

INTEGRATION DES MODELES NUMERIQUES DE VENT ET DE TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT AU SEIN D'UN SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES VIABILITE HIVERNALE : UN OUTIL POUR L'INGENIERIE

Florence Naaim-Bouvet, Mohamed Naaim and Jean-Charles Français

Division Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches

Cemagref

2 rue de la papeterie

BP 76

38402 Saint-Martin d'Hères

TEL. 33-4-76-27-27-09/FAX. 33-4-76-51-38-03 / E-mail : florence.naaim@cemagref.fr

1. Résumé

Les problèmes de formation de congères concernent de nombreuses régions en France et plus particulièrement le massif central. En perturbant le trafic, le transport de neige par le vent peut avoir un impact économique significatif. Cet article présente donc le prototype d'un outil destiné à l'ingénierie et qui permet de localiser les risques de formation de congères sur les voies de communications : il s'agit de deux modèles numériques de vent et de transport éolien de la neige, intégrés au sein d'un Système d'Information Géographique, et qui sont donc d'une utilisation aisée par les ingénieurs responsables de la gestion et de la conception des routes. Afin de réduire le temps de calcul, le vent tridimensionnel est calculé sur un large domaine incluant la route alors que le modèle de transport de neige bidimensionnel n'est utilisé que sur certains profils en travers identifiés comme étant à risques.

Après une présentation générale du contexte, cet article décrit successivement :

- Les modèles numériques utilisés,
- Leur intégration au sein d'un SIG,
- Un exemple d'application sur l'autoroute A 75.

2. Introduction

Le transport de la neige par le vent est responsable d'importants problèmes de sécurité dans les zones de montagnes. La formation de corniches et de plaques à vent augmentent le risque d'avalanches. Sur les routes et autoroutes, la formation de congères et la perte de visibilité durant le blizzard gênent considérablement la conduite et augmentent le risque d'accident. Les responsables du déneigement et de la sécurité des voies de communications ont donc besoin d'un outil permettant l'analyse du risque et la localisation des zones potentiellement touchées par la formation de congères.

Un premier outil opérationnel, uniquement basé sur des connaissances expertes, a été conçu au Cemagref il y a une dizaine d'années. Mais grâce au développement des moyens de calcul et des modèles numériques, notre équipe a récemment mis au point un outil presque entièrement automatique permettant de répondre au problème présenté : en combinant modèles numériques de vent et transport de neige, et un Système d'Informations Géographiques, il est possible maintenant de localiser les profils à risques et de visualiser la forme des congères.

3. Approche basée sur la connaissance experte : détermination d'un indice de risques

Jusqu'à une période récente, les enquêtes de terrain ont constitué la méthode principale de cartographie des congères, contribuant grandement à la gestion du risque. Puis Tabler (1975) a proposé une méthode statistique permettant de déterminer la forme des congères en fonction des pentes du terrain. Dans les années quatre-vingt-dix, Brugnot (1995) développa un système basé sur les connaissances expertes et permettant de déterminer sur un tracé routier, les profils en travers potentiellement touchés par les congères. Les données d'entrée nécessaires étaient les suivantes : altitude du terrain naturel, altitude du projet, exposition, orientation par rapport au vent dominant, pente, description des zones d'emprise, type de profil en travers.

Pour chaque profil en travers, le « système expert » détermine un indice de risque variant de 1 à 100 après avoir calculé pour chaque paramètre d'entrée un indice partiel (voir table 1).

| N° de profil | Distance à partir de l'origine | Altitude | | Hauteur talus (m) | Pente | Orientation | Zone d'emprise | Vent dominant | Orientation | Altitude | Type de profil | Pente | Orientation | Zone d'emprise | Exposition | Indice de risque |
|--------------|--------------------------------|----------|--------|-------------------|-------|-------------|----------------|---------------|-------------|----------|----------------|-------|-------------|----------------|------------|------------------|
| | | TN | projet | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 660,00 | 887,93 | 886,96 | 0,97 | 0,013 | N | ao | 135 | 11 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,62 | 93 |
| 2 | 690,00 | 887,68 | 886,59 | 1,09 | 0,015 | N | ao | 135 | 11 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,62 | 93 |
| 3 | 720,00 | 887,93 | 886,18 | 1,75 | 0,016 | N | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,80 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,62 | 78 |
| 4 | 750,00 | 887,95 | 885,70 | 2,25 | 0,017 | N | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,80 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,62 | 78 |
| 5 | 780,00 | 887,98 | 885,18 | 2,80 | 0,019 | N | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,80 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,62 | 78 |
| 6 | 810,00 | 887,75 | 884,60 | 3,15 | 0,021 | S | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,62 | 49 |
| 7 | 840,00 | 887,47 | 883,97 | 3,50 | 0,023 | S | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,62 | 49 |
| 8 | 870,00 | 887,06 | 883,29 | 3,77 | 0,024 | S | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,62 | 49 |
| 9 | 900,00 | 886,51 | 882,56 | 3,95 | 0,026 | S | ao | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,62 | 49 |
| 10 | 930,00 | 885,85 | 881,77 | 4,08 | 0,028 | S | fd1 | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,62 | 12 |
| 11 | 960,00 | 885,07 | 880,93 | 4,14 | 0,030 | S | fd1 | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,62 | 13 |
| 12 | 990,00 | 884,21 | 880,03 | 4,18 | 0,031 | S | fd1 | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,62 | 13 |
| 13 | 1008,46 | 883,65 | 879,46 | 4,19 | 0,032 | S | | 135 | 11 | 1,00 | 0,50 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 0,62 | 13 |

Tableau 1 : Exemple de détermination d'indice de risques global à partir des indices de risques partiels (ao=champs, fd1= forêt dense) (Brugnot, 1995)

Les paramètres d'entrée du système sont déterminés à partir des cartes et plans fournis par le projeteur, des mesures issues des centrales météorologiques ou d'une enquête lorsque les précédentes données ne sont pas disponibles, et d'une description précise de la végétation sur les zones d'emprise.

4. Approche basée sur l'intégration de modèles numériques au sein d'un SIG

La méthodologie présentée dans le précédent paragraphe n'est pas automatisée et est donc longue et fastidieuse, d'où l'intérêt de regrouper l'ensemble des informations sous un même support géo-référencé. Par ailleurs, il semble intéressant d'y adjoindre les résultats des modélisations numériques du vent et du transport de neige par le vent qui ont été développées au Cemagref ces dernières années. L'utilisation de systèmes d'informations géographiques (ou SIG) semble donc être la solution.

Un système d'Information Géographique (SIG) est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser de nombreux phénomènes. Les SIG offrent de multiples possibilités de bases de données et ce, au travers de la visualisation et de l'analyse géographique, propres aux cartes. Ces capacités spécifiques en font un outil accessible à un public très large et s'adressant à une très grande variété d'applications.

De nombreux modèles numériques ont été développés, y compris au Cemagref, afin de simuler le vent et le transport de neige par le vent : ils permettent de reproduire les expériences en laboratoire et les mesures in situ de façon tout à fait correcte. On peut ainsi prévoir la direction et l'intensité du vent, la forme de la congère en connaissant le vent synoptique, la topographie et le manteau neigeux.

Jusqu'alors, il n'y a eu aucune tentative pour combiner l'utilisation des modèles numériques et des SIG pour réaliser une cartographie des congères. Conscient de l'intérêt de cette association, nous avons réalisé une première étude afin de tester ses potentiels. Nous avons ainsi conçu un outil, nommé

OLRIC, dans un environnement SIG (*Arcview et Spatial Analyst*). Cet outil vise à regrouper l'ensemble des données disponibles, et à faciliter la localisation probable de congères à l'aide du modèle numérique de vent ARIEL et du modèle numérique de transport éolien de la neige NEMO. Il fonctionne sous forme d'échelles imbriquées : il permet tout d'abord de localiser les zones à risques sur l'ensemble du tracé grâce au modèle de vent, puis d'affiner l'étude en déterminant la forme de la congère au niveau d'un profil en travers grâce au modèle de transport de neige.

4.1 Description succincte des modèles numériques

4.1.1 Modélisation numérique du vent en terrain complexe : ARIEL

Le but du modèle est de déterminer le vent au sol connaissant le vent en altitude à l'échelle du massif. Différentes hypothèses sont adoptées. L'air est considéré comme un gaz parfait polytropic, sec et compressible et comme un fluide newtonien. Nous n'adoptons pas l'hypothèse d'anélasticité (*comme cela est habituellement effectué pour beaucoup de modèles météorologiques existants*), qui permet de considérer l'air comme incompressible et de ne prendre en compte sa compressibilité que par l'intermédiaire du modèle de Boussinesq. La modélisation développée est basée sur les lois de conservations de la mécanique des milieux continus. La fermeture est assurée par le modèle $k-\epsilon$, recommandé pour la simulation de la couche limite turbulente. Les propriétés de la turbulence sont donc représentées par les quantités k et ϵ . Nous avons aussi implémenté un modèle de turbulence de type Smagorinsky utilisé dans les "Large Eddy simulation" (*LES*).

Dans un modèle de simulation d'écoulements atmosphériques, il est très important de bien modéliser la zone proche des parois. C'est là que se produisent les échanges de quantité de mouvement et de chaleur qui conditionnent le comportement des basses couches de l'atmosphère. Dans notre cas, cette couche est modélisée par une loi logarithmique, solution d'une couche limite établie caractérisée par une vitesse turbulente et une rugosité traduisant l'état de surface du sol. En ce qui concerne les quantités turbulentes, l'hypothèse principale consiste à supposer la turbulence en équilibre local dans la couche de surface, ce qui peut se traduire par l'égalité de la production et de la dissipation.

La maquette de chaque site est introduite sous la forme d'un modèle numérique du terrain. Pour chaque maille une estimation de la rugosité est faite à partir de la table de Panoffsky et Dutton (*1984*) qui permet d'estimer le coefficient de la rugosité en fonction du couvert du sol. Au niveau du sol, on décompose cette grille modèle numérique du terrain en triangles et/ou en quadrangles.

A partir de ce maillage, on détermine un certain nombre de couches superposées couvrant le volume dans lequel on cherche à déterminer le champ de vent. Ce volume est en général égal au volume compris entre le sol et une altitude pour laquelle on estime que le vent n'est plus perturbé par l'orographie et qui correspond au vent synoptique (*environ 5000 m*). Les altitudes des points intermédiaires sont calculées par une interpolation entre le sol et le sommet du domaine de façon à avoir une variation croissante du pas d'espace en z , ce qui permet d'avoir des mailles fines au niveau du sol où les échanges sont intenses et des mailles plus larges en altitude. On réalise une structure de données (*topologie*) de type éléments finis complétée par les éléments voisins et les sections voisines de chaque élément.

Le système d'équations est écrit sous sa forme conservative. Le schéma numérique utilisé, basé sur la technique des volumes finis, est du second ordre en espace et du premier ordre en temps.

Cinq types de conditions aux limites sont traités. La première concerne le cas de la couche de surface où l'écoulement est supposé être une couche limite parallèle à la pente. Les échanges d'énergie thermique (*albédo*) ne sont pas pris en compte par la modélisation. Le deuxième type de conditions aux limites traite le cas des parois verticales latérales qui sont considérées comme des conditions de réflexion parfaite sans frottement. La condition à la limite haute est une condition de sortie libre avec un traitement particulier au niveau de la pression appelé condition à la limite absorbante. La quatrième concerne l'entrée de l'écoulement considéré comme une couche limite représentée par un profil logarithmique et une pression qui est déterminée par la résolution d'un demi - problème de Riemann. La dernière est la sortie du domaine où une condition de sortie libre est imposée.

Après sa construction, le modèle numérique a été comparé avec succès à différentes solutions théoriques. Il a ensuite été testé, de façon satisfaisante, sur des solutions analytiques de type « tube à choc » et « onde de relief » en situation thermique stable. La phase test suivante a consisté à comparer les résultats issus de la modélisation numérique avec les mesures de la colline d'Askervein (*54 points de mesures dont plusieurs mâts de 50 mètres avec mesure du vent moyen et de la turbulence pendant 3 ans*) publiées par Teunissen et al (1987). Le modèle prédit assez finement le champ des vitesses moyennes. Quant aux grandeurs turbulentes, le modèle est moins performant. L'imprécision sur la prédiction des grandeurs turbulentes dans la zone de sillage de la colline est de l'ordre de 20% (*voir figures 1 et 2*).

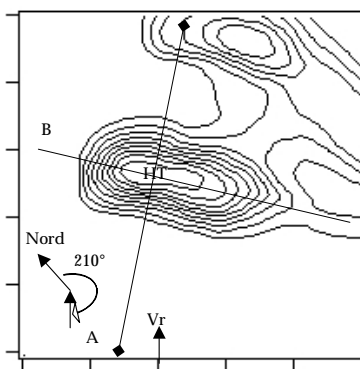


Figure 1 : Schéma des caractéristiques topographiques (colline d'Askervein) correspondant aux observations utilisées pour le test du modèle.

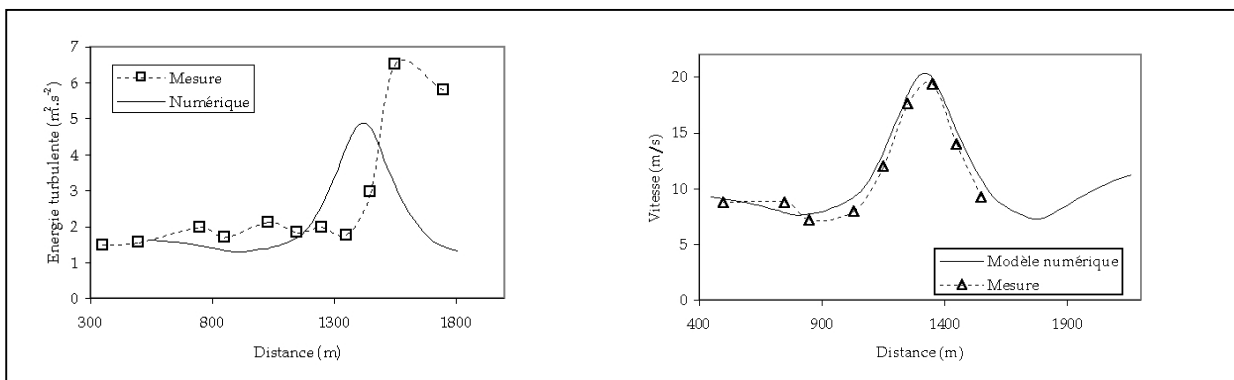


Figure 2 : Modifications de la vitesse et de l'énergie turbulente de l'écoulement le long de la ligne A

Ce modèle, développé initialement pour le transport de neige par le vent, permet d'autres applications. Il est ainsi possible de prédire, à partir de la donnée synoptique, le vent local en

montagne, et de cartographier les zones exposées aux vents forts. C'est d'ailleurs dans ce sens qu'il a été utilisé pour reconstituer les scénarios de tempêtes passées dans la combe de Savoie (73) et dans la vallée de la Maurienne (73) (Naaim et al, 1996)

4.1.2 Modélisation numérique du transport de la neige par le vent : NEMO

Après une analyse approfondie des mécanismes de l'érosion, du transport et du dépôt de la neige par le vent, l'analyse des différents modèles numériques existants, et la mise en évidence des limites de leurs hypothèses et leurs formulations, nous avons construit une modélisation numérique nouvelle du transport éolien (Naaim et al, 1998), en proposant un modèle physique pertinent pour chaque mécanisme et une formulation mathématique adéquate. Nous avons décomposé la couche de transport en deux zones : la couche de suspension et la couche de saltation. La couche de suspension est décrite par les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement écrites en variables Eulériennes pour la phase solide et pour la phase gazeuse. L'interaction entre ces deux phases est prise en compte par l'intermédiaire de la force de traînée d'une particule dans un écoulement turbulent. La turbulence, quant à elle, est modélisée par un modèle de type k- ϵ dans lequel une réduction de la turbulence en fonction de la concentration est introduite. La diffusion turbulente de la phase solide est considérée plus forte que la diffusion turbulente de la quantité de mouvement de la phase gazeuse. Ceci est pris en compte par le biais d'un nombre de Schmidt inférieur à un et dont la valeur est estimée à 0,6 (Naaim et al, 1995) pour les particules de neige. La couche de saltation correspond à la couche immédiatement en contact avec le manteau neigeux. Dans notre modèle, elle est décrite par une concentration et deux vitesses turbulentes (pour la phase solide et pour la phase gazeuse). Un modèle d'évolution de ces deux vitesses en fonction de la concentration est proposé. La couche de saltation est considérée comme la limite inférieure de la couche de suspension. Les échanges entre ces deux couches sont déterminés à partir du bilan entre le flux de sédimentation et le flux de diffusion. Les échanges entre la couche de saltation et le manteau neigeux sont décrits par un modèle d'érosion / dépôt qui intègre à la fois les effets de l'entraînement aérodynamique et les effets d'entraînement par impact. Les équations du modèle global ainsi construit sont résolues par une technique de volumes finis appliquée à un maillage de type éléments finis déstructurés.

Afin de valider chaque partie du modèle nous avons réalisé des expériences spécifiques en soufflerie. Ainsi les accumulations générées derrière des barrières à neige ont été étudiées en soufflerie et ont été reproduites numériquement. Les résultats obtenus (voir figure 3) sont satisfaisants.

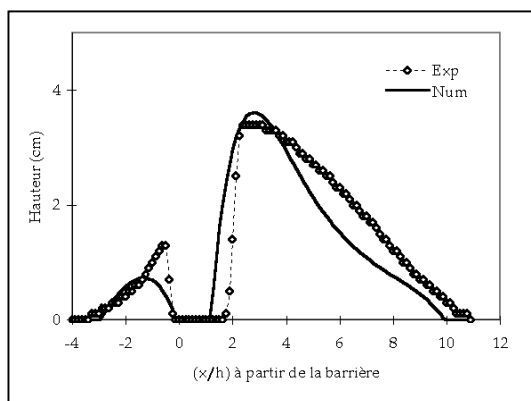


Figure 3 : Comparaison de la forme d'une congère générée par une barrière à neige en soufflerie et par modélisation numérique

D'autres expérimentations sont actuellement en cours sur le site expérimental du Col du Lac Blanc (Michaux et al, 2001) afin de tester le modèle numérique en grandeur réelle.

4.2 OLRIC : Principe de fonctionnement

Pour pouvoir tirer profit des modèles qui ont été développés, il faut pouvoir les alimenter avec des données précises et synthétiser la grande quantité de résultats obtenus. Pour cela, nous avons développé différentes routines au sein du SIG pour 1) préparer des données géoréférencées (comme un modèle numérique de terrain), 2) spécifier les entrées du modèles de vent, 3) visualiser les résultats du modèles de vent, 4) déterminer les zones à risques, 5) déterminer les formes des congères sur les zones à risques, toutes ces fonctions étant pilotées par la même interface graphique.

4.2.1 Gestion des données d'entrée

Les modèles numériques permettent de résoudre des équations sur une topographie complexe à condition de disposer de données détaillées. Il va sans dire que les résultats seront d'autant plus fiables que la topographie est précise. Les modèles numériques de terrain (ou MNT) officiellement disponibles dans la communauté européenne sont suffisamment précis pour être utilisés à des fins de calcul numérique de vent. Ils ont typiquement une résolution spatiale horizontale de 100 m. Cette résolution reste cependant insuffisante pour les modèles numériques de transport de neige. Dans ce cas, il faut avoir accès à un MNT représentant plus précisément le profil en long et en travers de la route étudiée.

L'interface utilisateur développée permet non seulement d'importer une MNT classique mais aussi les profils en long et en travers importés des logiciels de conception des routes (type PISTE +). Les rugosités sont déterminées à partir des cartes de végétation.

4.2.2 A l'échelle régionale : localisation des zones soumises au risque de congères

La localisation des risques de congères est intimement liée au facteur vent. Or le vent possède une circulation au sol très complexe en zone de relief. Il faut donc être capable de prévoir les orientations au sol à partir d'une direction générale de l'écoulement. Le modèle numérique de vent ARIEL permet d'obtenir l'ensemble de ces directions au sol à partir d'une direction de vent synoptique. Connaissant la direction et l'intensité des vents au sol ainsi que l'orientation du profil en travers, on pourra déterminer les zones sujettes à la formation de congères. Le tableau 2 synthétise le fonctionnement de OLRIC à grande échelle.

| Données d'entrée géoréférencées | Conditions aux limites | Modèle numérique utilisé | Résultats |
|---|---------------------------|--------------------------|--|
| Topographie Rugosités Profils routier en long | Roses des vents régionale | Modèle numérique ARIEL | Présentation des zones à risque sous forme de cartes |

Tableau 2 : Fonctionnement à grande échelle

L'objectif d'OLRIC est de mettre en place une sélection semi-automatique des zones à risques à partir des résultats du modèle de vent à travers divers critères de sélection que sont la largeur de la zone d'emprise, la vitesse et la direction du vent.

Critère géographique

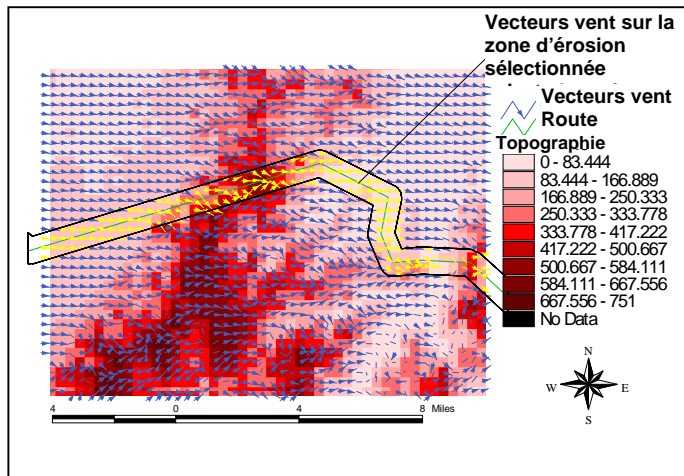


Figure 4 : Sélection automatique des vecteurs vent sur la zone d'érosion

Tout d'abord il est évident que la carte de l'ensemble des vecteurs vent n'est pas nécessaire car seule la zone de reprise de la neige aux abords du profil routier a une influence sur la formation des congères (*ordre de grandeur : une centaine de mètres au vent de la chaussée*). Notre critère géographique permet de sélectionner la zone proche de la route, l'utilisateur se voyant proposer une largeur de sélection qu'il peut éventuellement modifier.

Critère d'intensité du vent

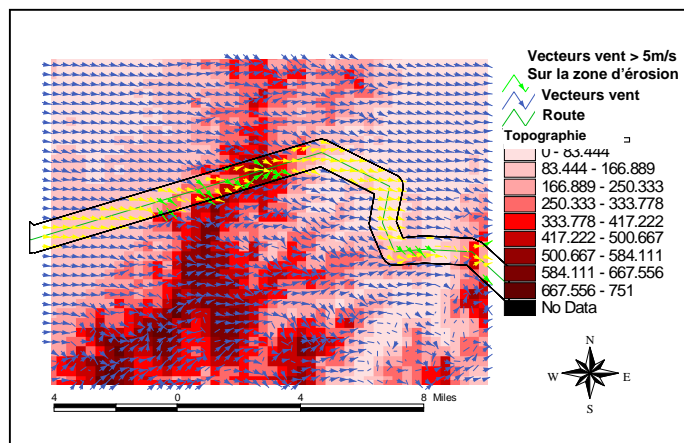


Figure 5 : Sélection automatique des vecteurs vent dépassant une valeur seuil

Le transport de neige par le vent se produit à partir d'une vitesse de vent seuil qui dépend de la qualité de la neige. En choisissant un seuil, on peut donc affiner la sélection initiale.

Critère d'orthogonalité à la route

Le risque de formation de congères est maximal pour un vecteur vent perpendiculaire à l'axe de la route. Ce risque décroît pour finalement s'annuler lorsque le vecteur vent est parallèle à l'axe de la route. On considère ainsi que le risque reste important pour un angle entre l'axe de la route et la direction du vent dominant compris entre 45° et 90° . Les vecteurs concernés sont donc sélectionnés automatiquement (*voir figure 6*). L'utilisation d'OLRIC à grande échelle permet ainsi de localiser les zones susceptibles d'être soumises à un risque de formation de congères.

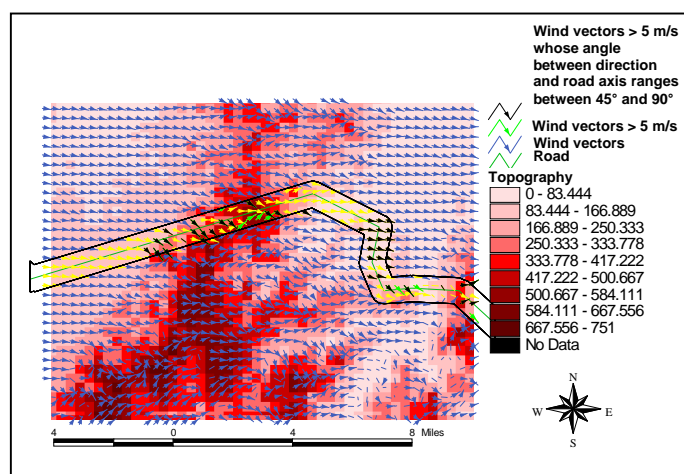


Figure 6 : Critère d'orthogonalité à la route

4.2.3 A l'échelle locale : détermination de la forme des congères

A l'aide du fonctionnement à grande échelle nous avons pu restreindre la zone d'étude. Nous pouvons désormais raisonner à petite échelle afin de déterminer précisément la forme des congères. Le tableau 3 synthétise le fonctionnement d' OLRIC à petite échelle.

| Données d'entrée géoréférencées | Conditions aux limites | Modèle numérique utilisé | Résultats |
|---|---|--|---|
| Profils routiers en travers identifiés comme étant à risques (<i>fonctionnement grande échelle</i>) | Vent (<i>direction intensité</i>) déterminé dans la phase précédente (<i>fonctionnement grande échelle</i>) | Modèle numérique NEMO Bibliothèque de scénarios | Visualisation des formes des congères sur les profils en travers considérés |

Tableau 3 : Fonctionnement d'OLRIC à petite échelle

L'utilisateur sélectionne directement à l'écran les profils en travers identifiés comme étant à risques. Dès lors, deux possibilités s'offrent à lui :

- utiliser une bibliothèque pour les cas les plus fréquents (*profil en déblai, en remblai ou mixte avec 2 ou 4 voies et des talus d'une pente 3/2 de 1, 2,4 ou 8 mètres*). Ces résultats disponibles dans la bibliothèque proviennent de calculs précédents obtenus grâce au modèle NEMO.
- utiliser directement NEMO pour les cas plus inhabituels : le temps de calcul sur un PC reste important ; c'est pourquoi cette dernière possibilité est réservée aux cas complexes. Ils correspondent typiquement à des profils en travers avec des pentes douces généralement recommandées par les paysagistes ou au contraire à des pentes très raides du fait de la géologie.

La figure 7 résume le fonctionnement d'OLRIC.

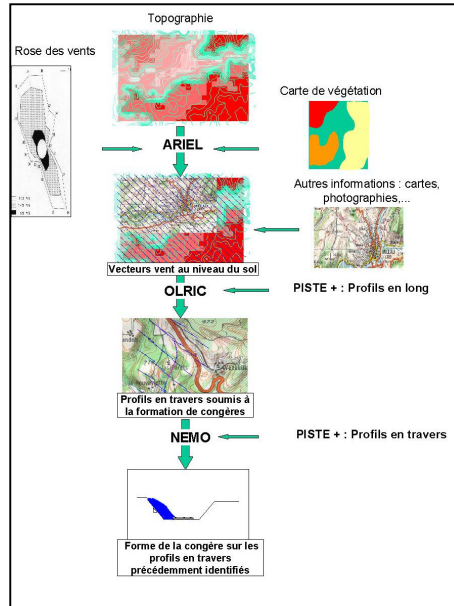
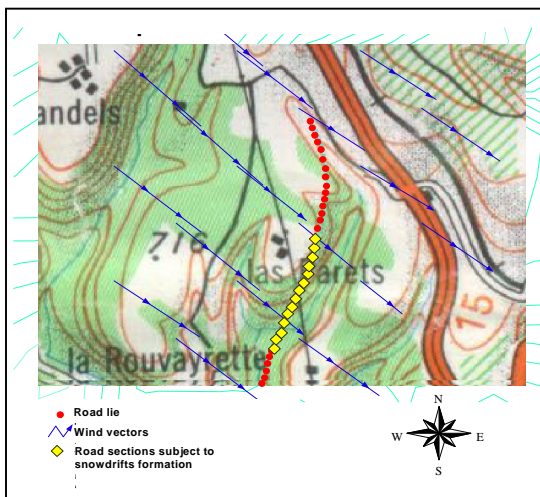


Figure 7 : Description synthétique du fonctionnement d'OLRIC

5. Exemple d'application : l'autoroute A75

L'autoroute A75 reliant Clermont-Ferrand à Béziers est située dans une zone de plateau. De telles régions sont caractérisées par une faible altitude (*inférieure à 1200 m*), des chutes de neige modérées, un relief relativement plat mais de vastes zones d'érosion qui entraînent la formation de congères importantes même si la couche de neige est relativement faible.



Nous présentons ici les résultats d'une étude réalisée sur cette autoroute. La zone d'étude, d'environ 6 km de long est située au Sud du Col d'Engayresque (888 m). La station météorologique, située à proximité du tracé a permis d'initialiser le modèle numérique de vent ARIEL avec un vent de direction Nord-ouest et d'une intensité de 10 m/s. Les différents critères précédemment décrits (*vitesse seuil de 5 m/s et angle entre l'axe de la route et le vent dominant compris entre 70° et 90°*) permettent d'obtenir le résultat suivant (*figure 8*).

Figure 8 : Sélection automatique des profils routiers soumis à un risque de formation de congères.

Des exemples de forme de congères obtenues sur le profil n°55 de ce tracé et pour différentes conditions initiales sont présentés sur la figure 9.

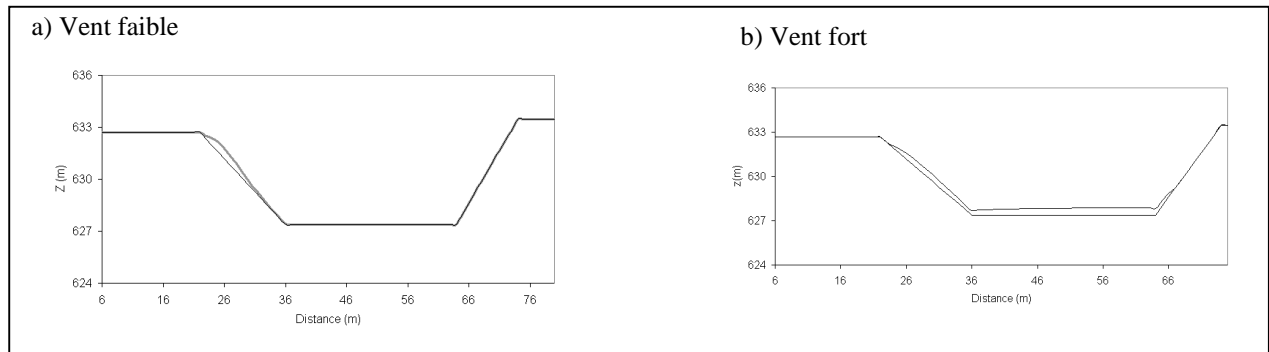


Figure 9 : Congères formées après 600 secondes de calcul avec un vent faible ($(u_*-w_f)/u^*=0.1$ (hauteur maximum du dépôt de 65 cm)) puis avec un vent fort ($(u_*-w_f)/u^*=0.4$ (hauteur maximum du dépôt de 50 cm)). u_* est la vitesse de frottement (m/s) et w_f est la vitesse de chute des particules (m/s).

6. Conclusions et développements envisageables

L'un des résultats les plus significatifs de cette étude est la création d'un environnement permettant de résoudre des problèmes d'ingénierie en utilisant des modèles numériques de vent et de transport de neige par le vent. Ce premier prototype a été présenté aux utilisateurs potentiels du Ministère de l'Équipement et des Services autoroutiers. L'enquête réalisée en 1999 fait ainsi apparaître les faits suivants : - les services de l'équipement sont intéressés par cet outil non seulement pour gérer les projets neufs mais aussi les tracés anciens. Dans cet optique OLRIC doit pouvoir permettre de tester des dispositifs de protection (*modification du profil en travers, mise en place des barrières à neige*).

- les services autoroutiers sont plus particulièrement intéressés par la prévision de la formation de congères afin d'optimiser les circuits de déneigement. L'outil doit donc être couplé avec un système de prévision d'occurrence du transport de neige.

Le travail exploratoire qui a été présenté ici doit donc être poursuivi dans ces deux directions.

7. Références

- Brugnot G.** 1996. Autoroute A 75. Contournement de Millau entre le viaduc sur le Tarn et le tronçon La Cavalerie-La Pezade. Protection contre les congères. *Unpublished*.
- Chen C.P. and P.E. Wood.** A turbulence closure model for dilute gas particle flows. *Canadian J. Chem. Engng*, 63(3), 349-360.
- Naaim M.** 1998. Contribution de la modélisation à l'étude des risques naturels liés à la neige. *Habilitation à Diriger les Recherches*. Université Joseph Fourier Grenoble.
- Naaim M., F. Naaim-Bouvet and H. Martinez.** 1998. Numerical simulation of drifting snow : erosion and deposition models. *Ann. Glaciol.*, 26, 138-143.
- Naaim M., and F. Naaim-Bouvet.** 1996. Analyse des vents le long de l'itinéraire de l'autoroute ferroviaire Lyon-Turin. *Etude réalisée pour le compte de la SNCF*.
- Martinez H. and M. Naaim.** 1995. Etude des facteurs influençant le transport de neige par le vent à partir des profils de concentration. *La Houille Blanche*, 5-6, 76-82.
- Michaux J.L., F. Naaim-Bouvet and M. Naaim.** 2001. Drifting snow studies over an instrumented mountainous site. Part II : Measurements and numerical model at small scale. *Annals of Glaciology*, in press.
- Panofsky H.A. and J.A. Dutton.** 1984. Atmospheric turbulence. Wiley Interscience. New-York. 397 p.
- Smagorinski J.** 1963. General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Weather Review*, 91, 99-164.
- Tabler R.D.** 1975. Predicting profiles of snowdrifts in topographic catchments. *Proc. West. Snow Conf.*, 43rd Annual Meeting, 23-25 April 1975, Coronado, California, 87-97.
- Taylor P.A. and H.W. Teunissen.** 1987. The Askervein Hill project : Overview and Background Data, *Boundary Layer Meteorology*, 39, 15-39.
- Takeuchi M.** 1980. Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. *Journal of Glaciology*, 26(94), 481-492.