vent et le comportement des congères, les calculs qui en résultent donnent la possibilité d'évaluer la qualité des différentes alternatives de conception. Les problèmes de différentes échelles géométriques peuvent être simulés. De là, on peut analyser à la fois le tracé d'une route dans une zone exposée aux congères et sa coupe transversale. Une utilisation plus poussée de la CFD qui associe la simulation des congères et le flux éolien est appelée modélisation biphasee du flux. Plusieurs chercheurs ont effectué des expériences avec simulation numérique biphasee des congères et de la sédimentation.

L'exactitude de ces modélisations de congères n'a pas encore atteint le niveau nécessaire pour une application en ingénierie. Des améliorations importantes de la méthode ont cependant eu lieu ces dernières années. Les simulations complètes de vent sont devenues plus fidèles et permettent une comparaison qualitative des conditions de formation de congère, sans mettre en question la validité des calculs. Pour cette raison, la présente étude est basée sur des calculs de courants d'air complétés par des observations in situ.

1.3 Objectif

En 1998, un programme d'études dans le cadre d'un doctorat a été entamé à l'Université des Sciences et Techniques de Norvège. Le but de ce programme est d'approfondir les connaissances en matière de construction routière dans les zones de congères et de développer des lignes directrices pouvant s'y appliquer. Le présent article résume quelques sujets abordés et résultats de ce projet. La soutenance du rapport final est prévue pour 2002.

Les études précédentes qui ont été réexaminées dans ce projet sont le travail de Norem [2,3] et de Tabler [4]. Norem a effectué des essais avec sable dans l'eau pour simuler les congères sur la route et il a également présenté des résultats d'observations in situ. Les lignes directrices de Tabler sont principalement basées sur des analyses statistiques de mesures sur site. L'avantage de la présente étude est qu'elle permet de faire une analyse numérique des courants d'air au voisinage des routes pour confirmer les hypothèses de dynamique des fluides issues des études précédentes. Elle permet aussi d'analyser des thèmes qui n'ont pas encore été explorés. Dans cette étude, une méthode commercialisée de modélisation tridimensionnelle a été utilisée, Flow3D (Flow Science, NM USA). La méthode convient bien pour ce type d'applications car les différentes formes géométriques sont facilement intégrées dans le modèle.

2. Méthodologie

2.1 Simulation de vents

Les étapes du processus de simulation sont les suivantes :

1. Intégration dans le modèle de la géométrie du site et de la route.
2. Choix de profil de vent et de conditions limites.
3. Simulations jusqu'à obtention d'une solution stable.
4. Analyse de la distribution de la vitesse du vent et des lignes de courant.

Pour faire la comparaison relative des alternatives de conception, les paramètres géométriques peuvent être changés et les 4 étapes répétées. En ce qui concerne la dernière étape, il convient d'expliquer ici brièvement comment la vitesse du vent et les lignes de courant sont utiles pour interpréter le comportement des congères. Les expériences et la théorie ont montré que la capacité de transport éolien de la neige (flux saturé) est lié à la vitesse du vent par une relation à la puissance trois:

$$Q \approx C(U - U_{th})^3$$

où Q est le taux de dérive exprimé en kg au mètre sur la largeur du flux, U est la vitesse du vent local mesurée à la hauteur de référence et U_{th} est la vitesse de vent au seuil nécessaire à l'initiation du transport de neige. Les constants C et U_{th} dépendent des conditions de la surface de la couche de neige comme sa consistance et sa structure de surface. En supposant que le vent est complètement saturé de particules de neige à un point donné, aucune diminution de la vitesse du vent en aval de ce point ne devrait mener à une accumulation de la neige au sol, puisque la capacité de transport de la neige par le vent diminue par la puissance 3 de la réduction de la vitesse du vent. Plus la vitesse du vent diminue sur une trajectoire donnée le long du flux, plus la sédimentation ou l'accumulation est rapide. Lorsque la sédimentation forme petit à petit une accumulation sur le sol et élève en même temps la surface du sol, la vitesse du vent augmente de nouveau et la sédimentation ralentit. Quand l'équilibre de la surface est atteint, la vitesse du vent est quasiment la même que dans la zone en amont au-dessus de la zone d'initiation de sédimentation. Si le vent n'est pas saturé de neige en cette zone avant la diminution de la vitesse du vent, la sédimentation n'aura pas forcément lieu, car le vent peut avoir encore une capacité supplémentaire pour transporter les particules de neige en aval. Ce concept est confirmé dans la partie 3.2.

Dans une situation de courant tridimensionnel, l'image n'est généralement pas aussi simple. La sédimentation peut alors avoir lieu à des vitesses de vent relativement élevées, car la concentration de neige dans l'air peut énormément différer d'un endroit à l'autre en présence de courant tridimensionnel. Dans ces conditions, les lignes de courants peuvent être très utiles pour comprendre le flux. Les lignes de courants représentent la trajectoire des particules d'un fluide à travers le flux et ils permettent de représenter graphiquement le comportement du flux.

2.2 Les données sur le site

Afin de pouvoir concevoir une route à travers une zone de congères, un minimum de données doivent être connues. Hormis les données topographiques, quelques informations météorologiques sont nécessaires. Le plus important est de savoir quelles directions de vent sont celles qui mettent les plus grandes quantités de neige en suspension. Ces dernières sont celles qui ont les plus grandes vitesses de vent et celles qui apportent le plus de précipitations. Il est important de noter qu'elles ne représentent pas forcément les vents dominants, ni les directions de vent les plus fréquentes dans la zone.

Dans un paysage ouvert, on peut utiliser les données des stations météorologiques à proximité de la zone concernée. D'un autre côté, si la route se situe dans un environnement montagneux et escarpé, il convient parfois d'effectuer des investigations sur site car le relief peut modifier et réorienter le flux éolien de façon considérable. La moyenne totale de précipitations hivernales ou l'épaisseur de neige sur le sol sont aussi importantes. La tracée de la route doit être choisie en fonction de la quantité de neige attendue sur le site.

Pour le but du projet actuel, les informations météorologiques détaillées ont été recueillies sur site au cours des hivers 1999 et 2000. Des stations météorologiques automatiques ont été installées sur la route no 1 à Bolstadarhlidarbrekka dans le nord de l'Islande et sur la route Fv-232 dans la vallée de

Kaperdalen sur l'île de Senja en Norvège du nord. Sur le dernier site, on a aussi pu effectuer des observations détaillées de visibilité de la route pendant les tempêtes de neige. Les résultats de ces recherches sur la visibilité sont présentés dans le rapport final.

3. Résultats

3.1 Généralités

Les conditions requises pour la conception d'une route dans une zone à congères ont précédemment été résumé par Norem [2,3]. La condition principale est d'éviter les dépôts de neige sur la route, de minimiser les risques de transport de neige à travers de la chaussée pour une meilleure visibilité et de faciliter les conditions d'entretien pour la conception choisie. Dans la pratique, la conception de la route sera souvent un compromis entre les coûts de construction, la sécurité, la facilité d'accès et les coûts d'entretien.

Lorsqu'une partie de route déjà existante doit être reconstruite ou modifiée pour cause de problèmes dus à des congères, il faut tout d'abord pouvoir répondre à un certain nombre de questions importantes. Pour cette première étape, la route doit être divisée en une série de sections présentant les mêmes caractéristiques de terrain et de conditions de vent. Pour chaque section, il est important de savoir si le courant va se comporter de façon bidimensionnelle ou tridimensionnelle lorsque la route est exposée au vent dominant créateur de congères. Un exemple de situation bidimensionnel est traité dans la partie 3.2. Sous de telles conditions, la coupe transversale choisie peut convenir de façon satisfaisante pour toute la longueur de la section de route dans le cas où les variations dans la topographie et la direction de la route par rapport au vent sont modérées.

Un exemple de flux tridimensionnel est présenté dans la section 3.3. Lorsque le flux éolien se comporte de façon tridimensionnelle, les problèmes liés à la neige peuvent être rencontrés à des endroits inattendus.

Une autre question importante est de savoir si la route est située dans une région d'érosion de la neige au sol ou si elle est située dans une zone d'accumulation. Il est préférable que des sections les plus longues possibles se situent dans une zone d'érosion, tant que la vitesse de vent en elle-même n'est pas dangereuse pour la circulation. Sous de telles conditions, une coupe transversale de route qui assure un auto-nettoyage de la surface de la route peut être choisie. Cependant, les sections où la neige en suspension est soufflée par-dessus la route sans accumulation de la neige sur la route peuvent présenter des problèmes de visibilité si, en amont, la distance avec neige disponible parcourue par le vent est longue. Les barrières à neige se sont souvent montrées utiles pour améliorer la visibilité dans de telles situations.

Si au contraire, la route doit être placée dans un site naturel d'accumulation, une capacité nécessaire de stockage de la neige accumulée devra être offerte. La capacité de stockage de la neige doit être suffisamment grande pour éviter que la surface d'équilibre de la congère atteigne la route.

3.2 Equilibre de congère bidimensionnel

Sur les terrains montagneux ou escarpés, certaines sections de la route seront inévitablement situées dans des pentes à l'abri du vent. Par conséquent, la route peut être située dans une zone naturelle de sédimentation neigeuse, ce qui peut mener à des dépôts abondants de neige sur la route. Pour ces endroits, il faut pour la conception routière, déterminer le volume hypothétique de neige en dérive et l'équilibre de dérive au sol afin d'éviter les problèmes. Lorsqu'on peut s'attendre à de grosses quantités de neige soufflée, ou lorsqu'on ne dispose pas d'une capacité suffisante de stockage de la neige accumulée, la route devra être placée soit en aval de l'équilibre de congère soit en amont de la zone de dépôt.

Afin de mieux comprendre les conditions de formation de congères dans les pentes descendantes, nous avons simulé le flux éolien sur plusieurs profils de terrain [5]. Nos résultats indiquent que le gradient de vent horizontal à proximité de la surface, dU/dx , donne des informations sur le taux d'accumulation et sur le stade du développement de la congère vers l'équilibre. Un schéma des résultats est présenté dans la figure 1. Le calcul de la vitesse du vent et l'équation dans la partie 2.1 sont utilisées pour dessiner la courbe de capacité relative de transport le long de la surface, Q_{rel} .

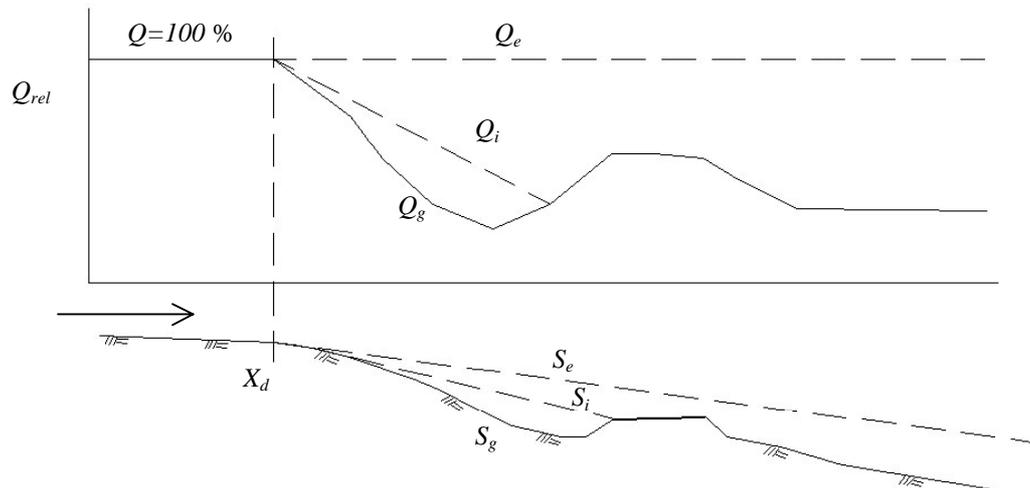


Figure 1. Développement de congère, régime de vent de gauche à droite. La figure en haut est une estimation de la capacité relative de transport et la figure en bas est un exemple d'un profil de terrain typique sur une pente à l'abri du vent avec des surfaces de dérive. Les symboles sont expliqués dans le texte.

En amont (vers la gauche) du point X_d , la vitesse du vent, et donc la capacité de transport, est habituellement constante dans le cas où l'inclinaison du terrain est constant (Figure 1). On peut dire que la valeur de Q_{rel} à X_d représente le taux réel de transport de neige, étant donnée que la décroissance de Q_{rel} en aval de ce point résulte en une accumulation. En d'autres termes, le vent est entièrement saturé par les particules de neige en suspension et ne supportera aucune décroissance de la vitesse sans dépôt de neige sur le sol. Il convient donc de normaliser Q_{rel} vers cette valeur et mettre la capacité de transport à 100% à X_d .

Avant que toute déposition ait lieu, la surface du sol initiale, S_g , donne la courbe Q_{rel} marquée Q_g . Au cours du stade intermédiaire d'accumulation, la surface de neige S_i , la capacité de transport et le taux de dérive tombent conformément à la courbe Q_i . En théorie, la surface de la congère a atteint son maximum ou équilibre, S_e , quand la vitesse du vent ou le taux de dérive ne diminuent plus le long de sa surface. La courbe d'équilibre Q_e est donc constante à la même valeur qu'au point X_d .

Lorsque nous dessinons les pentes de dérive S_i et S_e comme le tangent de l'angle de pente ($dz/dx \times 100\%$) et la pente de la courbe Q_{rel} comme un pourcentage de chute par mètre ($dQ_{rel}/dx \times 100\%$), nos résultats indiquent une relation linéaire entre la pente de Q_i et $(S_i - S_e)$. Ceci est illustré dans la figure 2.

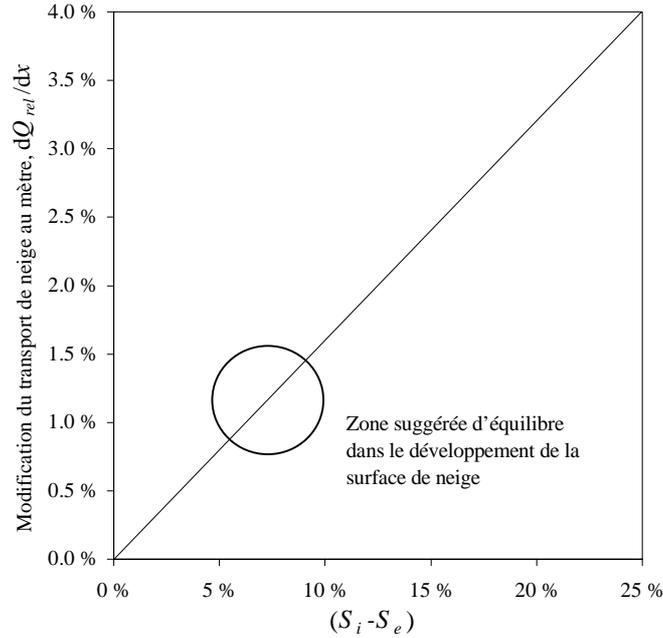


Figure 2. La relation linéaire entre la diminution du taux de transport de neige, Q_{rel} , et la déviation de l'interface de dérive, S_i , depuis la surface théorique d'équilibre, S_e .

Le diagramme de la figure 2 indique que lorsque la surface intermédiaire de pente S_i évolue vers S_e , la baisse du taux de transport de neige descend vers zéro. Un Q_i très incliné indique une importante baisse dans le transport de neige le long de la surface, et la sédimentation de neige sur le sol se produit vite à ce stade. Lorsque la pente de Q_i diminue, le taux pour lequel la neige se dépose descend. Pour cette raison, dans beaucoup de situations pratiques, la surface de neige n'aura pas atteint son maximum théorique, S_e , à la fin de l'hiver. Cela dépendra évidemment des volumes de congères et de la capacité de stockage de la zone de dépôt.

Selon nos mesures in situ et les simulations, le niveau d'équilibre réel dQ_{rel}/dx devrait se situer entre 1 % et 1.5 % par mètre en aval du point initial de formation de congère à X_d (Figure 2). Cela est équivalent à un $(S_i - S_e)$ d'environ 5 % à 10 %. Avant d'appliquer le principe ici présenté, la pente théorique S_e , devra être estimée. Dans beaucoup de situations, S_e , sera une extension directe de la pente de terrain en amont du point X_d , mais devra toute fois être estimé en tenant compte du paysage en amont et en aval de la route.

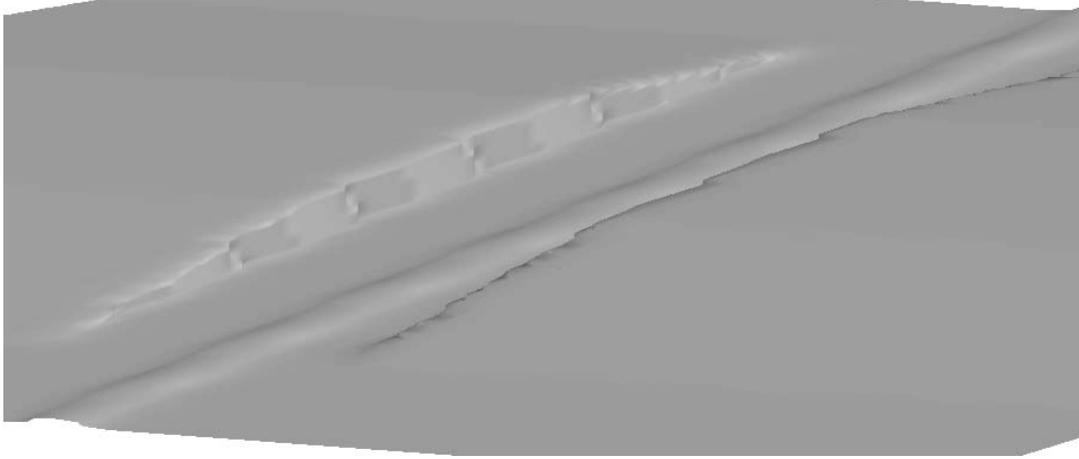
3.3 Tranchées de route à flux tridimensionnel

Les plans inclinés ou tranchées engendrent souvent une forte déflexion du flux latéral ou même un flux séparé. Le flux qui en résulte doit être décrit de façon tridimensionnelle. Un problème fréquemment rencontré dans les tranchées est la forte accumulation de particules de neige dans l'air, ce qui donne une mauvaise visibilité et des dépôts de neige sur la route.

Pour illustrer ce phénomène, nous présentons les résultats de simulations de flux pour deux variantes de conceptions de tranchées. Il s'agit d'une tranchée de 300 m de long à travers une crête simple qui atteint une hauteur maximale de 7 m à mi-chemin de la route. L'exemple reflète une situation réelle trouvée sur le site de la route n° 1 près du fleuve de Thjorsa dans le sud de l'Islande où un nouveau tracé de route est prévu. Les deux alternatives sont montrées dans la figure 3. Les données sur la vitesse de distribution du vent au niveau du sol ainsi que les lignes de courants correspondant à

ces deux exemples sont présentées dans la figure 4. L'angle d'incidence du vent a été choisi à 95° ou presque perpendiculairement à la route.

(a)



(b)

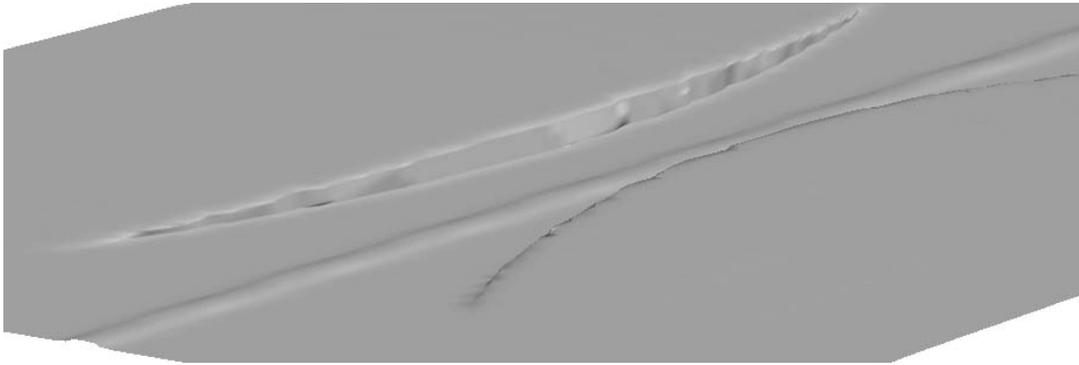
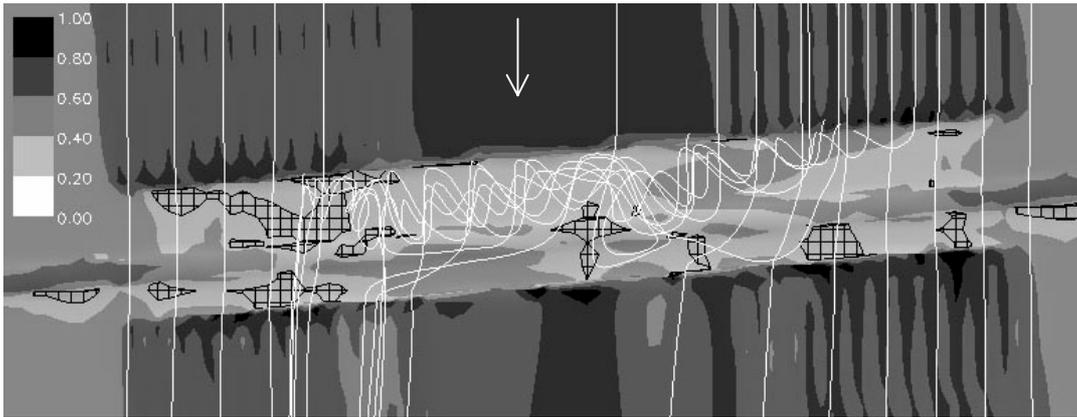


Figure 3. Sont examinées dans le rapport, deux alternatives de conception de tranchées traversant un terrain à crête. Alternative (a) est une tranchée conventionnelle en ligne droite, (b) est une tranchée en forme d'arc sur le plan horizontal, c'est à dire un élargissement du fossé vers les deux extrémités.

(a)



(b)

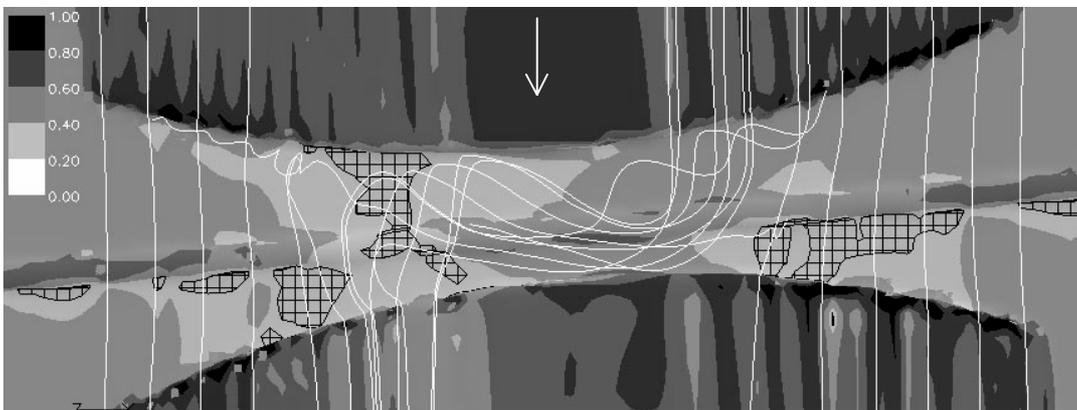


Figure 4. Vitesse relative de distribution du vent et lignes de courant. La direction du vent est indiquée par la flèche. Les zones indiquées par des carrés noirs désignent la vitesse la plus basse, 10 % de la valeur de référence. Les lignes de courant traversent la route à 1,5 m de la surface, c'est à dire au niveau des yeux des conducteurs.

Les lignes de courant dans la figure 4 révèlent la déflexion du flux dans le tourbillon sous la face de la tranchée et son déplacement le long de la route. La principale différence entre les alternatives (a) et (b) est que l'alternative (b) présente une vitesse plus élevée et une circulation d'air plus limitée au-dessus de la route que l'alternative (a). Les simulations de la configuration où l'angle d'incidence du vent est à 30 degrés par rapport à la route montrent une différence encore plus importante quant à la probabilité d'apparition de problèmes de neige, ce-ci en faveur de l'alternative (b).

3.4 Glissières de sécurité

Les glissières de sécurité sur les bords de route sont réputées pour causer des problèmes de congère. L'utilisation de glissières de sécurité est évitée dans de nombreuses régions. Elles sont parfois remplacées par des glissières de sécurité particulières.

La résistance à l'air ou la force de traînée de la glissière nous renseigne sur sa tendance à ramasser de la neige et donc à causer des problèmes de visibilité. La force de traînée qu'un corps exerce sur le flux est exprimé comme :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_D$$

où F_D est la force de la traînée, ρ est la densité de l'air, U est la vitesse du flux, A est la zone frontale projeté du corps et C_D est le coefficient de traînée associé à la forme du corps.

Par rapport aux profils à faible traînée, les profils dont la traînée est élevée engendrent plus de turbulence dans le flux et réduit également la vitesse du vent. Ils poseront, de ce fait, plus de problèmes de neige sur la route. Une glissière de sécurité destinée à l'utilisation dans les zones de congères, doit présenter un profil à faible traînée et doit également être résistante à la contrainte des bancs de neige avançant et aux forces exercées par les équipements de déneigement.

Une comparaison théorique d'un choix de profils de glissière de sécurité est présentée dans le Tableau 1. La coupe transversale du profil de glissière de sécurité de référence est circulaire. Les formes ovales du tableau sont dimensionnées de façon à obtenir la même résistance mécanique dans la direction horizontale du profil (le moment d'inertie à l'axe vertical, I_z , divisé par la moitié de la largeur du profil).

Tableau 1. Exemples avec différentes formes du profil de glissière de sécurité. La résistance du profil est calculée sur la base de coupes transversales solides, en bois par exemple.

Forme de profil	Rapport de longueur b/h	C_D	Résistance de profil $\frac{I_z}{\frac{1}{2}b}$ (mm ³)/10 ⁵	Largeur de profil b (mm)	Hauteur de profil h (mm)	Relative F_D ($C_D \cdot \frac{h}{200}$)
Circulaire	1.0	1.0	7.85	200	200	100%
Ovale	1.5	0.75	7.84	229	153	57%
Ovale	2.0	0.55	7.85	252	126	35%

La comparaison montre que la résistance à l'air, et donc la capacité de ramassage de neige de la glissière de sécurité, peut être diminuée de façon radicale en choisissant une forme ovale à la place d'une fore circulaire, sans pour autant diminuer la résistance du profil à l'impact horizontal des voitures. Une glissière de sécurité conventionnelle en forme en W de 300 m de hauteur devrait donner une force de traînée d'environ 300% comparé aux formes du tableau 1.

Les simulations numériques de courants de vent ont été effectuées dans la présente étude pour analyser les effets sur le vent des glissières de sécurité à profils différents. Les résultats conviennent bien comme base de comparaison pour les différentes formes de profils. Pour une faire une comparaison encore plus fondée, il convient cependant d'effectuer des essais à en vraie grandeur dans la nature.

4. Conclusions et travaux futures

Cet article introduit l'utilisation de la Computational Fluid Dynamics (simulation numérique en mécanique des fluides) pour l'analyse des congères sur les routes. Nous estimons que la simulation numérique des flux éoliens est une méthode utile pour obtenir des nouvelles connaissances dans le domaine des congères sur les routes et pour développer des lignes directrices pour les ingénieurs en génie civil.

Les résultats pratiques présentés dans le texte traitent de la déposition de congères sur les pentes à l'abri du vent et des flux tridimensionnels dans des sections de route escarpées et donne une évaluation des profils de glissières de sécurité. Nous avons introduit pour l'accumulation de neige sur les pentes à l'abri du vent, le concept de l'équilibre théorique de la surface de congère comme valeur de

référence pour l'évaluation de la surface de neige la plus propice lors du choix de section de route transversale et de terrain adjacent. Les exemples de conception de tranchées indiquent que l'élargissement du fossé vers les extrémités du tracé laisse passer la neige en suspension avec moins de génération de turbulence, ce qui réduit également le potentiel de formation de zones de sédimentation. Finalement est présenté quelques considérations théoriques concernant la résistance à l'air des profils de glissière de sécurité. Une forme ovale du profil avec un rapport de longueur (largeur/hauteur) égal à 2 peut être considéré comme un profil prometteur pour les essais complémentaires.

Le rapport final dont la publication est prévue pour 2002 contiendra des résultats plus détaillés sur les points traités ici ainsi que d'autres résultats d'essais sur les congères dans le domaine du génie de la route. Les effets de l'inclinaison et de la hauteur des remblais ainsi que l'effet de l'inclinaison transversale donnée au profil en travers de la chaussée (dévers) figurent parmi les autres sujets abordés dans le rapport final.

5. Remerciements

Le projet de doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Norvège est financé par le projet européen Roadex, un sous-projet du programme Northern Periphery, et par les autorités routières islandaises et norvégiennes et par l'Association routière des pays nordiques.

6. Références

- [1] Roadex, 2000. Subproject B, *Winter Maintenance*. EU Northern periphery program.
- [2] Norem, H. 1975. *Designing highways situated in areas of drifting snow*. Draft translation 503. Hanover, New Hampshire: CRREL.
- [3] Norem, H. 1994. *Snow Engineering for Roads*. Handbook no. 174. Oslo: Norwegian Public Road Administration, Road Research Laboratory.
- [4] Tabler, R.D. 1994. *Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow*. SHRP-H-381. Washington, DC: National Research Council.
- [5] Thordarson, S. & Norem, H. 2000. Simulation of two-dimensional wind flow and snow drifting applications for roads, Part I & II. In Hjorth-Hansen et al. (ed.), *Snow Engineering: Recent Advances and Development*. Proceedings of the 4th International Conference on Snow Engineering. A.A Balkema, Rotterdam.