

*équipements pour l'eau
et l'environnement*

25

Transport éolien de la neige

Processus physiques et modélisations

Florence Naaim-Bouvet, Mohamed Naaim



Transport éolien de la neige

Processus physiques et modélisations

Florence Naaim-Bouvet, Mohamed Naaim

Cemagref
UR Érosion torrentielle, neige et avalanches
Groupement de Grenoble
Domaine universitaire – 2, rue de la Papeterie
BP 76 – 38402 Saint-Martin-D'Hères Cedex
Tél. 04 76 76 27 27 – Fax 04 76 51 38 03

Photo de couverture – Traces de pas en relief dans la neige : structure éolienne liée à l'érosion du manteau neigeux (Bruno Jamet, Cemagref)

Transport éolien de la neige – Processus physiques et modélisations, Florence Naaïm-Bouvet, Mohamed Naaïm © Cemagref 2002, 1^{re} édition. ISBN 2-85362-562-1, ISSN 1258-276X. Dépôt légal 3^e trimestre 2002. Collection *Études* du Cemagref, série *Équipements pour l'eau et l'environnement* n° 25, dirigée par François Lacroix, chef du département. Impression et façonnage : Ateliers Cemagref, BP 44, 92163 Antony Cedex. Vente par correspondance : Publi-Trans, ZI Marinière 2, 91080 Bondoufle ; tél. 01 69 10 85 85. Diffusion aux libraires : TEC et DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex, tél. 01 47 40 67 00. **Prix : 40 € TTC**

Le Cemagref, institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, est un établissement public sous la tutelle des ministères chargés de la Recherche et de l'Agriculture.

Ses équipes conçoivent des méthodes et des outils pour l'action publique en faveur de l'agriculture et de l'environnement. Leur maîtrise des sciences et techniques de l'ingénieur contribue à la mutation des activités liées à l'agriculture, à l'agro-alimentaire et à l'environnement.

La recherche du Cemagref concerne les **eaux continentales**, ainsi que les **milieux terrestres** et plus particulièrement leur occupation par **l'agriculture** et la **forêt**. Elle a pour objectif d'élaborer des méthodes et des outils d'une part de **gestion intégrée** des milieux, d'autre part de conception et d'exploitation **d'équipements**.

Les équipes, qui rassemblent un millier de personnes réparties sur le territoire national, sont organisées en **quatre départements scientifiques** :

- Gestion des milieux aquatiques
- Équipements pour l'eau et l'environnement
- Gestion des territoires
- Équipements agricoles et alimentaires

Les recherches du département *Équipements pour l'eau et l'environnement* s'orientent vers :

- l'ingénierie et la prévention des risques naturels en montagne,
- l'ingénierie et la sécurité des barrages et des ouvrages hydrauliques,
- la maîtrise et la gestion des déchets,
- les techniques et la gestion de l'irrigation et du drainage,
- les techniques et la gestion d'équipements publics pour l'eau et les déchets,
- l'ingénierie des interactions eau-matériaux-ouvrages.

Résumé

Le transport de neige par le vent entraîne la formation de corniches et de plaques, génératrices d'avalanches en haute montagne, et la formation de congères sur les voies de communication en plaine. Il est de ce fait à l'origine de risques naturels qui peuvent engendrer de graves conséquences pour les biens et les personnes.

Un premier ouvrage intitulé « Transport de la neige par le vent : connaissances de base et recommandations » a été édité par le Cemagref en 1992. Il faisait le point sur les règles empiriques permettant de mettre en place une ingénierie de protection contre ce phénomène.

Depuis son édition, de nombreuses recherches ont été entreprises. Elles ont apporté des progrès significatifs dans la compréhension physique des processus et leurs occurrences tant dans l'espace que dans le temps. L'enjeu du présent ouvrage, qui tente de répondre à la question que chaque ingénieur se pose « Où et en combien de temps, se forme une accumulation de neige ? » est de faire la synthèse de ces connaissances et des outils de modélisation récents.

La première partie de cet ouvrage a donc pour objectif d'appréhender la complexité des phénomènes et de tenter de comprendre les mécanismes mis en jeu. Elle traite successivement, de la couche limite, de l'arrachement aérodynamique des particules, des différents modes de transport éoliens et de l'obtention des profils de transport à saturation. Cette partie fait ainsi le point sur les connaissances actuelles dans ce domaine.

La deuxième partie est dédiée aux outils de modélisations physique et numérique. Elle débute par une synthèse des différentes approches réalisées par la communauté scientifique internationale pour se terminer par la présentation de la contribution propre des équipes du Cemagref.

Summary

Blowing snow produces cornices, source of dangerous avalanche starting zones in high mountainous areas, and snowdrifts on the roads in plains. Therefore, it is the cause of natural hazards having serious consequences for goods and people.

A first book entitled « Drifting snow : basic knowledge and recommendations » and edited by Cemagref in 1992, reviewed the empirical rules necessary to set up protection against this phenomenon.

Since this edition, many researches were carried out. Significant progress was achieved in the physical comprehension of the processes involved and their occurrences in the space as well as in the time. This book tries to provide answers to the question each engineer is faced with « For a given meteorological episode and for a given topographic configuration, where does snow accumulate and in how long ? ». So, this work aims at realizing the synthesis of this knowledge and recent modelling tools.

The first part of this work is concerned with the description of the physical mechanisms involved in blowing snow and it deals successively with : the boundary layer, the aerodynamical entrainment of particles, the different types of particles transport and the particles profiles at saturation. A synthesis of the current knowledge in this field is put forward in this part.

The second part covers the physical and numerical modelling. It starts with a synthesis of the different approaches developed by the international scientific community and ends with the presentation of the Cemagref teams own contribution.

Remerciements

Cet ouvrage est la synthèse d'une dizaine d'années de recherches sur le transport de la neige par le vent, menées au sein de l'Unité de Recherche ETNA du Cemagref. Ces travaux ont donné lieu à la soutenance de thèses et d'habilitation à diriger les recherches. A ce titre cet ouvrage a bénéficié de conseils, d'avis et de commentaires de Michel Belorgey (Université du Havre), Jean-Pierre Chollet (LEGI/Université Joseph Fourier Grenoble), Michel Coantic (IMST/Marseille), Kiouchi Nishimura (Université d'Hokkaido), Rémi Pochat (LCPC) et Jean-Paul Schon (TSI/Université de Saint-Etienne) que nous tenons à remercier.

Par ailleurs, les différentes expérimentations menées au laboratoire et in situ n'auraient pu avoir lieu sans la participation active et le soutien des responsables des laboratoires et de l'instrumentation que sont Frédéric Ousset, Christian Eymond-Gris, Martine Roussel, Muriel Lagauzère et Hervé Bellot, et auxquels nous exprimons toute notre reconnaissance.

Hugo Martinez et Jean-Luc Michaux durant leur travail de thèse ont eux aussi contribué à la progression des connaissances tout comme Bertrand Blanquart, Ahmed Bouddour, Jean-Charles Français et Frédéric Sarret, stagiaires au sein de l'Unité de Recherche ETNA.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement Martine Girier et Julienne Baudel pour le travail de relecture et de mise en forme du document.

Les auteurs



Sommaire général

	Page
Introduction	41
1. Transport de la neige par le vent en haute montagne	43
2. Transport de la neige par le vent dans des zones de plateau	44
Chapitre 1 – Théorie de la couche limite	49
1. Couche limite au sol	51
2. Équations de Reynolds pour des écoulements cisailés minces et turbulents	52
2.1 Notations	52
2.2 Équations générales	52
2.3 Cas particulier du modèle idéal à flux constant	54
3. Région interne – Région externe – Région de recouvrement	54
3.1 Région interne : loi universelle de paroi (paroi lisse, paroi rugueuse) ...	55
3.1.1 Paroi lisse	55
3.1.2 Paroi rugueuse	56
3.2 Couche de recouvrement : sous-couche logarithmique ou inertielle (paroi lisse, paroi rugueuse)	56
3.2.1 Paroi lisse	56
3.2.2 Paroi rugueuse	57
3.3 Région externe (loi de vitesse déficitaire)	59
3.4 Conditions de validité de la loi logarithmique	60
3.5 Détermination expérimentale de la contrainte pariétale	60
3.6 Viscosité turbulente pour la sous-couche logarithmique	60
4. La couche limite atmosphérique	60
4.1 Les différents états de la couche limite atmosphérique	60
4.2 Vitesse de frottement et longueur de rugosité	62
Chapitre 2 – Arrachement des particules par entraînement aérodynamique	63
1. Du grain de sable au grain de neige	65
1.1 Du cristal au manteau neigeux	65

	Page
1.1.1 Formation	65
1.1.2 Les différents cristaux	66
1.2 Le manteau neigeux.....	67
2. Évolution du manteau neigeux.....	68
2.1 Le tassement.....	68
2.2 La cohésion.....	69
2.3 La température.....	69
2.4 Les précipitations	69
2.5 Le vent	70
3. Mise en envol des particules : influence des caractéristiques des particules.....	70
3.1 Notion de vitesse de frottement seuil.....	70
3.2 Cas particulier de la neige	73
3.2.1 Approche empirique.....	73
3.2.1.1 <i>Variation de la vitesse-seuil en fonction de la température</i>	73
3.2.1.2 <i>Variation de la vitesse-seuil en fonction de la dureté de la surface</i>	74
3.2.1.3 <i>Variation de la vitesse-seuil en fonction de l'indice de mobilité : l'application Protéon</i>	75
3.2.2 Approche théorique.....	77
3.2.2.1 <i>Cohésion de frittage</i>	77
3.2.2.2 <i>Influence de la cohésion de frittage sur la vitesse de frottement seuil</i>	78
3.3 Conséquences au niveau de la modélisation des processus.....	81
4. Mise en envol des particules : influence de la rugosité	81
5. Mise en envol des particules : influence de la turbulence	83
5.1 Mise en envol des particules et contrainte de Reynolds.....	83
5.2 Production de la turbulence dans le cas d'une couche limite turbulente lisse	85
5.3 Extension au cas d'une couche limite turbulente rugueuse.....	87
5.3.1 Rugosité et lanières à faible vitesse	87
5.3.2 Influence des tourbillons de Kelvin-Helmoltz	88
Chapitre 3 – Les différents modes de transport éolien.....	91
1. La théorie classique du transport de particules	93
1.1 Saltation	93
1.1.1 Équation de la trajectoire de saltation.....	94
1.1.1.1 <i>Équation simplifiée</i>	94
1.1.1.2 <i>Équation complète</i>	96

	Page
1.1.2 Caractéristiques de la trajectoire de saltation.....	96
1.1.3 Influence de la turbulence sur la trajectoire de saltation.....	99
1.2 La surface en reptation	100
1.3 Diffusion turbulente	101
2. Les dernières avancées théoriques en matière de transport de particules.....	102
2.1 Saltation : la « fonction splash »	102
2.1.1 Approche expérimentale	102
2.1.1.1 Expériences de Mitha (1986).....	102
2.1.1.2 Expériences de Willets et Rice (1986).....	103
2.1.2 Approche numérique.....	105
2.1.2.1 La démarche	105
2.1.2.2 Les résultats obtenus.....	106
2.1.3 Cas particulier de la neige	108
2.1.3.1 Particules à faible sphéricité	109
2.1.3.2 Particules cohésives	113
2.2 Reptation : vers une nouvelle définition.....	114
2.3 Surface en reptation : glissement du lite de particules	115
2.4 Saltation pure et saltation modifiée.....	115
2.5 Suspension	115
3. Transport de particules dans l'eau.....	117
3.1 Saltation dans l'eau : processus d'éjection des particules.....	117
3.2 Saltation dans l'eau : importance relative de la saltation et de la diffusion turbulente	118
3.3 Saltation dans l'eau : chocs interparticulaires.....	119
Chapitre 4 – Modification de la couche limite en présence de particules.....	121
1. Cas de la diffusion turbulente	123
1.1 Approche expérimentale : influence des particules sur la turbulence ...	123
1.2 Approche théorique : influence des particules sur la turbulence	124
1.3 Limite de ces approches	125
2. Cas de la saltation.....	126
2.1 Approche expérimentale : modification de la rugosité.....	126
2.1.1 Utilisation de la loi logarithme	126
2.1.1.1 Cas d'un écoulement stationnaire.....	126
2.1.1.2 Influence de la rugosité initiale.....	126
2.1.1.3 Cas d'un écoulement instationnaire.....	127
2.1.2 Utilisation de la loi logarithme modifiée.....	129
2.1.3 Comparaison des deux formulations	129

	Page
2.2 Approche expérimentale : modification de la vitesse de frottement	129
2.2.1 Augmentation de la vitesse de frottement.....	129
2.2.2 Diminution de la vitesse de frottement.....	130
2.3 Approche théorique.....	132
2.3.1 Détermination des contraintes exercées par le fluide et par les particules	132
2.3.1.1 Formulation proposée par Anderson et Haff.....	132
2.3.1.2 Formulation proposée par Mc Ewan et Willet.....	135
2.3.2 Profils de vitesse de vent obtenus par modélisation numérique	135
2.3.2.1 Résultats obtenus par Anderson et Haff.....	135
2.3.2.2 Résultats obtenus par Mc Ewan et Willet	136
3. Cas particulier de la neige : modification de la particule de neige en transport dans la couche de saltation et de diffusion	138
3.1 Modification des caractéristiques de la particule de neige	138
3.1.1 Périmètres (P_g) et surface (S_g) des grains	138
3.1.2 Pourcentage de courbure convexe et concave	138
3.1.3 Rapport $P_g^2/4IS_g$	139
3.1.4 Histogramme des convexités.....	139
3.2 Sublimation de la particule de neige	139
Chapitre 5 – Profil de concentration et obtention de la saturation	141
1. Saltation	143
1.1 La théorie classique : les différentes expressions du débit de particules à saturation	143
1.1.1 Le sable.....	143
1.1.1.1 Formulation de Bagnold.....	143
1.1.1.2 Autres formulations.....	144
1.1.2 La neige	145
1.2 Les dernières avancées théoriques : profils de concentration et obtention de la saturation	147
1.2.1 Cas du sable	147
1.2.1.1 Approche numérique.....	147
1.2.1.2 Approche expérimentale.....	149
1.2.2 Cas de la neige	153
2. Diffusion turbulente	153
2.1 Mise en équations.....	153
2.1.1 Diffusion moléculaire.....	154
2.1.2 Diffusion turbulente	154
2.1.3 Nombre de Schmidt	154
2.2 Profils à saturation	155

	Page
2.3 Vérification expérimentale.....	156
2.3.1 Vérification expérimentale pour des particules solides en soufflerie	156
2.3.2 Vérification expérimentale pour des particules de neige à l'extérieur	157
2.3.2.1 Données de Dingle analysées par Mellor et Fellers	157
2.3.2.2 Retraitement des données de Dingle.....	158
3. Couplage saltation / diffusion turbulente.....	166
4. Obtention des profils à saturation : longueur de saturation	168
4.1 Cas des particules solides	168
4.2 Cas des particules de neige.....	169
4.3 Importance relative de la saltation et de la diffusion turbulente sur la longueur nécessaire à l'obtention de la saturation.....	170
4.3.1 Influence du nombre de Schmidt	170
4.3.2 Influence de la vitesse de chute.....	171
4.3.3 Influence de la vitesse de frottement	172
4.3.4 Influence du pas d'espace (diffusion numérique)	172
5. Influence des instabilités éoliennes	174
5.1 Cas des particules solides	174
5.2 Cas des particules de neige.....	174
5.2.1 Étude en soufflerie climatique de l'influence des vents instationnaires.....	175
5.2.1.1 Couche de neige soumise à des accélérations et des décélérations de vent	175
5.2.1.2 Couche de neige soumise à un vent de type sinusoidal	181
5.2.2 Étude in situ de l'influence des vents instationnaires	182
6. Le dépôt des particules.....	183
6.1 Les mécanismes de dépôt.....	184
6.2 La vitesse seuil de dépôt	184
6.2.1 Approche expérimentale	184
6.2.2 Approche numérique.....	185
6.2.3 Cas particulier de la neige	185
6.3 Cohésion de frittage et dépôt : cas particulier de la neige.....	187
Chapitre 6 – Modélisation physique du transport éolien de la neige : état de l'art.....	189
1. La notion de critère de similitude	191
1.1 Analyse dimensionnelle et théorème de Vashy-Buckingham.....	191
1.2 Similitude des équations de bilan	192

	Page
2. Modélisation par Kind.....	193
2.1 Modélisation de l'écoulement.....	193
2.1.1 Similitude de Reynolds.....	193
2.1.2 Similitude géométrique.....	194
2.2 Modélisation de la saltation.....	194
2.2.1 Etablissement du régime de saltation.....	194
2.2.2 Trajectoire des particules.....	195
2.3 Débit des particules.....	195
2.4 Coefficient de restitution.....	197
2.5 Modélisation des dépôts.....	197
2.6 Durée des expériences.....	198
2.7 Restrictions envisageables et limites d'application.....	198
2.8 Récapitulatif.....	199
3. Modélisation par Iversen.....	199
3.1 Modélisation de l'écoulement.....	200
3.2 Modélisation de la saltation.....	200
3.2.1 Trajectoire des particules.....	200
3.2.2 Prépondérance de la saltation.....	201
3.3 Restrictions envisageables.....	201
3.4 Modélisation des dépôts.....	202
3.5 Durée des expériences.....	202
3.6. Récapitulatif.....	206
4. Modélisation par David : Application des critères d'Iversen.....	207
4.1 Modélisation de l'écoulement.....	207
4.2 Modélisation de la saltation.....	208
4.2.1 Trajectoire des particules.....	208
4.2.2 Débit des particules.....	208
4.3 Modélisation des dépôts.....	208
4.4 Durée des expériences.....	208
4.5 Restrictions envisageables et limites d'application.....	209
4.6 Récapitulatif.....	210
5. Modélisation par Hertig : application des critères d'Iversen.....	211
5.1 Modélisation de la saltation.....	211
5.2 Coefficient de susceptibilité.....	211
5.3 Récapitulatif.....	212
6. Modélisation par Tabler.....	212
6.1 Modélisation de l'écoulement.....	212
6.1.1 Similitude de Reynolds.....	212
6.1.2 Similitude de Froude.....	212
6.1.3 Similitude géométrique.....	213
6.2 Modélisation de la saltation.....	213

	Page
6.2.1 Trajectoire des particules.....	213
6.2.2 Mode de transport prépondérant.....	214
6.2.3 Débit des particules.....	214
6.3 Durée des expériences.....	214
6.4 Récapitulatif.....	215
7. Modélisation par Anno.....	215
7.1 Vers l'abandon du nombre de Froude.....	215
7.1.1 Nombre de Froude basé sur les hauteurs d'obstacles.....	215
7.1.2 Nombre de Froude basé sur les longueurs d'obstacles.....	217
7.1.3 Nombre de Froude basé sur les diamètres de particules.....	218
7.2 Introduction du rapport u_r/u_t	218
7.2.1 Justification théorique.....	218
7.2.2 Justification expérimentale.....	219
7.3 Modélisation des dépôts.....	220
7.4 Critère de temps.....	220
7.5 Récapitulatif.....	221
8. Modélisation physique dans l'eau et modélisation physique dans l'air....	222
Chapitre 7 – Modélisation physique du transport éolien de neige	225
1. Les dispositifs expérimentaux.....	227
1.1 Expérimentation à l'échelle 1.....	227
1.2 Expérimentation à l'échelle réduite.....	228
1.2.1 Modélisation physique en soufflerie avec des particules sèches.....	229
1.2.1.1 Soufflerie.....	229
1.2.1.2 Instrumentation périphérique.....	230
1.2.2 Modélisation physique en soufflerie avec de la neige.....	232
1.2.2.1 La soufflerie climatique Jules Verne.....	232
1.2.2.2 Le CES (Cryospheric Environment Simulator).....	233
1.2.3 Modélisation physique à l'extérieur avec du sable.....	235
1.2.4 Modélisation physique à l'extérieur avec de la neige.....	236
2. Examen critique des critères de similitude.....	237
2.1 Exemple de modélisation physique.....	238
2.1.1 Résultats issus de la modélisation physique.....	238
2.1.2 Commentaires.....	240
2.1.2.1 Forme des congères.....	240
2.1.2.2 Vitesse.....	241
2.1.2.3 Durée de tempête.....	241
2.2 Similitude géométrique : porosité et perte de charge.....	241
2.3 Rugosité aérodynamique en l'absence de saltation.....	243

	Page
2.4 Rugosité aérodynamique en présence de saltation.....	245
2.4.1 Vers un « nouveau » nombre de Froude	245
2.4.2 Détermination expérimentale de la rugosité aérodynamique en présence de saltation.....	246
2.5 Coefficient de susceptibilité	249
2.6 Nombre de Froude et ses dérivés.....	249
2.6.1. Approche expérimentale	250
2.6.2 Approche théorique.....	251
2.6.2.1 Conservation de C_D	252
2.6.2.2 Conservation de $u\sqrt{u_\tau}$	253
2.7 Rapport des vitesses $u\sqrt{u_\tau}$	254
2.7.1 Conditions expérimentales.....	254
2.7.2 Vérification expérimentale.....	256
2.7.3 Vitesse de frottement seuil d'arrachement et vitesse de frottement seuil de dépôt	257
2.7.4 Détermination expérimentale de la vitesse de frottement seuil d'arrachement.....	258
2.8 Limites d'utilisation de $u\sqrt{u_\tau}$	258
2.9 Paramètre dérivé du débit des particules : critère de temps proposé par Iversen	262
2.9.1 Taux de transport adimensionnalisé.....	262
2.9.2 Vitesse de référence et vitesse de frottement	262
2.9.3 Influence de la longueur de la zone de reprise sur la fonction Ξ	262
2.9.4 Validation du paramètre dérivé du débit de particules lorsque la saturation en particules est atteinte	264
2.9.5 Limite d'utilisation du paramètre dérivé du débit de particules lorsque le profil d'équilibre de la congère est atteint	268
2.9.6 Influence de la dispersion de la granulométrie pour les particules modèles	268
2.10 Critère de temps proposé par Anno.....	271
2.10.1 Comparaison théorique entre le critère de temps proposé par Anno et celui proposé par Iversen.....	271
2.10.2 Comparaison numérique entre le critère de temps proposé par Anno et celui proposé par Iversen.....	273
2.10.2.1 Application du critère de Iversen.....	273
2.10.2.2. Application du critère de Anno.....	275
2.10.2.3 Conclusions.....	275
2.11 Isochronie.....	275
2.12 Influence du profil de concentration sur la dynamique de la formation de la congère.....	276
2.13 Influence des particules sur la forme de la congère	280
3. Conclusions : Intérêts et limites de la simulation physique du transport éolien de la neige.....	281
3.1 Les critères de similitude : une liste qui s'allonge.....	281

	Page
3.1.1 Adimensionnalisation de l'équation de conservation de la masse des particules dans la couche de diffusion turbulente	281
3.1.2 Adimensionnalisation de la longueur de la zone d'ablation nécessaire à l'obtention de la saturation	282
3.2 Compromis envisageables et limites d'utilisation de la simulation physique	282
3.2.1 Vitesse	282
3.2.2 Particules et forme des accumulations	284
3.2.3 Critère de temps.....	285
3.2.4 Quelques exemples d'utilisation	285
3.3 Vers de nouveaux horizons : les apports possibles de la modélisation numérique	285
 Chapitre 8 – Modélisation numérique du transport éolien de la neige : état de l'art.....	 287
1. Modèle d'écoulement.....	289
1.1 Les modèles de turbulence.....	289
1.1.1 Le concept de viscosité turbulente.....	290
1.1.2 Modèle de longueur de mélange	291
1.1.3 Modèle à une équation de transport.....	291
1.1.4 Modèle à deux équations de transport ($k-\varepsilon$)	292
1.2 Modèles de turbulence et écoulement à recirculation	293
1.3 Modèles de turbulence et écoulement diphasique	295
1.4 Modèles d'écoulement sur réseaux.....	296
1.5 Les modèles d'écoulements utilisés dans les modélisations du transport de la neige par le vent.....	299
2. Modèles d'arrachement de dépôt et de transport des particules.....	299
2.1 Modèle d'arrachement et de dépôt d'après Iversen	299
2.2 Modèle d'arrachement et de dépôt d'après Liston, Brown et Dent.....	301
2.3 Limites des approches proposées par Iversen et Liston	303
2.4 Modèle d'arrachement et de dépôt d'après Uematsu et al.....	304
2.5 Modèle d'arrachement d'après Castelle	305
2.6 Modèle d'arrachement et de dépôt d'après Anderson et Haff.....	308
2.6.1 Description du modèle	308
2.6.2 A propos d'une utilisation plus générale des concepts développés par Anderson et Haff	312
2.6.3 Utilisation du concept développé par Anderson et Haff pour la modélisation du transport de la neige par le vent	313
2.7 Modèles d'érosion, de transport éolien et de dépôt sur réseaux d'après Masselot	315
2.7.1 Le transport éolien	315

	Page
2.7.2 Le dépôt	316
2.7.3 L'érosion.....	316
2.7.4 Résultats	316
3. Synthèse	317
Chapitre 9 – Le modèle MEMO et son intégration dans une chaîne de modélisations	319
1. Modélisation du vent en topographie complexe : le modèle ARIEL	321
1.1 Modélisation linéarisée.....	321
1.2 Modélisation du vent en topographie complexe : développement d'une nouvelle formulation	322
1.2.1 Equations de base	323
1.2.2 Traitement de la force de Coriolis.....	324
1.2.3 Changement de variables et première simplification	324
1.2.4 Nouvelles formulations des lois de conservation.....	325
1.2.4.1 Conservation de la masse	325
1.2.4.2 Conservation de la quantité de mouvement	325
1.2.4.3 Conservation de l'énergie totale	327
1.2.5 Système d'équations final.....	329
1.2.6 Adimensionnalisation des équations.....	329
1.3 Simulation de la turbulence atmosphérique.....	331
1.3.1 Modèle de type k- ϵ	332
1.3.2 Modèle de type LES.....	332
1.4 Résolution numérique	333
1.4.1 Maillage du domaine : discrétisation de l'espace et du temps	334
1.4.2 Intégration des équations.....	335
1.4.2.1 Étape de projection	335
1.4.2.2 Étape d'intégration	335
1.4.2.3 Étape de détermination des flux	336
1.4.3 Conditions aux limites	336
1.5 Test du modèle numérique sur des solutions analytiques.....	337
1.6 Comparaison du modèle numérique avec des mesures expérimentales : cas de la colline d'Askervein.....	338
1.6.1 Le site expérimental.....	338
1.6.2 Comparaison modélisation numérique / mesures in situ	340
1.6.2.1 Évolution de la vitesse de surface	340
1.6.2.2 Évolution de la direction de l'écoulement	340
1.6.2.3 Évolution de l'énergie turbulente.....	341
1.7 Conclusions.....	342
2. Modélisation du transport de neige par le vent : le modèle MEMO.....	343
2.1 Modèle mathématique pour la couche de suspension	343

	Page
2.1.1 Hypothèses et mise en équations.....	343
2.1.2 Prise en compte de la turbulence	344
2.1.3 Conditions aux limites	346
2.1.4 Nombre de Schmidt	347
2.2 Modèle mathématique pour la couche de saltation	347
2.3 Modèle mathématique de l'érosion éolienne	348
2.4 Modèle mathématique pour le dépôt des particules	350
2.5 Évolution de la surface du manteau neigeux.....	351
2.6 Comparaison des résultats numériques et des résultats expérimentaux obtenus en soufflerie diphasique.....	352
2.6.1 Comparaison des profils à saturation	352
2.6.2 Évolution des profils de concentration vers la saturation.....	353
2.6.3 Influence de la vitesse de chute.....	354
2.6.4 Flux de dépôt	355
2.7 Comparaison des résultats numériques et des résultats expérimentaux obtenus in situ.....	359
2.7.1 Description du site expérimental.....	359
 3. Intégration des modèles MEMO et ARIEL au sein d'un SIG : OLRIC (Outil de Localisation des Risques de Congères).....	 363
3.1 L'environnement de travail.....	364
3.2 La démarche scientifique	364
3.2.1 Fonctionnement à grande échelle : localisation des zones à risques de formation de congères	364
3.2.1.1 Données d'entrée géoréférencées.....	365
3.2.1.2 Critère géographique	366
3.2.1.3 Critère d'intensité du vent	366
3.2.1.4 Critère d'orthogonalité à la route.....	367
3.2.2 Fonctionnement à petite échelle : détermination de la forme des congères	368
3.2.2.1 Données d'entrée géoréférencées.....	369
3.2.2.2 Visualisation des formes de congères	370
3.2.3 Exemple d'application : l'autoroute A75.....	371
 4. Perspectives.....	 372
 Conclusions.....	 375
 Bibliographie	 377

