

A microscopic view of snow crystals, showing various hexagonal and dendritic shapes in shades of blue and white. The crystals are set against a light blue background, creating a textured, crystalline appearance.

La neige

Recherche et réglementation

Coordination
Florence Naaim-Bouvet
Michel Prat
Jocelyne Jacob
Jean-Armand Calgaro
Joël Raoul

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL

LA NEIGE

Recherche et réglementation

Cemagref
EDITIONS

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© 2000

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

Cemagref
EDITIONS

ISBN 2-85978-318-0
28, rue des Saints-Pères
75007 Paris

ISBN 2-85362-545-1
Parc de Tourvoie BP 44
92163 Antony

Avant-propos

Chaque année, le nombre des accidents graves déclarés, dus à des coulées de neige, est supérieur à quarante.

Des événements récents (hiver 1998) ont confirmé ces chiffres, faisant toutefois apparaître une stabilisation du nombre des tués en montagne par rapport à l'augmentation de la fréquentation des stations d'altitude. Ces événements ont surtout montré quelle pouvait être la puissance de destruction des avalanches, mais aussi quels pouvaient être les désordres et les dommages engendrés, directement ou indirectement, par le transport de la neige par le vent (congères, plaques à vent, etc.) et les problèmes de viabilité hivernale induits.

Tous ces phénomènes naturels trouvent leur origine dans la spécificité et les propriétés physiques du matériau neige en mouvement. C'est le thème abordé dans la première partie de ce livre. La connaissance et la reconnaissance de ce matériau s'effectuent dans divers sites instrumentés où sont disposés anémomètres, pluviomètres, capteurs acoustiques, radars, profileurs, etc. Des cristaux de neige sont également prélevés in situ pour être analysés numériquement en laboratoire. Il faut ensuite dépouiller toutes les données recueillies : répertorier la morphologie des cristaux, expliquer l'origine de l'agglomération des grains et la nature des cohésions internes, exploiter les enregistrements, en déduire des caractéristiques mécaniques, etc., établir des relations entre données climatiques et paramètres mesurés. Ce travail est le lot quotidien des chercheurs du Centre d'études de la neige, du Cemagref, du laboratoire 3S de l'Institut national polytechnique de Grenoble, de l'université Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, etc. Mais la recherche ne s'arrête pas là. Il faut améliorer la prévision des risques et, pour cela, comprendre les mécanismes qui mettent en jeu les forces colossales développées par les avalanches, valider des modèles numériques 3D à partir d'essais en soufflerie permettant de modéliser le manteau neigeux et de reproduire certaines conditions d'instabilité.

Mais comprendre et reproduire des phénomènes est une chose, être capable de se prémunir contre leurs effets en est une autre. Le chercheur passe alors le relais à l'ingénieur constructeur pour concevoir des règles de dimensionnement des structures, structures industrielles ou d'habitation, structures de protection, etc. C'est le thème abordé dans la deuxième partie de ce livre. Depuis plusieurs années, de nombreux travaux, entrepris sous l'égide du Comité européen de

normalisation, pour l'élaboration de l'Eurocode 1, puis les travaux complémentaires réalisés dans le cadre de la rédaction des documents d'application nationaux ou, plus spécifiquement, par le Centre d'études de la neige concernant l'étude de l'interaction neige-construction et le ministère de l'Équipement (CETE de Méditerranée, SETRA) concernant l'étude des paravalanches, ont permis de montrer que la façon de modéliser les charges sur les ouvrages, qu'il s'agisse des charges imposées, des charges variables ou des charges naturelles ou accidentelles, avait autant de répercussions sur le dimensionnement des quantités et donc sur le choix des structures et des matériaux (via les sollicitations en jeu), que les charges elles-mêmes. Or, pour être à même d'expliquer la nature des charges et leurs conséquences pratiques, mais aussi pour mieux faire comprendre les bases théoriques de la définition des modalités d'application des chargements et des couplages, il fallait pouvoir justifier une démarche scientifique d'élaboration des Eurocodes, cette démarche consistant généralement à rendre compte dans des documents d'accompagnement, appelés « background documents » ou « documents supports », des méthodes et des techniques de calibration employées, des références bibliographiques utilisées, des descriptions des études et des expériences réalisées, etc.

Nous sommes donc heureux de pouvoir vous présenter dans ce livre des sujets à la fois théoriques et pratiques, où sont non seulement abordées les méthodes de prédiction et de modélisation numériques de la neige, mais aussi les méthodes d'évaluation des actions et leurs effets sur les constructions par référence aux derniers développements en matière de normalisation et de projets d'ouvrages.

Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude au Professeur San Paolesi qui nous a fait l'honneur d'accepter la publication en français du « document support » de l'ENV 1991-2-3. Nous voulons également témoigner notre reconnaissance au Professeur Félix Darve (ALERT-INPG) et à Messieurs Jacques Baron (ATHIL) et Jean-Armand Calgaro (SETRA) qui ont rendu possible la réalisation de ce document. Nous ne pouvons terminer cet avant-propos sans adresser notre considération aux auteurs, ainsi qu'à Madame Jocelyne Jacob (SETRA) et à Monsieur Gérard Delcambre (SETRA) pour leur aide précieuse.

Michel PRAT

Sommaire

Avant-propos	3
Michel PRAT	

I

Action de la neige sur l'environnement

Problématique des avalanches de neige – Coopération européenne	9
Gérard BRUGNOT	
Modélisation numérique du manteau neigeux – Application à la prévision d'avalanches, à l'hydrologie et à l'étude du climat	17
Éric BRUN, Éric MARTIN, Yves DURAND, Gérard GIRAUD, Yves LEJEUNE, Laurent MERINDOL, Gérard GUYOMARC'H	
Caractérisation de la variabilité mécanique du manteau neigeux	41
Daniel BOISSIER, Roland GOURVES	
Transport de la neige par le vent – Connaissances de base, recommandations et modélisations	65
Florence NAAIM-BOUVET, Mohamed NAAIM	
Stabilité des plaques de neige : modélisation numérique tridimensionnelle	155
Dominique DAUDON, Étienne FLAVIGNY, Laurent SCHILLINGER	
Avalanche mixte de neige sèche sans cohésion considérée comme un écoulement granulaire	169
Mohamed NAAIM, Florence NAAIM-BOUVET	

II

Action de la neige sur les constructions

Éléments pour la conception d'une galerie paravalanches	231
Virgile OJEDA	
Réflexions sur le choix des valeurs représentatives et des valeurs de calcul des actions dues aux avalanches	269
Jean-Armand CALGARO	
Document support de l'ENV 1991-2-3 - Eurocode 1, Charges de neige	279
R. DEL CORSO, M. GRAENZER, H. GULVANESSIAN, J. RAOUL, R. SANDVIK, L. SANPAOLESI, U. STIEFEL	

I

ACTION DE LA NEIGE SUR L'ENVIRONNEMENT

PROBLEMATIQUE DES AVALANCHES DE NEIGE

Coopération européenne

Gérard BRUGNOT

CEMAGREF

Division Nivologie

2, rue de la Papeterie – BP 76

38402 Saint-Martin-d'Hères

On examine dans ce qui suit les enjeux théoriques et pratiques liés à la neige et aux avalanches dans les pays européens. Le propos est illustré par un exemple de coopération au niveau européen.

1. LA PROBLEMATIQUE DES AVALANCHES DE NEIGE

Les avalanches de neige sont un phénomène d'une très grande complexité sur le plan physique. Elles concernent de plus en plus exclusivement des populations touristiques, c'est-à-dire une grande partie des habitants des centres urbains à la recherche d'air pur et de sensations fortes.

1.1. Les enjeux dans les pays européens

Les avalanches de neige sont le risque naturel qui fait le plus de victimes en Europe sur une base de long terme. La plupart de ces victimes sont des alpinistes et des skieurs qui ont provoqué le phénomène entraînant leur perte ou celle de ceux qui les accompagnent. Par ailleurs, les dégâts matériels sont relativement faibles mais il existe toujours un risque non nul d'accidents de masse comme celui de Val-d'Isère (février 1970, 39 morts). Les pays les plus concernés en Europe sont les pays alpins, puis les pays scandinaves et les pays d'Europe centrale (Carpathes, Balkans). Les enjeux sont généralement liés au tourisme, mais dans certains pays « périphériques » comme l'Islande et la Tur-

quie, des villages entiers sont menacés, ce qui explique que des accidents de masse s'y sont produits depuis le début de la décennie.

1.2. L'étude des avalanches

Prévoir le déclenchement des avalanches, ainsi que leur étendue et leur énergie est une tâche à laquelle se sont attaqués de nombreux chercheurs depuis la seconde guerre mondiale (et même un peu avant en Suisse et en URSS). Les résultats sont pour le moins contrastés, pour ne pas dire décevants dans certains cas. Certes, des progrès ont été réalisés mais on est encore loin des résultats souhaités en termes de précision spatio-temporelle des prévisions. Les progrès les plus encourageants dans le domaine de la prévention des accidents sont peut-être ceux que l'on peut attribuer aux efforts de communication vis-à-vis du grand public, efforts qui s'appuient entre autres sur certains résultats de recherche. L'étude des avalanches recouvre un domaine assez vaste de la physique, nous nous contenterons de passer en revue ces domaines, qui seront détaillés par d'autres auteurs.

1.2.1. Les conditions de mise en place du manteau neigeux

L'étude des conditions de mise en place du manteau neigeux est le domaine de la physique des précipitations. De nombreux chercheurs se sont penchés sur la classification des cristaux de neige, allant jusqu'à en distinguer plusieurs centaines, tandis que d'autres ont essayé d'interpréter au moyen de la thermodynamique les formes de ces cristaux en fonction des conditions de l'atmosphère, notamment température et humidité. Quant à la prévision des précipitations, qui est certainement le plus important du point de vue pratique, c'est une activité centrale de la recherche en météorologie.

1.2.2. L'évolution du manteau neigeux

Une autre question dont l'intérêt pratique ne souffre aucune contestation est celle de l'évolution du manteau neigeux. Son étude fait d'abord appel à la thermodynamique et ses résultats sont impressionnants sur le plan scientifique (voir ci-après l'article d'Éric Brun). On arrive à reconstituer avec une précision excellente les caractéristiques de ce manteau neigeux, en l'occurrence celles de diverses couches qui le composent en fonction des paramètres climatiques externes. Cela permet de faire de bonnes prévisions de stabilité à des échelles de l'ordre du massif. La mise en place et l'évolution du manteau neigeux sont suivies grâce à un réseau d'observation très dense dans les pays alpins.

1.2.3. Les ruptures de stabilité du manteau neigeux

La situation est moins satisfaisante si l'on considère la question de la stabilité locale du manteau neigeux, celle qui intéresse au plus haut point l'utilisateur touristique de la montagne hivernale. L'extrême complication de la rhéologie du manteau neigeux, ainsi que la complexité de la topographie des versants de montagne expliquent les difficultés qu'il y a à prévoir les ruptures de stabilité avec une précision spatio-temporelle satisfaisante. Les deux articles consacrés à ce sujet font le bilan des recherches dans ce domaine.

1.2.4. La formation des avalanches

Les avalanches se forment à partir d'une instabilité locale du manteau neigeux, qui peut se propager de diverses manières selon l'état de contrainte de ce manteau neigeux. Il est à noter que cette instabilité locale est souvent provoquée artificiellement par l'utilisation d'explosifs. Dès que l'énergie cinétique de la masse en mouvement atteint une certaine valeur, le phénomène entre de façon irréversible dans une phase dynamique.

1.2.5. Les avalanches : phase dynamique

Sous sa forme dynamique, l'avalanche peut revêtir des formes très diverses, dont l'étude relève de branches très différentes de la physique. Considéré très globalement, le principal facteur est celui des contributions respectives des phases solide et liquide, d'une part (eau), de la phase gazeuse, d'autre part (air). Les manifestations extrêmes sont d'un côté un écoulement de type nuée ardente et de l'autre côté un écoulement de type hydraulique. Le premier type, surtout dans ses caractéristiques extrêmes, est très dangereux, car sa trajectoire est assez peu influencée par le relief.

1.2.6. Les avalanches : phase terminale

Si la connaissance des conditions de rupture de stabilité est essentielle pour le skieur qui s'aventure loin des pistes balisées et damées, celle des conditions d'arrêt des avalanches est tout à fait essentielle pour quiconque doit implanter des bâtiments, des remontées mécaniques ou encore des routes. Comme toute l'étude de la dynamique du phénomène, elle fait appel à la mécanique des milieux continus ; mais dans ce cas, une autre discipline apporte une contribution précieuse, il s'agit de la géomatique qui permet de construire des cartes historiques numérisées tandis que des enquêtes périodiques sur les événements permettent de constituer des bases de données. Les données ainsi accumulées permettent de mettre au point des modèles qui s'appuient sur les méthodes d'ajustement statistique.

1.2.7. Le transport de la neige par le vent

La faible cohésion de surface du manteau neigeux récent, les renforcements locaux très importants du vent dans des zones à relief marqué et le caractère fortement non linéaire de l'action du vent sur le manteau neigeux expliquent les transferts de masse très importants qui se produisent souvent après une chute de neige. Ces transferts de masse ne sont pas qu'une curiosité pour les chercheurs. Ils sont aussi à l'origine de deux types de phénomènes très gênants : les accumulations de neige sur les voies de transport (congères) et la formation de couches de neige instables, appelées plaques à vent. Ce type de couche de neige est à l'origine de très nombreux accidents de ski.

2. LE PROGRAMME SAME

Cet acronyme signifie *Snow Avalanche Modelling and Mapping in Europe*. Il traduit l'ambition de parcourir la chaîne qui part de l'initiation des phénomènes et va jusqu'à leur phase terminale, même si ce dernier aspect est plutôt privilégié.

2.1. Les organismes associés

Ils sont de deux natures, des organismes scientifiques et techniques d'une part, des laboratoires universitaires d'autre part. Ces partenaires appartiennent aux pays alpins, pyrénéens et scandinaves : France, Italie, Suisse, Autriche, Norvège, Islande, Espagne. Leur liste commentée fournit une bonne illustration des recherches menées en Europe dans le domaine des avalanches.

Cemagref/Division Nivologie : coordinateur, responsable de la cartographie des avalanches et de la normalisation des ouvrages de retenue de neige, effectue des recherches dans le domaine de la dynamique des avalanches ainsi qu'en matière de cartographie et de technologie de protection.

Météo France/Centre d'études de la neige (CEN) : recherches dans le domaine de la neige, support scientifique de la prévision nivo-météorologique.

Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (IFENA) : organisme suisse de recherche, précurseur au niveau européen de la recherche dans le domaine de la recherche sur la neige et des avalanches (stabilité du manteau neigeux et dynamique des avalanches).

Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica (CSVDI) : ce centre, qui dépend de la région de Vénétie, est chargé des études relatives aux avalanches et aux torrents.

FBVA/Austrian Institute for Avalanche and Torrent Research : ce centre dépend du ministère autrichien de l'Agriculture et de la Forêt, c'est le laboratoire officiel de recherche sur les avalanches et les torrents.

ICC/Servei Geologic de Catalunya : pour la province de Catalogne, cet institut est chargé de toutes les opérations de cartographie des risques naturels.

Norwegian Geotechnical Institute (NGI) : bien que de statut privé, cet institut a des missions officielles dans le domaine de la recherche sur les avalanches, notamment concernant la dynamique des phénomènes et la cartographie.

Icelandic Meteorological Office (IMO) : l'IMO dépend du Service météorologique islandais. Ce laboratoire est d'autant plus actif dans le domaine de la cartographie des avalanches que l'Islande a été récemment touchée par des accidents graves sur des lieux habités.

FBG de la Universidad de Barcelona, Departament de la Geologia Dinàmica : il s'agit d'un laboratoire spécialisé dans le domaine de la géologie et de la géophysique et qui apporte un support scientifique à l'Institut cartographique de Catalogne pour la cartographie des risques naturels.

Universita de Pavia, Dipartimento de ingegneria idraulica e ambientale : c'est un laboratoire spécialisé dans le domaine de l'hydraulique et de l'ingénierie de l'environnement, qui agit comme support scientifique du CSVDI.

INW-TUG/Institute of Communication and Wave propagation : il s'agit d'un laboratoire spécialisé dans les technologies de la communication, qui a développé des radars utilisés dans la métrologie des avalanches.

EPFL/Laboratory of ElectroMagnetism and Acoustics (LEMA) : ce laboratoire de l'École polytechnique fédérale de Lausanne a une bonne expérience des techniques de mesure applicables à la neige et aux avalanches, comme la photogrammétrie ou la détection acoustique.

2.2. Les axes du programme

Les principaux points sur lesquels les partenaires souhaitaient progresser étaient la modélisation, utilisée pour la cartographie, les modèles étant calibrés à l'aide de résultats obtenus sur des sites expérimentaux. Parallèlement, il avait été jugé indispensable de faire des progrès sur la détection du phénomène, afin de fiabiliser ce moyen de protection des voies de communication et de gestion du risque. Plutôt que de décrire en détail le progrès des actions entreprises, nous commenterons les résultats obtenus et les suites à prévoir afin de recueillir les fruits de cette coopération.

2.3. Les résultats du programme

La liste des « deliverables » illustre les préoccupations des chercheurs et les résultats obtenus grâce à leur coopération.

D1 : cartographie des avalanches et bases de données en Europe. Ce document inclura des informations sur les données disponibles et proposera un format de données conforme au standard du Comité européen de normalisation (standard de données environnementales - ENV 12657).

D2 : interface utilisateur basée sur un SIG permettant d'intégrer des modèles. Un programme en langage AML, écrit à cette fin, sera mis à la disposition des utilisateurs.

D3 : évaluation après benchmarking de cinq modèles d'avalanche. Cette évaluation sera suivie par des conseils sur les conditions d'utilisation.

D4 : état de l'art des modèles de calcul d'avalanche existants. Dans l'esprit, ce recensement conduira à une étude comparative moins approfondie mais plus étendue.

D5 : les sites expérimentaux européens. Bilan de la situation et proposition d'une stratégie d'expérimentation coordonnée.

D6 : l'équipement des sites expérimentaux. Complément du rapport précédent.

D7 : systèmes de détection, état de l'art et proposition de règles de l'art. Ces systèmes jouent un rôle important dans la protection des routes et surtout la gestion du risque.

D8 : développement de capteurs. Dans le cadre du projet ont été mis au point un certain nombre de capteurs, tels radars, détecteur acoustique, système de détection sismique.

2.4. Les suites du programme

Quelles que soient les formes sous lesquelles va se poursuivre, au-delà du programme SAME, la collaboration entre les partenaires, le cap restera le même, en l'occurrence l'amélioration des procédures de cartographie grâce à des modèles respectant mieux les lois de la physique et testés grâce à des expériences menées dans des sites expérimentaux.

Pratiquement, une certaine intégration et une certaine division du travail devront permettre d'améliorer encore l'efficacité de cette collaboration. Parmi les modalités pratiques de ce resserrement de la collaboration, sont envisagés :

- la mise en œuvre d'une plate-forme d'utilisation de modèles en commun ;
- la concentration des essais sur deux sites d'échelle et de climatologie différentes.

Ces collaborations se traduiront par la construction de nouveaux programmes de recherche communs, dont on espère qu'à terme ils permettront d'améliorer la protection des populations permanentes et touristiques.

3. CONCLUSION

Les avalanches de neige sont un enjeu important pour les pays européens, car elles sont responsables d'un nombre beaucoup trop important de victimes et la société est particulièrement sensible à ce type d'accident. Par ailleurs, le phénomène physique qui est à l'origine de ces accidents est particulièrement complexe. Un programme européen a permis d'améliorer nos connaissances et de coordonner les efforts de recherche, particulièrement en ce qui concerne l'indispensable validation des modèles par des mesures sur des avalanches en vraie grandeur.

BIBLIOGRAPHIE

ANCEY C. - *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*. Edisud, 1996.

BRUGNOT G. - « Avalanche », *Encyclopædia Universalis*, 1987.

GRUBER U., BARTELT P., HAEFNER H. - « Avalanche hazard mapping using numerical Voellmy-Fluid models ». *NGI Publications 203 (25 Years of Snow Avalanche Research at NGI, Anniversary Conference, Voss, Norway, 12-16 May, 1998, Proceedings)*. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, 1998.

HARBITZ C.B., ISSLER D., KEYLOCK C.J. - « Conclusions from a recent survey of avalanche computational models ». *NGI Publications 203, (25 Years of Snow Avalanche Research at NGI, Anniversary Conference, Voss, Norway, 12-16 May, 1998, Proceedings)*. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, 1998.

KEYLOCK C.J. - « Snow avalanches ». *Progress in Physical Geography*, 21, 4, 1997, p. 481-500.

LEDOUX B. - *Les catastrophes naturelles en France*. Documents Payot, 1995, 455 p.

NAAIM M. - « Dense avalanche numerical modelling. Interaction between avalanche structures ». *NGI Publications 203 (25 Years of Snow Avalanche Research at NGI, Anniversary Conference, Voss, Norway, 12-16 May, 1998, Proceedings)*. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, 1998.

Concernant le programme SAME, on se référera aussi au serveur suivant :

<http://same.grenoble.cemagref.fr>

MODELISATION NUMERIQUE DU MANTEAU NEIGEUX

Application à la prévision du risque d'avalanches, à l'hydrologie et à l'étude du climat

**Éric BRUN, Éric MARTIN, Yves DURAND, Gérald GIRAUD
Yves LEJEUNE, Laurent MERINDOL, Gilbert GUYOMARC'H**

Centre national de recherches météorologiques

Centre d'études de la neige (CEN)

Domaine universitaire

1441, rue de la Piscine

38406 Saint-Martin-d'Hères Cedex

***Résumé.** Cet article présente les techniques utilisées par le modèle de neige Crocus pour simuler numériquement l'évolution du manteau neigeux en fonction des conditions météorologiques. Dans un premier temps, les performances du modèle ont été évaluées sur un site instrumenté de moyenne montagne, où ont pu être observés la plupart des événements météorologiques influençant fortement l'évolution du manteau neigeux. Dans un deuxième temps, le modèle a été activé à l'échelle régionale en utilisant des données météorologiques d'entrée déduites d'une analyse et non plus mesurées. La qualité des résultats obtenus s'est avérée suffisante pour permettre l'utilisation du modèle de neige dans le cadre opérationnel de la prévision du risque d'avalanches.*

D'autres domaines de recherche ont offert un champ d'application très intéressant à la modélisation numérique du manteau neigeux : ce sont respectivement la climatologie avec l'étude des interactions entre enneigement et climat et l'hydrologie avec l'utilisation de la fonte nivale pour le calcul des débits des rivières.

Le présent article passe ainsi en revue l'ensemble des actions de recherche menées au CEN faisant appel à la modélisation du manteau neigeux.

Le manteau neigeux est constitué par l'empilement successif de couches de neige dont chacune évolue en fonction des conditions météorologiques. L'évolution d'une couche est généralement rapide lorsque celle-ci est en surface, mais elle se poursuit aussi lorsque la couche est enfouie sous une couche de neige fraîche, si bien que le manteau neigeux se présente sous la forme d'un matériau stratifié en continuelle évolution. Ses propriétés superficielles et internes diffèrent très sensiblement de tous les autres matériaux naturels que l'on rencontre sur les surfaces continentales. C'est notamment le cas pour ses propriétés radiatives caractérisées par un fort albédo dans le domaine du rayonnement solaire et une forte émissivité dans le spectre de l'infrarouge thermique, mais aussi pour ses propriétés thermiques caractérisées par une faible inertie et une forte chaleur latente de fusion. De plus, les propriétés physiques de la neige varient sensiblement au cours de son évolution, parfois sur plus d'un ordre de grandeur. Cette évolution est due aux modifications que subit la structure d'une couche de neige, qui dépend de la forme des cristaux de glace qui la composent et des connexions entre ces cristaux. L'évolution des cristaux est appelée métamorphose. On observe différentes métamorphoses qui correspondent à des évolutions des cristaux vers des formes différentes, anguleuses ou arrondies. Le type de métamorphose subie par une couche de neige dépend des conditions de température, de teneur en eau liquide et de gradient de température régnant au sein de la couche, si bien que l'évolution du manteau neigeux est contrôlée par les conditions météorologiques.

L'idée de modéliser l'évolution du manteau neigeux remonte à une trentaine d'années. Les premiers modèles numériques de neige avaient comme but principal le calcul de l'accumulation et de la fonte (Obled, 1971), si bien qu'ils s'attachaient principalement à résoudre les échanges d'énergie et de masse entre la surface du manteau neigeux et la couche superficielle atmosphérique. Ils furent rapidement suivis par des modèles multicouches (Anderson, 1976 ; Navarre, 1975), qui calculaient aussi les échanges d'énergie et de masse entre chacune des couches internes du manteau neigeux. Vingt ans plus tard apparaissait une nouvelle génération de modèles numériques qui bénéficiaient d'une meilleure connaissance des propriétés de la neige et de puissances accrues de calcul qui permettaient la prise en compte d'un plus grand nombre de processus physiques (Jordan, 1991 ; Brun *et al.*, 1989 ; Brun *et al.*, 1992 ; Yamazaki *et al.*, 1993 ; Bader, 1992). Parmi tous ces modèles, celui du CEN, nommé *Crocus*, a la particularité de simuler l'évolution de la stratigraphie du manteau neigeux en calculant la métamorphose de chacune des couches de neige le composant.