Christophe Ancey
(coordonnateur)

Guide Neige et Avalanches

connaissances, pratiques, sécurité



ÉDISUD

Guide Neige et Avalanches

Connaissances, Pratiques, Sécurité

SARL ÉDISUD, LA CALADE, RN 7, 3 120 ROUTE D'AVIGNON
13090 AIX-EN-PROVENCE – FRANCE
Tél. 04 42 21 61 44 / Fax 04 42 21 56 20
www.edisud.com – e.mail : commercial@edisud.com

Nouvelle édition revue et corrigée

ISBN 2-85744-797-3
© Édisud, Aix-en-Provence, 1996, 1998. Tous droits réservés.

OUVRAGE COLLECTIF
Coordonnateur : Christophe ANCEY

Guide Neige et Avalanches

Connaissances, Pratiques, Sécurité

Edisud

AUTEURS :

Christophe ANCEY, *ingénieur*
(Cemagref)
Robert BOLOGNESI, *responsable R&D*
(GESTER)
Claude CHARLIER, *ingénieur*
(Expert indépendant)
Alain DUCLOS, *guide*
(Transmontagne)
Françoise et Charles GARDELLE, *historiens*
Jean-Pierre HERRY, *médecin*
(ENSA)
Olivier MARCO, *ingénieur*
(RTM)
Éric MARTIN, *chef de centre*
(CEN)
Edmond PAHAUT, *ingénieur*
(CEN)
Claude REY, *guide*
Pierre SARRAZ-BOURNET, *juriste*
Claude SERGENT, *ingénieur*
(CEN)
François SIVARDIÈRE, *ingénieur*
(ANENA)
François RAPIN, *ingénieur*
(Cemagref)
Jacques VILLECROSE, *ingénieur*
(Météo-France)
Jean-Paul ZUANON, *chercheur*
(CAF)

COORDONNATEUR :

Christophe ANCEY

Organismes collaborateurs :
le Cemagref
Météo-France

Ouvrage collectif sous le patronage de l'ANENA :

Association Nationale d'Études de la Neige et des Avalanches

ASSOCIATION NATIONALE POUR L'ÉTUDE DE LA NEIGE ET DES AVALANCHES : ENTRE SAVOIR ET FAIRE

Créée en 1971 à la suite des avalanches catastrophiques de l'hiver 1970, l'ANENA a pour objectif de faire progresser la sécurité et la prévention des risques en matière de neige et d'avalanches. Reconnue d'utilité publique en 1976, l'association compte aujourd'hui près de 900 membres dont 150 étrangers. Elle regroupe toutes les personnes ou organismes, publics ou privés, intéressés par les problèmes liés à la neige et aux avalanches, à titre professionnel ou personnel : laboratoires de recherche, élus locaux, stations de sports d'hiver, administrations départementales et centrales, entreprises, professionnels de la neige (guides et accompagnateurs de montagne, moniteurs de ski, pisteurs, secouristes...) et les usagers, skieurs, randonneurs, alpinistes ou pratiquants des nouvelles glisses intéressés par la connaissance de la neige, des avalanches et des moyens d'assurer leur propre sécurité en montagne.

UN LIEU DE CONCERTATION

La nature et la composition de l'ANENA en font un espace de concertation et de coordination de la réflexion sur la sécurité en montagne enneigée, entre ses différents membres. Des groupes de travail et des commissions spécialisées réunissent régulièrement les différents partenaires de la montagne, favorisent les échanges d'expériences et d'idées, encouragent les initiatives de nature à améliorer la sécurité des biens et des personnes en montagne hivernale. L'ANENA coordonne ainsi la réflexion sur les appareils de sauvetage des victimes d'avalanche, sur la prévision du risque d'avalanche (régionale et locale), sur les moyens et modalités de la diffusion de l'information "risque d'avalanche", sur les systèmes de déclenchement artificiel des avalanches, etc. Elle organise et participe à des tables rondes ou des colloques internationaux dans le but de créer des points de rencontre et de discussions entre les théoriciens, les praticiens et les usagers de tous pays.

UN PARTENAIRE POUR LA RECHERCHE

Dans ce domaine, l'ANENA gère des contrats réalisés, le plus souvent en collaboration, par des organismes publics ou privés et des laboratoires. Elle s'attache également à soutenir financièrement des initiatives individuelles mais non moins intéressantes. Si le domaine des "sciences physiques" reste présent (conditions de départ des avalanches de plaques par exemple), les sciences humaines n'en sont pas pour autant oubliées (importance de l'information dans la prévention des accidents de sports d'hiver, analyse du contexte juridique des accidents d'avalanches). Elle a par ailleurs toujours encouragé les applications pratiques (ARVA, avalancheur, etc.). Le savoir-faire français est diffusé grâce à de nombreux contacts avec les spécialistes étrangers. Enfin l'ANENA collecte les informations sur les accidents d'avalanches et en tient un bilan annuel.

UN ORGANISME DE FORMATION

L'ANENA forme les personnels de terrain en matière de sécurité : spécialistes en déclenchement préventif des avalanches à l'aide d'explosif; servant avalancheur; maîtres chiens d'avalanches.

Elle intervient également à la demande dans des cycles de formation professionnelle où les aspects liés à la sécurité des pratiquants des sports d'hiver sont traités (vendeurs-loueurs de ski et surf, moniteurs de ski et guides de montagne, etc.).

Un centre d'information et de documentation

L'information est un souci majeur de l'ANENA. Elle est destinée aux professionnels de tous horizons, ainsi qu'au grand public (adultes et enfants), directement ou via les médias.

L'ANENA édite une revue trimestrielle "Neige et Avalanches" qui permet de suivre l'actualité dans ce domaine : état des connaissances, nouveaux matériels, études en cours. "Neige et Avalanches" est principalement disponible par abonnement. Rédigées avec un réel souci d'être comprises par tous (professionnels ou non), ses rubriques sont très diversifiées (nivologie, science et technique, juridique, reportage, prévention et secours, estimation du risque, environnement hivernal, témoignages et leçons d'accidents, bulletins bibliographiques) pour répondre aux attentes d'un lectorat très varié.

Parallèlement, l'ANENA réalise, édite et diffuse des documents d'information. De la simple brochure au guide très complet, en passant par des livres et fiches écrits en particulier pour les enfants, un montage diapositives, des cassettes vidéo, du matériel d'observation des cristaux de neige, ou une exposition, son catalogue rassemble tous les ouvrages sur la neige, les avalanches et la sécurité en montagne hivernale. Elle dispose également d'un site sur le Web, et le minitel.

L'ANENA organise par ailleurs, ou anime, à la demande, de nombreuses conférences pour tout type de public, ainsi que des stages pratiques d'une ou deux journées, voire plus.

Elle est enfin un interlocuteur privilégié des médias sur tous les aspects liés à la neige et aux avalanches. Interventions explicatives lors d'accidents, articles de fond, ou chroniques préventives lui permettent de diffuser l'information au plus grand nombre.

Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches
15 rue Ernest Calvat - 38000 GRENOBLE
Tél. 04 76 51 39 39 - Fax 04 76 42 81 66 - www.anena.fr
3615 GOTOWEB*ANENA

Président : Hervé GAYMARD
Directeur : François SIVARDIERE
Documentation : Véronique PLACE
Consultations sur rendez-vous.

Liste complète des publications, vidéos, stages et tarifs disponible sur simple appel téléphonique. Documents vendus à l'ANENA ou par correspondance (frais d'envoi gratuit pour les membres).



Le Cemagref, Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement, est un établissement public sous tutelle des ministères chargés de la Recherche et de l'Agriculture. La recherche du Cemagref concerne les eaux continentales, ainsi que les milieux terrestres et l'agriculture. Elle a pour objectif d'élaborer des méthodes et outils d'une part de gestion intégrée des milieux, d'autre part de conception et d'exploitation d'équipements.

Les équipes du Cemagref rassemblent un millier de personnes réparties sur le territoire national. Le groupement de Grenoble s'intéresse plus particulièrment au milieu montagnard, et ce notamment à travers la division Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches. L'activité de cette divisions allie à la fois un savoir-faire scientifique (rhéologie, modèles numériques, modèles réduits) et une compétence technique (génie civil, expertise, normalisation).

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Le milieu montagnard

1. L'Homme et la neige jusqu'à la révolution du ski 22
    1.1. S'adapter aux rigueurs de l'hiver 22
    1.2. Subsister 23
2. L'homme face aux avalanches dans le passé 24
    2.1. Introduction et géographie du risque 24
    2.2. Les types d'avalanche et dégâts 25
    2.3. Protection d'un site 25
    2.4. Prévention contre les avalanches 26
    2.5. Les avalanches dans la vie courante 26
    2.6. Un exemple d'accident et de sauvetage 27
    2.7. Les accidents sur les voies d'accès 28
    2.8. Le cas des alpages 28
    2.9. Les avantages tirés des avalanches 29
    2.10. L'évolution jusqu'à l'époque actuelle 29
3. L'aventure du ski 29
    3.1. Naissance et développement du ski 30
    3.2. Développement du ski alpin 30
    3.3. D'autres pratiques 31
    3.4. Et d'autres formes 32
    3.5. L'âge de l'Or Blanc 32

Chapitre 2 : Éléments de météorologie alpine

1. Quelques notions de physique 35
2. L'atmosphère 36
    2.1. La composition de l'atmosphère 36
    2.2. Champ de pression 36
    2.3. Champ de température 37
    2.4. Le vent 39
        2.4.1. Le vent synoptique 39
        2.4.2. Le vent local 39
    2.5. Les nuages 40
3. La perturbation 41
    3.1. La naissance d'une perturbation 41
    3.2. Le voyage d'une perturbation 43
    3.3. Vers le chaud 43
    3.4. Entre le front chaud et le front froid 45
    3.5. Vers le froid 45
4. Quelques phénomènes particuliers aux zones montagneuses 47
    4.1. Les brises 47
    4.2. Foehn et effet de foehn 48
5. Les chutes de neige 49
    5.1. Précipitation de neige 49
        5.1.1. Formation dans les nuages 49
        5.1.2. Les différents types de cristaux 50
    5.2. Influence de la température 51
    5.3. Influence du vent 51
        5.3.1. Mécanisme de transport par le vent 52
        5.3.2. Accumulation de neige par le vent 53
        5.3.3. Les différents types de dépôt 53
        5.3.4. La répartition des zones d'accumulation et d'érosion 55
        5.3.5. Natures de la neige déposée 55

Chapitre 3 : Les métamorphoses de la neige, propriétés physiques et mécaniques

1. Les métamorphoses 57
1.1. La neige sèche 57
1.1.1. Les agents des métamorphoses de la neige sèche 57
1.1.2. Les métamorphoses pendant la chute de neige 60
1.1.3. La métamorphose de faible gradient (G<5 °C/m) 62
1.1.4. La métamorphose de moyen gradient (G<20 °C/m) 62
1.1.5. La métamorphose de fort gradient (G>20 °C/m) 63
1.2. La neige humide 64
1.2.1. Les régimes de la métamorphose de la neige humide 65
1.2.2. La métamorphose de la neige humide 66
2. Propriété de la neige 67
2.1. Les propriétés mécaniques de la neige 68
2.1.1. Généralités 68
2.2. Les propriétés thermiques de la neige 69
2.2.1. Capacité calorifique et chaleur latente 69
2.2.2. Conductivité de la neige 70
2.3. Bilan énergétique du manteau neigeux 70
2.3.1. Le rayonnement solaire 70
2.3.2. Le rayonnement infrarouge 71
2.3.3. Les flux turbulents de chaleur sensible et latente 71
2.3.4. Les précipitations 71
2.3.5. Quelques situations typiques 72

Chapitre 4 : Comment connaître les caractéristiques d'un manteau neigeux?

1. Connaissance du manteau neigeux 73
1.1. Les paramètres physiques du manteau 73
1.2. Sondages stratigraphique et par battage 74
1.2.1. Principe 74
1.2.2. Représentations d'un sondage 75
1.2.3. Analyse d'un sondage 76
1.2.4. Exemples de sondage stratigraphique 77
1.2.5. Perspectives dans l'utilisation du battage : le pandalp 79
1.2.6. Les limites d'utilisation du sondage stratigraphique 80
2. Les moyens sommaires d'investigation 80
2.1. Profil stratigraphique sommaire 80
2.2. Test de la pelle 81
2.2.1. Méthode de Faarlund 81
2.2.2. Méthode de Munter 81
2.3. Le test du bâton 82
3. États de surface de la neige 82
3.1. Les neiges du skieur 82
3.1.1. Les bonnes neiges 84
3.1.2. Les mauvaises neiges 84
3.2. Hétérogénéité de la surface 85
3.2.1. Irrégularités de la surface 85
3.2.2. Changements superficiels de dureté 85

Chapitre 5 : Les avalanches

1. Définitions 87
1.1. L'avalanche 88
1.1.1. Une première définition 88
1.1.2. Les avalanches dans la tradition alpine 88
1.1.3. Un contre-exemple 89
1.2. Site et zones 90
1.3. Les phases d'une avalanche 91
1.4. Les modes d'écoulement d'une avalanche 92
2. Critères morphologiques et génétiques 93
2.1. Critères morphologiques : examen des phases 93
2.1.1. La phase de départ 93
2.1.2. La phase d'écoulement 96
2.1.3. La phase d'arrêt 96

2.2. Critères génétiques : examen général des causes 98
2.2.1. Les difficultés d'établir une classification génétique 98
2.2.2. Problématique générale liée à la stabilité du manteau neigeux 98
2.3. Les facteurs fixes influant sur la stabilité du manteau 99
2.3.1. La topographie 99
2.3.2. La déclivité 99
2.3.3. Exposition 100
2.3.4. Végétation 100
2.4. Les facteurs variables influant sur la stabilité du manteau 100
2.4.1. Chutes récentes de neige 100
2.4.2. La pluie 102
2.4.3. Le vent 103
2.4.4. Les facteurs thermiques 103
2.4.5. État du manteau neigeux 104
3. Quelques exemples d'avalanche 106
3.1. Avalanche catastrophique au mont Cook 106
3.1.1. Déroulement de l'accident 106
3.1.2. L'avalanche et ses causes présumées 107
3.2. Avalanche accidentelle au Moriond 107
3.2.1. Déroulement de l'accident 107
3.2.2. L'avalanche et ses causes présumées 107
3.3. Chute de corniche dans la combe du Pra 109
3.3.1. Déroulement de l'accident 109
3.3.2. L'avalanche et ses causes présumées 110
4. La stabilité d'un manteau 110
4.1. Quelques définitions utiles 110
4.1.1. Définition de la stabilité 110
4.1.2. Surface de glissement 111
4.2. Une première approximation 112
4.2.1. Bilan local 112
4.2.2. Étude globale : notion de plaque 113
4.3. Une surcharge 115
4.4. Une redistribution des contraintes 115
4.4.1. Cisaillement d'une mince couche fragile 115
4.4.2. Rupture par compression 117
4.4.3. Choc thermique 118
4.4.4. Effet de lubrification 118
4.5. Un état critique 119
4.5.1. Apparition de la cohésion 119
4.5.2. Disparition de la cohésion 122
5. Dynamique de l'écoulement 122
5.1. Avalanche coulante 122
5.2. Aérosol 123
5.3. Avalanche mixte 124

Chapitre 6 : Gestion et prévision du risque d'avalanche

1. L'estimation du risque d'avalanches 127
1.1. Position générale du problème 127
1.2. Aspect subjectif de l'estimation : quelques exemples 128
1.2.1. Élaboration du jugement 128
1.2.2. Erreurs dans le jugement 128
1.3. La prévention et gestion du risque (spatial) d'avalanches sur un site 130
1.3.1. Principes généraux de l'expertise 130
1.3.2. Utilisation des données 133
1.3.3. Utilisation de modèles 134
1.4. La prévision du risque (temporel) d'avalanches sur un massif 135
1.4.1. Principe de réalisation du BRA 135
1.4.2. Informations du BRA 135
1.4.3. Perpectives dans l'élaboration du BRA 135
1.5. Les moyens d'investigation sur le terrain 136
1.5.1. Sondages stratigraphique et par battage 136
1.5.2. Le cadre de cisaillement 136
1.5.3. Les essais de glissement : coin suisse et bloc norvégien 137

1.5.4. L'emploi d'explosifs 141
2. Diagnostic du risque : aide à la décision sur le terrain 141
2.1. L'examen du manteau : principes 141
2.1.1. Les moyens 141
2.1.2. Variantes des blocs de glissement 141
2.2. Les questions que vous vous posez 142
2.3. Le test de la pelle et variantes 146

Chapitre 7 : Prévisions régionale et locale du rique d'avalanches

1. La prévision du risque d'avalanches à l'échelle du massif 149
1.1. La situation en France 149
1.1.1. Du risque d'avalanches 149
1.1.2. A la prévision du risque d'avalanches 150
1.1.3. L'objectif de la PRA 150
1.1.4. L'organisation de la PRA 150
1.1.5. Le dispositif opérationnel 150
2. La prévision locale du risque d'avalanche 156
2.1. Objet de la prévision locale 156
2.2. Principes de la prévision locale 157
2.3. Outils de la prévision locale 159
2.3.1. Instrumentation 159
2.3.2. Modèles de diagnostic 161
2.3.3. Logiciels 161

Chapitre 8 : Génie paravalanche, viabilité hivernale

1. Les problèmes liés à la neige 165
1.1. Les problèmes et quelques remèdes des temps jadis 165
1.2. La lutte contre les avalanches 166
1.3. Les problèmes actuels 168
2. Protection contre le danger d'avalanche 170
2.1. Position du problème 170
2.2. La défense permanente 171
2.2.1. La défense permanente passive 172
2.2.2. La défense permanente active 173
2.3. La défense temporaire 175
2.3.1. Défense temporaire passive 175
2.3.2. Défense temporaire active 175
2.4. Le zonage 177
2.4.1. Bases d'informations 177
2.4.2. Les plans de zonage 177
2.5. Un exemple : l'aménagement de Taconnaz 178
2.5.1. Le contexte 178
2.5.2. Analyse du risque 178
2.5.3. Les limites du dispositif 180
2.6. Les situations de crise 180
2.6.1. Un exemple : Tignes en février 90 180
2.6.2. Les procédures 181
3. Autres problèmes liés à la neige 181
3.1. Transport de neige par le vent et viabilité 181
3.1.1. Modification du profil de la chaussée, aménagement 181
3.1.2. Les actions de déneigement 184
3.1.3. Transformation de l'environnement 184
3.2. Neige et constructions 184
3.2.1. Nature des problèmes 184
3.2.2. Normes en vigueur 185

Chapitre 9 : Préparation de la course

1. La lecture de la carte et l'orientation (à skis) 187
1.1. Le matériel nécessaire 187
1.1.1. La carte 187
1.1.2. La boussole 187
1.1.3. L'altimètre 188
1.1.4. Les accessoires 188

1.2. La lecture de carte 188
1.2.1. Apprentissage et entraînement 188
1.2.2. Travail préalable à la course 190
1.2.3. Lecture de la carte sur le terrain 190
1.3. La méthode de l'azimut 190
1.3.1. Principe 191
1.3.2. Relevé d'un angle de marche sur la carte 191
1.3.3. Marche selon un angle sur le terrain 191
1.4. Méthode de la tangente à la courbe de niveau 192
1.4.1. Principe général 192
1.4.2. Exemple pratique 192
1.4.3. Utilisation pratique 193
1.4.4. Limites de la méthode et remèdes à appliquer 193
1.5. Quelques questions au sujet de cette méthode 195
2. Choix de l'itinéraire 197
2.1. S'informer : le bulletin du risque d'avalanche 197
2.1.1. L'échelle européenne de risque d'avalanches 197
2.1.2. Comment s'informer ? 200
2.1.3. Un exemple de BRA 201
2.1.4. Carte et topo-guide 204
2.2. Les dangers objectifs et subjectifs 207
2.2.1. Avalanche et coulée 208
2.2.2. Parcours sur glacier : crevasse et sérac 208
2.2.3. Obstacles naturels et les autres risques 211
2.3. Quelques règles simples 211
2.3.1. Choix du tracé 211
2.4. Composition du groupe 211
2.4.1. Partir seul 211
2.4.2. Partir à plusieurs 212
2.4.3. Partir en collective 212
2.5. L'horaire 212
2.6. Le stationnement 214
2.6.1. Le raid 214
2.6.2. L'abri de fortune 214
3. Le matériel de sécurité 216
3.1. L'ARVA 216
3.1.1. Principes 216
3.1.2. Méthodes de recherche 217
3.1.3. Précautions à prendre 220
3.1.4. Entraînement 220
3.2. Pelles et sondes 221
3.2.1. Une anecdote 221
3.2.2. L'équipement 222
3.3. Le ballon avalanche 222

Chapitre 10 : Conduite de la course

1. La conduite du skieur à la montée, à la descente 223
1.1. Règles permanentes de sécurité 223
1.1.1. Le port de l'ARVA 223
1.1.2. Conduire une sortie de ski 223
1.2. L'ascension 224
1.2.1. Itinéraire 224
1.2.2. Précautions 224
1.3. La descente 224
1.3.1. Itinéraire 224
1.3.2. Précautions 225
2. L'évaluation du risque d'avalanche 225
2.1. Situations nivologiques 225
2.1.1. Des règles empiriques et leurs nuances 226
2.1.2. Cinq types de manteaux neigeux particulièrement suspects. 228
2.2. Situations météorologiques 232
2.2.1. Précipitations 232
2.2.2. Vent 232

2.2.3. Température de l'air ... 233
2.2.4. Nébulosité ... 235
2.3. Situation géographique ... 235
2.3.1. Altitude ... 235
2.3.2. Exposition ... 236
2.3.3. Inclinaison de la pente ... 236
2.3.4. Situations topographiques ... 237
2.3.5. Arêtes sommitales ... 237
2.3.6. Cols ... 238
2.3.7. Epaules et talwegs dans le sens de la ligne de pente ... 239
2.3.8. Convexités et concavités perpendiculaires à la ligne de pente ... 239
2.3.9. Versant globalement uniforme : zones de reprise et de suraccumulation ... 240
2.3.10. Barres rocheuses ... 242
2.4. Les signes précurseurs et les indices ... 242
2.4.1. Activité avalancheuse observée ... 242
2.4.2. La neige ... 242
2.4.3. Les bruits ... 242
3. Cas traités et exemples ... 243
3.1. Les différentes erreurs rencontrées ... 243
3.2. Erreur d'appréciation, facteur humain ... 243
3.2.1. Perception du danger ... 243
3.2.2. Diminution de l'attention et excès de confiance ... 244
3.2.3. La pression ... 245
3.2.4. Erreur légitime d'appréciation ... 246
3.2.5. Mauvais point de regroupement ... 247
3.2.6. Un essai malheureux ... 248
3.2.7. Un accident imprévisible ... 249
3.3. Méconnaissance du milieu ... 250
3.3.1. Collective ... 250
3.3.2. Quand le danger vient des autres ... 250
3.3.3. Une tragique erreur d'itinéraire ... 251
3.3.4. Problème d'ARVA ... 253
3.3.5. Inexpérience ou fatalité ? ... 254
3.3.6. Deux avalanches consécutives ... 255

Chapitre 11 : Aspects médicaux

1. Les grands traumatismes ... 257
1.1. La défaillance cardio-circulatoire (les états de choc) ... 258
1.1.1. Quels sont les signes extérieurs de l'état de choc ? ... 258
1.1.2. Les précautions ... 258
1.2. Les traumatismes ... 258
2. Les lésions traumatiques ... 259
2.1. Les traumatismes ouverts ... 259
2.1.1. Les plaies ... 259
2.1.2. Les hémorragies ... 260
2.1.3. Les fractures ouvertes ... 260
2.2. Les traumatismes fermés ... 260
2.2.1. Les contusions ... 260
2.2.2. Les entorses ... 260
2.2.3. Les luxations ... 261
2.2.4. Les fractures ... 262
3. Les victimes d'avalanche ... 263
3.1. Généralités ... 263
3.2. Victime vivante et consciente ... 263
3.3. Victime présentant des troubles de la conscience ... 264
3.4. Victime en état de mort apparente ... 264
3.4.1. Définitions ... 264
3.4.2. Victime en état de mort apparente : conduite réalisée par le médecin du secours sur les lieux de l'avalanche ... 265
4. Les victimes de chute en crevasse ... 265
5. La pathologie liée au froid ... 266
5.1. Généralités ... 266
5.2. Réactions thermorégulatrices de l'organisme exposé au froid ... 268

5.3. Les gelures 268
5.3.1. Définition 269
5.3.2. Mécanismes 269
5.3.3. Description de la gelure 269
5.3.4. Pronostic 269
5.4. L'hypothermie accidentelle 270
5.4.1. Définition 270
5.4.2. Circonstances de survenue 270
5.4.3. Évolution 271
5.4.4. Le traitement 271
6. La pathologie liée au rayonnement 272
6.1. L'œil et le rayonnement ultraviolet en milieu neigeux 272
6.2. Les brûlures solaires 274
7. La trousse de secours 275
8. Conclusions 275

Chapitre 12 : Le secours en avalanche

1. Quelques chiffres 277
1.1. Les accidents d'avalanche en France depuis 1971 277
1.1.1. Les victimes décédées par accident d'avalanches 277
1.1.2. Répartition par type d'activité 279
1.2. Les chances de survie 279
1.3. Témoignage d'accident par le curé d'Huez, 1944 280
2. Que faire en cas d'accident d'avalanche ? 282
2.1. Vous êtes pris dans une avalanche 282
2.1.1 Que faire pendant l'avalanche ? 282
2.1.2 Que faire quand l'avalanche s'arrête ? 283
2.2. Vous êtes témoin d'un accident d'avalanche 283
2.2.1 Que faire pendant l'avalanche ? 283
2.2.2 Que faire quand l'avalanche s'arrête ? 283
2.3. La recherche à l'ARVA 285
2.4. L'alerte 286
2.4.1. Décrire avec précision le lieu de l'accident 286
2.4.2. Évaluer avec exactitude la demande de secours 286
2.4.3. Renseignements complémentaires 287
3. L'organisation des secours 287
3.1. Les différents acteurs 287
3.2. Le matériel de recherche de victimes d'avalanche 288
3.2.1. Les yeux et les oreilles 288
3.2.2. Les sondes 288
3.2.3. Les ARVA 289
3.2.4. L'émetteur simple 290
3.2.5. Le Recco 291
3.2.6. Le chien d'avalanche 292
3.2.7. Le ballon avalanche ABS 292
3.3. Déroulement des opérations 293
3.3.1. L'alerte 293
3.3.2. La montée en puissance des moyens de secours 294

Chapitre 13 : Aspects juridiques

1. Les fondements de la responsabilité 297
1.1. La faute pénale 297
1.2. La faute civile 298
1.3. La faute délictuelle ou quasi-délictuelle 298
1.3.1. Définition et nature 299
1.3.2. La procédure - les modes de preuve 299
1.3.3. La force majeure 299
1.4. La faute contractuelle 300
1.4.1. La nature de la faute 300
1.4.2. Obligation de résultat - Obligation de moyens 300
1.5. La théorie du risque accepté 301
2. Les procédures 301
2.1. Procédure pénale 301

2.2. Procédure civile ... 302
2.3. Procédure administrative ... 302
3. La jurisprudence ... 302
3.1. Avalanche au Plan-de-l'Aiguille (Mont-Blanc - 5/2/1978) ... 302
3.1.1. Les circonstances ... 302
3.1.2. L'arrêt de la cour ... 303
3.1.3. Analyse ... 303
3.2. Accident à l'Ouille Noire (Tarentaise - 14/3/1981) ... 303
3.2.1. Les circonstances ... 303
3.2.2. L'arrêt de la cour d'appel ... 304
3.2.3. Analyse ... 306
3.3. Accident au Mont-Genèvre (25/3/1978) ... 306
3.3.1. Les circonstances ... 306
3.3.2. Le jugement ... 306
3.3.3. Analyse ... 306
3.4. Accident de ski de fond hors piste sur la route du Petit Saint Bernard (24/2/1980) ... 307
3.4.1. Les circonstances ... 307
3.4.2. L'arrêt ... 307
3.5. Accident à la Roche-de-Mio (station d'Aime 2000) ... 309
3.5.1. Les circonstances ... 309
3.5.2. Le jugement ... 309
3.5.3. Analyse ... 310
3.6. Accident à Macot-La Plagne ... 310
3.6.1. Les circonstances ... 310
3.6.2. Le jugement ... 310
3.7. Avalanche à Val-d'Isère (15/1/1988) ... 312
3.7.1. Les circonstances ... 312
3.7.2. Le jugement ... 312
3.7.3. Analyse ... 312
3.8. Avalanche à Corrençon-en-Vercors (8/3/1988) ... 312
3.8.1. Les circonstances ... 312
3.8.2. L'arrêt de la cour d'appel ... 313
3.8.3. Analyse ... 313
3.9. Avalanche à Tignes (28/2/1987) ... 314
3.9.1. Les circonstances ... 314
3.9.2. Le jugement ... 314
3.9.3. Analyse ... 316
3.10. Avalanche à La Grave (31/01/1988) ... 316
3.10.1. Les circonstances ... 316
3.10.2. Le jugement ... 316
3.10.3. Analyse ... 316
3.11. Avalanche de Sarenne (Alpe-d'Huez) ... 317
3.11.1. Les circonstances ... 317
3.11.2. Le jugement ... 317
3.11.3. L'arrêt de la Cour ... 317
3.11.4. Analyse ... 318
3.12. Avalanche de Val-d'Isère du 23 février 1996 ... 319
3.12.1. Circonstances ... 319
3.12.2. Le jugement ... 319
3.13. Avalanche à Saint-Sorlin-d'Arves du 16 février 1997 ... 319
3.13.1. Les circonstances ... 319
3.13.2. Le jugement ... 320
3.13.3. Analyse ... 320
4. Conclusion ... 320

Glossaire et index

Utilisation du glossaire ... 322
Vocabulaire nivo-météorologique, terminologie scientifique ... 323
Vocabulaire technique ... 332
Index ... 333

REMERCIEMENTS

Il me faut remercier en premier lieu tous les responsables, qui ont permis la mise en œuvre des moyens nécessaires à la rédaction de cet ouvrage, tout particulièrement François Lacroix chef de la division Érosion Torrentielle, Neige et Avalanche du Cemagref, François Sivardière, directeur de l'ANENA et Éric Martin chef du Centre d'Études de la Neige de Météo-France. Avant eux, Gérard Brugnot et Jean-Pierre Feuvrier (pour le Cemagref), Jean-Louis Tuaillon (pour l'ANENA) et Éric Brun (pour Météo-France) avaient apporté leur concours.

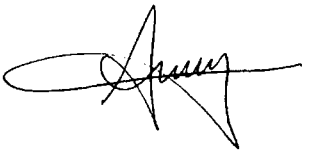
Beaucoup de personnes ont contribué à la rédaction ou ont facilité ma tâche. Mes remerciements vont tout particulièrement au colonel Delawarde, aux chefs de bataillon Acacio et Chastel, et au capitaine Sevezen (27° DIM), à mes collègues Gilles Borrel, Hugo Martinez, Florence Naaim et François Valla (Cemagref).

Ce livre n'aurait jamais été possible sans la collaboration de plusieurs personnes qui ont participé directement à la rédaction ou qui y ont apporté leurs connaissances en rédigeant des point particuliers : Robert Bolognési, chef de secteur Recherche & Développement dans le cabinet GESTER, Patrick Bornuat, chef du Centre Départemental de Météorologie de Tarbes, Claude Charlier, l'ancien expert *ès* avalanches du Cemagref, aujourd'hui expert indépendant, Alain Duclos, guide et pisteur à Valfréjus, Françoise et Charles Gardelle, historiens, Jean-Pierre Herry, médecin de l'ENSA et de la FFME, Olivier Marco, chef du service RTM des Hautes-Alpes, Éric Martin, chef du CEN, Edmond Pahaut, ingénieur à Météo-France, François Rapin, l'homme du génie paravalanche au Cemagref, Pierre Sarraz-Bournet, spécialiste des questions juridiques et président honoraire à la cour d'appel de Grenoble, Claude Sergent, ingénieur au CEN, François Sivardière, directeur de l'ANENA, Claude Rey, guide, intervenant au sein de la FFME et président du Syndicat des guides, Jacques Villecrose, prévisionniste au Centre Département de Météo-France de l'Isère et Jean-Paul Zuanon, rédacteur-en-chef de la revue *La Montagne et Alpinisme.*

Je sais gré également à Jean-Jacques Thillet de Météo-France, à Véronique Place et Barbara Mayet de l'ANENA. Claude Etchelecou a gracieusement permis la reproduction de ses photographies. Mes remerciements vont également à Gaston Tuaillon pour ses critiques. Beaucoup d'autres ont bien voulu porter un regard critique de relecture du manuscrit et je les remercie de cette tâche quelque peu ingrate, notamment Roger Billon (CAF de Romans), Laurent Buisson et Jean-Paul Zuanon.

En dernier lieu, je tiens à citer Charly-Yves Chaudoreille et Françoise Eimecke d'Édisud. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Christophe ANCEY,
division Érosion Torrentielle,
Neige et Avalanches (Cemagref)
Grenoble, juillet 1998



PRÉFACES

Le présent ouvrage, patronné par l'ANENA, apporte une analyse complète et précise des risques, basée sur une mine de données et d'exemples. Il donne des conseils précieux, voire vitaux, tirés d'exemples d'accidents vécus, qui illustrent et enrichissent cette étude.

Dans la plupart des cas, les avertissements n'ont pas été suivis. On ne doit pas oublier que si une avalanche s'est déclenchée, c'est que déjà un danger existait. Chaque randonneur a sa part de responsabilité en méprisant les avertissements.

Cet ouvrage est utile et profitable, d'autant plus que le nombre de touristes en montagne ne cesse d'augmenter. Pour diminuer le nombre de victimes, ce manuel donne des conseils et des règles de sécurité pour la conduite des courses, des conseils déduits de situations avalancheuses et de nombreux accidents.

Malgré ces mises en garde, on n'éliminera jamais tous les accidents, mais on tente d'en réduire le nombre. Ce qu'il y a de terrible, c'est que dès qu'il y a accident d'avalanche, on considère les victimes comme fautives. Il est en général plus facile d'énoncer le danger après coup qu'avant l'avalanche.

André ROCH,
Genève, août 1996

Lorsque notre petit groupe entreprit, il y a 27 ans, d'associer des spécialistes de différentes formations pour créer l'ANENA, nous savions que la nouvelle association aurait à faire face aux immenses problèmes de sécurité posés par l'explosion du tourisme hivernal alpin ou pyrénéen au cours des années soixante.

C'était d'abord, à la charge des services publics, la nécessité d'assurer la protection des équipements permanents, routes et habitat humain. C'était ensuite, au sein de stations de sport d'hiver, le devoir d'assurer la sécurité de leurs clients sur les pistes. Mais il s'agissait aussi, et il s'agit de plus en plus, de la sécurité du simple randonneur pratiquant désormais en toute saison ce qu'on appelait autrefois le *ski de printemps*.

Or le responsable d'une course en montagne ne dispose ni de cartographies des avalanches, ni d'ouvrages de protection, ni de moyens sophistiqués de purger les couloirs qu'il aborde ! Il est seul devant une multitude de décisions à prendre en fonction d'une foule de facteurs dépendant du relief, de la pente, de l'exposition, de l'évolution du manteau neigeux depuis le début de la saison, des précipitations, du vent et des températures constantes localement les jours précédents ou prévus le jour de la course... et des capacités des randonneurs qu'il est en charge d'accompagner !

L'expérience du vieux montagnard ne suffira pas toujours hélas ! à lui éviter des décisions malheureuses. Les connaissances scientifiques les plus approfondies non plus ! Il lui faudra les deux pour faire au mieux !

C'est la gageure qu'a tenté de relever le présent ouvrage : il expose avec beaucoup de clarté et de rigueur les dernières données scientifiques sur la physique de la neige et les avalanches ; il décrit et compare les pratiques couramment uti-

lisées pour estimer une situation, mais il donne aussi une foule d'anecdotes et de faits réels qui constituent pour le lecteur un solide et passionnant supplément d'expérience.

Le public des guides et des randonneurs avertis ne s'y est pas trompé : il a apprécié la première édition de ce travail remarquablement illustré, à la fois traité scientifique et guide pratique : en moins de deux ans la première édition a été épuisée. La seconde, très attendue, ne peut que contribuer à accroître les connaissances et donc la sécurité des amateurs de randonnée.

Merci à l'ANENA d'avoir rassemblé les spécialistes cosignataires des chapitres de ce guide ; merci à Christophe Ancey de la division *Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches* du Cemagref, d'en avoir assuré la coordination et une part de la rédaction.

Louis de CRÉCY
Co-fondateur de l'ANENA
ancien chef de la division Nivologie du Cemagref
Grenoble, juin 1998

Introduction
AVANT-PROPOS

L'ambition de cet ouvrage est de donner un aperçu relativement complet du milieu montagnard hivernal à travers deux de ses principales caractéristiques : la neige et les avalanches. Étant donné la multitude des usagers, il faudrait autant d'ouvrages que de catégories d'usagers pour respecter l'approche et les problèmes de chacun : en effet, skieurs, randonneurs, guides de montagne, moniteurs, cadres bénévoles, militaires, pisteurs, aménageurs, ingénieurs, forestiers, personnels de l'équipement, etc. ont des problèmes spécifiques à leur activité. Notre pari a donc été de tenter de présenter un panorama simple et étendu de la nivologie qui tienne en un seul ouvrage et qui ne privilégie pas une discipline ou une activité particulière. Évidemment, on ne peut dans le même temps se contenter d'un corpus de connaissances universelles, car on s'éloignerait trop des préoccupations et des questions des divers pratiquants.

On a donc construit le plan de cet ouvrage d'une manière quelque peu inhabituelle. Certes le lecteur peut parcourir linéairement les différents chapitres, mais il peut également attaquer directement les sections qui l'intéressent plus particulièrement et retourner, si le cœur lui en dit, à d'autres chapitres plus généraux. A cet effet, l'ouvrage est divisé plus ou moins implicitement en deux parties, l'une traitant des éléments théoriques nécessaires à la compréhension du milieu et l'autre présentant des données pratiques.

La première partie donne successivement des éléments concernant le milieu montagnard (histoire de la pratique du ski, l'homme et la montagne), la météorologie alpine, la neige (formation et métamorphoses du manteau neigeux), les moyens d'investigation du manteau neigeux (sondage, interprétation des données), les avalanches (cause, formation, processus, classification), la gestion et la prévision du risque d'avalanche (expertise, organisation des bulletins neige et avalanches, mesures *in situ*) et enfin les techniques de protection (génie paravalanche, viabilité hivernale, réglementation).

Une deuxième partie est consacrée à la préparation (orientation, choix de l'itinéraire, matériels de sécurité), à la conduite de la course (conduite, estimation du risque, analyse d'accidents), aux aspects médicaux (pathologie, premiers soins), à l'accident d'avalanche (organisation des secours), aux aspects juridiques (droit, analyse de jurisprudences).

De manière générale, l'accent a été mis sur la pédagogie et la clarté des notions énoncées et c'est ainsi qu'un très grand nombre de figures, de photographies et d'anecdotes illustrent le texte. Il existe plusieurs niveaux de lecture :

• Les notions délicates sont appuyées par des exemples simples ou des schémas, que l'on introduit par une police de taille différente et le symbole ➟. Le symbole ♀ indique que l'on explique certaines notions importantes (pour une bonne compréhension des phénomènes) mais pas nécessairement connues de tous les lecteurs. Le lecteur averti peut sauter ces lignes et ne lire que le corps du texte. Le symbole ☞ indique un paragraphe de résumé ou de conclusion lorsque des notions importantes ou complexes ont été données. Le symbole ⚠ signale un risque éventuel de confusion. Des renvois à des références bibliographiques se trouvent dans le texte entre des crochets, et le lecteur pourra consulter en fin de chaque chapitre la liste des références bibliographiques. A la fin de l'ouvrage, le

lecteur trouvera un index et un lexique des termes usités dans l'ouvrage, qui sert également de glossaire français-anglais.

• Certaines notions sont traitées dans plusieurs chapitres, mais chaque fois avec un éclairage différent. Il en est ainsi du transport de neige par le vent, pour lequel le chapitre 2 propose un résumé des mécanismes physiques, le chapitre 5 analyse son influence sur le risque d'avalanche, le chapitre 10 traite la question pour le skieur tandis que le chapitre 8 s'intéresse aux problèmes de viabilité induits par le vent.

La technique propre à la pratique du ski (matériel, techniques de descente, de montée, de progression alpine...), les problèmes économiques ou politiques, la description précise des techniques paravalanches ne sont pas abordés dans le cadre de cet ouvrage. Enfin, il faut signaler que chaque écrit de l'ouvrage n'engage la responsabilité que de son (ses) auteur(s), et non celle du coordonnateur, de l'éditeur ou d'un quelconque organisme ayant prêté son concours.

Chapitre 1

L'HOMME FACE À LA NEIGE ET AUX AVALANCHES DANS LES TEMPS PASSÉS

Les Alpes* constituent le massif montagneux le plus connu, le plus aménagé, le plus visité et le plus étudié de la planète. S'étendant de Nice à Vienne sur 1 200 km de longueur pour 300 km de large, les Alpes forment l'épine dorsale du continent européen partagée par 6 pays : la France, l'Allemagne, l'Italie, la Suisse, l'Autriche et la Slovénie. De ce fait, à travers les siècles, les Alpes ont revêtu une importance stratégique en délimitant les différents groupes ethniques (latin, germanique et slave) et les diverses cultures. Frontières géographiques naturelles, les Alpes ont aussi une influence orographique prépondérante puisque les plus grands fleuves de la partie occidentale du continent y prennent leur source (Pô, Rhin, Rhône, Danube...). Malgré la rigueur du climat, les Alpes sont habitées depuis la période historique et l'activité humaine a été essentiellement centrée sur l'élevage, la sylviculture ; plus tardivement le potentiel minier et industriel (transformation de l'aluminium, papeterie...) a été exploité. Enfin, le développement du tourisme a touché considérablement les Alpes, il a accéléré l'aménagement des vallées (routes, stations de ski...) et intensifié leur fréquentation, ce qui a modifié en profondeur le mode traditionnel de vie des hautes vallées alpines en les désenclavant, en imposant un flux migratoire saisonnier et en bouleversant l'économie locale. Les Alpes sont caractérisées par une grande diversité de climats et de reliefs. Elles sont néanmoins soumises dans l'ensemble (mais de manière plus ou moins marquée) à l'alternance hiver/été, donc à de longues périodes d'enneigement. La neige est présente au-dessus de 2 000 m en général du mois de novembre au mois de mai de telle sorte que neuf des dix grands cols des Alpes sont fermés à la circulation. Le climat est extrêmement varié d'une vallée à l'autre. Les Préalpes (Chartreuse, Vercors, Alpes bergamasques...) sont de manière assez générale très bien arrosées et une végétation verdoyante y est abondante, la neige est présente à basse altitude même si certaines régions sont beaucoup plus arides (Alpes de Provence, Tessin...). Localement, l'orientation au soleil, la nature du sol, la forme du relief conditionnent grandement la pérennité de l'enneigement ou le type de végétation. Le relief est aussi très variable d'un massif à l'autre. Les zones périphériques constituent en général les Préalpes calcaires (Luberon, Vercors, Chartreuse, Bauges, Alpes bergamasques, Alpes carniques, Dolomites...) tandis que les zones internes de l'arc alpin (qui se dédouble parfois) sont formées du substrat cristallin (granit, gneiss) et les éléments externes (Mercantour, Ubaye, Queyras, Grandes-Rousses) de roches métamorphiques. Les sommets d'altitude supérieure à 4 000 m sont situés dans les zones cristallines tandis que les massifs calcaires ne dépassent pas les 3 000 m d'altitude exception faite pour quelques sommets (dont l'Eiger).

Dans les Alpes, le milieu montagnard a connu, en quelques décennies, un profond bouleversement de ses structures traditionnelles, sociales, économiques, etc. essentiellement lié au développement du tourisme : depuis la fin de la seconde guerre mondiale, on est passé d'un monde rural tourné vers l'agriculture et l'élevage à un autre, presque entièrement dominé par le tourisme. Un urbanisme effréné, des infrastructures routières et mécaniques ont modifié le paysage

* Que nos amis pyrénéens se rassurent, les Pyrénées n'ont pas été oubliées, même si les exemples des deux premiers chapitres sont centrés principalement sur les Alpes du Nord. Le tort sera largement réparé par la suite.

alpin, tandis que les mœurs, la mentalité, les rapports humains, la vision de la nature ont été transformés en profondeur : l'irruption du ski (et d'autres formes de tourisme[1]) en imposant un flux migratoire saisonnier, en désenclavant les vallées, etc. a fortement uniformisé un tissu social qui jusqu'alors était conditionné par les contraintes naturelles. C'est ainsi que l'homme a cessé de s'adapter au rythme imposé par la neige pour la transformer en "or blanc".

1. L'Homme et la neige jusqu'à la révolution du ski*

Avant que la neige ne devienne un atout économique pour les vallées alpines et leurs stations de ski, elle a été une lourde contrainte pour les populations montagnardes. Toute la société traditionnelle s'est construite autour de l'alternance été/hiver : l'organisation des villages, de l'habitat, des activités, les modes de vie, de nourriture, de déplacement sont conditionnés, à plus ou moins grande échelle et selon les vallées, par la neige, qui est présente de cinq à sept mois dans l'année, selon le massif, l'altitude et l'exposition.

1.1. S'adapter aux rigueurs de l'hiver

De la fin de l'automne jusqu'au début du printemps, la neige et le froid entravaient les déplacements et coupaient chaque village du reste du monde, parfois pendant de longues périodes ; en tout cas, les voies de communication demeuraient délicates, pénibles, voire aléatoires sauf durant l'été. Il fallait dès lors pouvoir, si besoin était, vivre en autarcie : le plus souvent, le village était émietté en proches hameaux, qui comportaient, chacun, leur four à pain, leur forge, leur(s) fontaine(s), leur croix, leur église ou leur chapelle, etc. Ainsi, dans la vallée du Mont-Blanc, le village de Vallorcine s'étend sur 5 km, son altitude varie entre 1 100 et 1 300 m et il est composé d'une multitude de hameaux de taille diverse : Barberine, le Mollard, la Villaz, le Plan-d'Envers, le Plan-Droit, le Nant, le Sizeray, le Crôt...

L'habitat individuel devait aussi répondre aux contraintes du milieu naturel : se protéger contre le froid et les chutes de neige, disposer d'un espace suffisant pour loger bêtes et hommes, pour abriter les réserves... Face à ce problème, chaque vallée a adopté un style de construction, une disposition de l'habitat et des dépendances, etc. qui lui étaient propres. Le plus souvent, la maison était construite en un seul bloc, muni de murs épais, avec quelques rares fenêtres, des plafonds bas ; elle s'organisait autour de l'étable et de la grange pour le bétail, seule richesse du montagnard, et elle comportait une cave, un ou plusieurs réduits, un grenier, parfois quelques pièces étriquées pour la famille, le plus souvent une chambre commune (le "pêle" en Savoie), séparée d'une cloison en bois de l'étable. Plus rarement, on observe des fermes composées de bâtiments distincts, comme en Chartreuse ou à Vallorcine : dans ce fond de vallée, le bâtiment principal est constitué de l'étable et des pièces réservées aux hommes ; à côté, on trouve le "chalet à habits" où étaient conservées les affaires de la famille, et parfois le "regat", sorte de chalet en bois où était engrangée la moisson à l'abri des rongeurs. Les variations d'architecture d'une vallée à l'autre sont parfois difficiles à comprendre ; en général, les choix concernant le toit (charpente, toiture, etc.) et la disposition des pièces dépendaient plus des matériaux de construction (pierre, bois, chaume, lauze...) disponibles sur place que de critères esthétiques ou utilitaires précis (comme le déneigement naturel du toit s'il est suffisamment incliné). Dans certains villages, comme le Chazelet dans l'Oisans, les maisons sont accolées les unes aux autres, ce qui constituait une grande menace en cas d'incendie, mais diminuait légèrement la surface occupée par les habitations au profit des terres agricoles. Dans d'autres cas, chaque maison disposait d'un petit jardin pour la culture de légumes, mais sans étendue excessive.

* Par Christophe Ancey

1. Tourisme mondain tout d'abord jusqu'à la seconde guerre mondiale, avec le thermalisme, les débuts de l'alpinisme puis du ski, les séjours d'agrément ; par la suite, un tourisme de masse lié essentiellement au ski, puis plus tardivement ouvert largement à la pratique estivale.

1.2. Subsister

Dans la plupart des massifs alpins, l'activité essentielle du montagnard était l'élevage (chèvres, vaches, plus rarement moutons, cochons ou poules). Champs et jardins apportaient un complément appréciable : la culture de quelques céréales (avoine[2], orge, seigle[3], blé, froment[4]), et à moindre échelle de légumes (pommes de terre, laitues, choux-raves, carottes, pois...) ou de plantes textiles (lin, chanvre[5]) étaient les rares activités agricoles, qui demeuraient généralement maigres (faibles récoltes et rendements) à cause du climat (en moyenne six mois d'enneigement), de l'inclinaison des pentes et de la pauvreté du sol. En dernier lieu, la forêt (épicéa, mélèze) occupait l'homme, surtout entre les dernières récoltes et les premières chutes de neige : la coupe du bois était nécessaire pour le chauffage durant l'hiver, pour la forge et les fours (à pain, à chaux), pour la construction et la réfection des bâtiments et ouvrages. Depuis le Moyen Âge, l'exploitation de ces richesses était soigneusement contrôlée et faisait l'objet de réglementations[6] pour assurer le partage et préserver des abus un patrimoine fragile, qui avait déjà subi un important défrichage depuis le XIII[e] siècle. Le plus souvent, la terre était la propriété de la commune : au XIX[e] siècle, après l'annexion à la France, les terres communales sur Vallorcine représentaient 88 % de la superficie totale (dont par ailleurs, un sixième était recouvert de forêt, la moitié de pâturages et le reste impropre à toute activité). Néanmoins, hormis durant la Révolution, le pouvoir (sarde puis français[7]) a veillé, parfois trop scrupuleusement au goût des gens du pays, à la protection de la forêt, entre autres pour limiter l'érosion du sol, les glissements de terrain et surtout les avalanches : le ramassage de la litière et les coupes affouagères étaient ainsi sévèrement réglementés.

Si la neige était l'une des contraintes qui empêcha le développement de l'agriculture, elle influait également fortement sur l'élevage. Dès les premières chutes de neige, les bêtes descendaient de l'alpage pour rester à l'étable : cette période de stabulation pouvait durer parfois plus de six mois, période durant laquelle il fallait subvenir entièrement aux besoins du troupeau. Il fallait ramasser de grandes quantités de foin, et à cet effet aucune parcelle n'était négligée même s'il fallait couper l'herbe à la faucille (la main d'œuvre ne manquait pas) : il fallait alors environ une tonne cinq cents de foin pour une vache stabulant six mois[8]. Si le foin venait à manquer, il fallait aller l'acheter dans la vallée et le ramener à dos d'homme (l'âne consommait trop de céréales pour le service qu'il pouvait rendre à l'occasion !). Dès la fonte de la neige, que l'on accélérait en épandant des cendres, les bêtes retournaient inalper[9], montant toujours plus haut sur les versants au fil de la saison. La montée dans les alpages d'altitude était fixée par la loi, mais certaines années, des neiges tardives ou précoces rendaient extrêmement précaire l'estivage : à Vallorcine, en 1816, les bêtes ne purent monter qu'à la fin août. Souvent, à l'automne, les paysans vendaient une partie de leur troupeau afin de ne pas avoir à nourrir ce surplus de bêtes : de nombreuses foires existaient alors, et un fort maquignonnage se développa. Le commerce, la chasse, mais aussi la contrebande le long de la frontière apportaient également quelques moyens complémentaires de subsistance. Lorsqu'au XIX[e] siècle, la population du village dépassa sa capacité d'autosuffisance, une partie de sa population émigra, pour la saison d'hiver, pour proposer divers services dans la vallée (colportage, ramonage...), ou durant la belle saison, les paysans des vallées les plus pauvres s'en allaient pour des vallées plus riches comme la Tarentaise et revenaient avant les premières chutes de neige. Ce flux commença à devenir plus important et définitif ; l'exode rural ne fut réellement endigué qu'avec le développement du tourisme au XX[e] siècle.

La neige a par ailleurs contribué à resserrer les liens entre individus d'une même communauté, surtout au sein du hameau ; cette solidarité face aux élé-

2. L'avoine a été consommée jusqu'au début, voire milieu, du XIX[e] siècle par les hommes, puis à partir de là, elle a constitué un complément d'alimentation pour les poules et les cochons.

3. Il est à la base de la fabrication du pain noir, qui était le pain du montagnard.

4. A partir de la fin du XIX[e] siècle.

5. Ils étaient surtout utilisés pour l'assolement, qui s'intégrait dans un cycle de plusieurs années (plus de cinq).

6. Le partage des pâturages et des forêts a été le sujet d'âpres rivalités entre communautés.

7. Après 1860, date de l'annexion de la Savoie à la France, c'est l'administration des Eaux et Forêts qui eut en charge la gestion des forêts.

8. Dans les vallées pauvres, une vache, souvent mal nourrie malgré les soins prodigués, fatiguée par les vêlages, pèse entre 160 et 200 kg, et donne à peine 1 000 litres de lait par an !

9. On parle d'estivage.

ments unissait également les villages, mais des querelles, parfois vives et tenaces, sur une coupe de bois, sur l'aménagement d'un torrent, sur un héritage ou sur les limites d'un pâturage émaillaient la vie collective. La venue de l'hiver marquait le temps de veillées non seulement pour occuper les longues soirées mais aussi pour économiser le bois de chauffage (tour de chauffe que devait prendre chaque famille du hameau) ; le déneigement était aussi l'occasion de se retrouver dans un même effort. Le reste du temps était imparti aux tâches domestiques, aux soins du bétail et quand le temps le permettait à des activités artisanales.

La neige a largement influencé le régime alimentaire dans cet univers autarcique : les ressources étaient tirées du bétail (fromage, viande séchée, etc.), des maigres récoltes (pommes de terre, seigle pour le pain noir cuit à la fin de l'automne), des produits de la chasse (chamois ou du petit gibier comme la marmotte) ; quelques rares achats (polenta, fruits secs) complétaient le tout. Tout l'art culinaire montagnard était d'accommoder au mieux ces aliments peu variés : la pomme de terre servait ainsi à la confection à la fois de la tartiflette, de farçon aux pruneaux, etc.

La neige a joué aussi un rôle prédominant dans la mentalité du montagnard ; le confinement des mois d'hiver, une vie sociale limitée essentiellement aux frontières du hameau, la rudesse et la pauvreté des conditions de vie ont marqué le caractère des populations : le montagnard est un homme pieux, hospitalier certes, mais surtout réservé. L'endogamie a été très longtemps de rigueur : on se mariait entre villageois. Jusqu'au début du siècle, à Vallorcine, plus de 80 % des couples étaient entièrement de souche communale. Ainsi sur la dizaine de gros hameaux composant la commune de Vallorcine, on comptait 19 patronymes pour environ huit cents individus à la fin du siècle dernier ; à l'extrême, on peut même dire que le village n'était peuplé que de quelques familles : les Ancey, les Bozon, les Burnet, les Claret, les Devillaz, les Vouilloz... de telle sorte qu'administrativement l'identité d'une personne était complétée du nom du père et de la localité (comme par exemple Vincent Claret, feu Jean-Louis, de la Villaz).

2. L'HOMME FACE AUX AVALANCHES DANS LE PASSÉ*

2.1. Introduction et géographie du risque

Les avalanches, dans le passé, nous sont connues par les archives savoyardes et, plus récemment, par celles des Eaux et Forêts. D'ailleurs, nous devons aux forestiers, notamment Mougin, les seules publications de base. L'avalanche a toujours entretenu la peur parmi les hautes vallées alpines. Cette peur est justifiée. Ainsi de 1929 à 1949, l'avalanche a tué, dans les Alpes, 94 personnes, a fait perdre 149 bêtes d'élevage et a endommagé ou détruit 294 constructions. Elle a contribué fortement à l'isolement des hautes cellules montagnardes.

Esquissons une carte sommaire des zones les plus touchées par l'avalanche dans les grands massifs. Le phénomène a peu marqué les Préalpes à l'exception des Aravis. Au nord, elle englobe les vallées proches du Mont-Blanc, y compris la haute vallée du Giffre, plus au sud-est, elle recouvre la haute Tarentaise et un certain nombre de vallées affluentes (Champagny, Pralognan, Celliers, la haute Maurienne, notamment Bonneval-sur-Arc et Avérole et, en moyenne Maurienne, Valloire, les Villars). L'avalanche est redoutée dans tout l'Oisans mais plus particulièrement à Saint-Christophe et, au sud-ouest, dans le Valgaudemar. Les hautes vallées du Briançonnais, du Queyras, de l'Ubaye, de la Tinée sont également très marquées par ce phénomène. Le voisinage de la frontière italienne semble particulièrement dangereux à cause des fortes chutes de neige dues à la lombarde.

* Cette partie est due à Françoise et Charles GARDELLE ; ce n'est qu'une esquisse du sujet. Les géographes de l'école de Grenoble formés par BLANCHARD n'ont guère abordé le sujet auparavant, à l'exception d'ALLIX et de BÉNÉVENT.

2.2. Les types d'avalanche et dégâts

Dans toutes ces régions, l'avalanche est la préoccupation majeure et entretient la conversation tout au long de l'année. Les montagnards en distinguent deux types :

• la "coulée", habituelle au début du printemps, descend lentement, racle le sol, dépose en fin de course les débris végétaux, les pierres qu'il faut enlever à la fonte des neiges afin que la faux ne s'y ébrèche pas lors de la fenaison. Le territoire de la coulée est bien connu des habitants. Aussi elle ne touche qu'exceptionnellement les bâtiments ;

• en revanche, l'avalanche proprement dite et le souffle qui la précède sont particulièrement redoutés. Ainsi le bessanais Hippolyte Paroure, dans l'hiver 1922-23, fut poussé par le souffle sur 100 mètres, fracassé contre un mélèze avant d'être recouvert par la neige. L'avalanche ravage le versant d'où elle se détache mais aussi parfois le bas du versant opposé. La vallée d'Avérole (haute Maurienne) est ainsi menacée. Le hameau des Vincendières sur le versant de l'adroit a souffert gravement le 26 octobre 1896 d'une avalanche descendue du versant ensoleillé mais encore bien davantage de celle de l'envers, qui glissant sur la pente raide du Charbonnel, le 30 avril 1911, fut capable de remonter et d'enfouir les maisons sans trop de dommage. En février 1922, le souffle de l'avalanche de l'envers ouvrit les fenêtres du hameau et le 1er février 1972, le même type d'avalanche remonta le versant opposé et détruisit un bâtiment. Parfois l'avalanche peut provoquer indirectement des catastrophes : le 22 janvier 1913, le hameau de la Pernière-en-Oisans fut inondé, car en aval la neige avait barré le cours de l'Eau d'Olle.

2.3. Protection d'un site

Certes, les montagnards se sont efforcés de choisir des sites protégés. L'habitat permanent est toujours un hameau car, face au danger, il faut pouvoir s'entraider. L'avalanche a contribué à l'esprit de solidarité si fréquent autrefois en ce milieu. Aux abords du hameau, on croit connaître la limite de l'avalanche : un arbre, un bloc de pierre, une croix, signe religieux qui permet de se placer sous la protection divine.

Si le village est dominé par une forêt, on veille à sa conservation. La forêt est mise en "ban". La Savoie, avant l'annexion de 1860, avait toute une législation au sujet de l'avalanche, complétée par de nombreux arrêtés du parlement de Chambéry. En revanche, jusqu'à une date récente, la législation française ignorait ce problème. Les arbres empêchent le départ de l'avalanche mais ne peuvent arrêter celle partie au-dessus. Malgré le souci de protéger les forêts, celles-ci ont souffert du petit âge glaciaire au XVIIe siècle. Ainsi peut-on expliquer la destruction du village central de Vallorcine à cette époque, alors que sa fondation remontait au XIIIe siècle. Elles ont souffert également lors de la disparition momentanée du pouvoir, par exemple à l'époque de la Révolution. Malgré la prudence dans le choix des sites, des villages ont été durement touchés. Par exemple, le hameau de Costeroux en amont de Fontgillarde dans le Queyras : le 13 janvier 1706, l'avalanche y détruit sept maisons puis encore onze le 9 janvier 1788. Il en reste encore dix en 1824 peu avant son abandon définitif [1]. Tel est le cas aussi, en haute Tarentaise, d'un des hameaux en amont de Val-d'Isère.

Mais les cas d'abandon sont rares. En général, les habitants s'obstinent à rester sur place. A Vallorcine, après la destruction du village central, l'église est rebâtie au même emplacement, protégée par une magnifique "tourne", achevée en 1721. Le presbytère est lui aussi rétabli sous la protection du lieu saint. Ainsi les Vallorcins condamnent leur curé à vivre seul au milieu du danger, cas probablement unique à l'époque. Ils reconstruisent le village un peu à l'écart, au Sizeray. Ce hameau sera cependant touché dans la nuit du 14 au 15 janvier 1843 et, moins

durement, en 1951. Dans la haute Tarentaise, aux Brévières, le 12 février 1881, une avalanche descendue du vallon de la Sache détruit 14 maisons, ensevelit 37 personnes dont 28 pourront être dégagées vivantes. Pendant l'hiver 1897, l'un des plus terribles, on y vit dans la terreur. Au fond de la Maurienne, en janvier 1772, l'église de Bonneval et plusieurs demeures sont endommagées. L'intendant sarde, très humain à l'égard des populations alpines, propose de déplacer le village. Les habitants préfèrent rester sur place, au prix de quelques travaux : des banquettes creusées selon les courbes de niveau. Cependant la catastrophe se répète le 27 février 1888 ; l'église et dix-huit maisons sont touchées, mais il n'y a aucun mort. Dans le vallon voisin, Avérole et Vincendières sont restés avec persévérance sous le souffle des avalanches du Charbonnel. En Oisans, le village du Chazelet pouvait se croire en sécurité. La tradition orale ne rapportait pas que, dans le passé, les maisons actuelles aient été atteintes. Mais l'abandon pastoral, en laissant l'herbe ni fauchée ni pâturée, préparait le glissement de la neige. En 1970, première alerte, puis le 21 mars 1971, à 21 h 30, à la suite de fortes précipitations, l'avalanche descend, décoiffe entièrement une maison habitée, la ferme des Bouillet à l'entrée du village, sans même réveiller un de ses dormeurs. La maison fut réparée et ses habitants y restèrent en permanence jusqu'en 1985. Même les jours de risque et de peur, ils continuèrent à coucher au premier étage, pourtant moins sûr.

2.4. Prévention contre les avalanches

La liste serait longue des hameaux partiellement détruits et reconstruits. Pourquoi une telle obstination ? Le village vit d'un terroir, il ne peut s'en éloigner. Il est construit de préférence au bas de ce terroir, car sur les versants raides il est plus facile de descendre les récoltes. Ainsi, Avérole restera sous le souffle alors que plus haut, dans le versant ensoleillé, il lui aurait échappé. Dans les deux cas d'abandon, de Costeroux et d'un des hameaux de Val-d'Isère déjà cités, le terroir pouvait être cultivé à partir d'autres villages très proches.

Si le risque est particulièrement imminent, on évacue les maisons les plus menacées ; les voisins accordent l'hospitalité. Parfois, on estime l'urgence extrême ; ainsi, le 3 mars 1923, en Oisans, les ardoisiers de la carrière Maurin sont évacués en pleine nuit. On ne peut rester cloîtré tout l'hiver dans l'attente de l'avalanche. Certes, les migrants saisonniers de la période hivernale, ramoneurs mauriennais, colporteurs de l'Oisans, sont déjà partis. Ceux qui restent, vivent presque en autarcie, cuisent le pain au four banal. Avant la neige on a prévu la rentrée des provisions. On a peu de raisons de se déplacer. On peut tenir le siège de l'hiver. Cependant, les enfants doivent aller à l'école, les fidèles se rendent à l'église, le facteur va chercher le courrier. Très tôt, les communautés des hautes vallées alpines ont veillé à l'instruction. Pour éviter le risque des avalanches, les écoles de hameaux ont été multipliées. Et si les enfants pour s'y rendre, doivent traverser des zones dangereuses, ils restent alors à la maison.

2.5. Les avalanches dans la vie courante

La pratique religieuse est motif de déplacement mais ce n'est pas un péché mortel de ne pas se rendre à la messe dominicale les jours de danger. Le facteur, journellement ou deux à trois fois par semaine, doit assurer les relations avec l'extérieur. Au début de ce siècle, Dunant, le facteur de Vallorcine, franchit chaque jour le col des Montets où les avalanches sont fréquentes sur les deux versants ; il doit même se rendre, bien au-delà, jusqu'aux Tines et passer sous la menace éventuelle descendant de la Verte. Par mauvais temps, il jalonne son itinéraire de branches afin de repérer la trace à son retour. Quelquefois, sa femme, inquiète, vient à sa rencontre. Il mourra dans son lit. En revanche, son collègue du Valgaudemar sera emporté par l'avalanche en s'efforçant de desservir à l'amont

les hameaux isolés du Rif-du-Sap et du Clôt. Dans la vallée du haut Vénéon, le facteur accomplit sa tournée trois fois par semaine [2]. Il est accompagné par trois hommes de la Bérarde, relayés aux Étages par une autre équipe qui l'accompagne jusqu'à Saint-Christophe et qui en profite pour ramener quelques provisions !

Habituellement en effet, dans les périodes de risque, chacun prévient son voisin de son départ, on se déplacera plutôt en groupe sur les versants les moins avalancheux, en général les plus ensoleillés. On s'espace dans les couloirs dangereux afin qu'il reste un survivant pour porter secours ou donner l'alerte. Ainsi aux débuts des années soixante, il arrivait aux Vallorcins de se regrouper, la hotte de fibres de mélèze sur le dos pour aller s'approvisionner dans la vallée voisine de Chamonix lorsque la route et la voie ferrée ne fonctionnaient pas. Le geste de solidarité collective porte un nom dans le langage local : la "manœuvre", moment plutôt joyeux de chaude fraternité. Une des dernières manœuvres de ce genre eut lieu en février 1966 et la dernière en 1970. Aux abords des zones à risque, souvent une chapelle ou un oratoire invite à une dernière prière. L'homme se sent infiniment petit devant l'avalanche et devant Dieu. Encore aujourd'hui, des habitants traversant des zones dangereuses reconnaissent qu'ils se recommandent à Dieu. Les soldats permissionnaires ont hâte de retrouver le foyer familial et parfois bravent le danger. En décembre 1923, à l'Esseillon (haute Maurienne), l'un d'eux sera dégagé un à demi-gelé mais vivant. Il est cependant plus prudent pendant quelques jours d'accepter l'isolement, de retarder la descente du malade à l'hôpital, du cadavre au cimetière. Ainsi, un homme décédé aux Étages le 31 janvier 1923 n'a été descendu à Saint-Christophe que le 5 février [2]. Parfois, cet isolement peut être plus durable. Ainsi Bonneval-sur-Arc est resté coupé du monde extérieur onze jours en décembre 1923, huit jours du 26 février au 5 mars 1922, et aussi longuement fin mars 1971 et fin février 1972.

2.6. Un exemple d'accident et de sauvetage

Malgré la prudence propre au montagnard, un accident est possible et entraîne alors une solidarité unanime. En voici un exemple : le drame se déroule à Vallorcine entre l'église et le hameau du Mollard où habite Joséphine Ancey.

> « Tout le village se rappelle l'avalanche poudreuse qui en février 1945 a ramassé la Joséphine. Un matin vers 7 heures, Jeannot Benzoni vient me dire : « Jules, j'ai vu partir Joséphine à la messe et tout d'un coup la *Vheure* est arrivée (avalanche de poudreuse accompagnée de vent violent), je ne sais pas si elle a eu le temps de parvenir à l'église. » Oh ! Alors je lui réponds qu'il faut aller voir... et en passant j'appelle dans son couloir mais pas de réponse ! M. le Curé finissant de dire sa messe, n'avait pas vu non plus Joséphine, pourtant assidue chaque matin...
>
> Alors faisons vite, il faut demander aux militaires qui sont à la Ruche de venir avec des sondes, et nous ici, on va commencer par la route de Barberine, puis on montera le talus en se rapprochant de l'Église, car le vent peut l'avoir soufflée loin. Tous les gens disponibles, voisins, enfants, avec des manches de râteaux, de pelles, etc., agissaient au plus vite ; les heures passaient, on commençait à désespérer de retrouver la disparue, surtout vivante ! Or vers 10 heures, donc trois heures après l'avalanche, sa voisine Frida Ancey, qui sondait à mi-hauteur du chemin qui monte à l'église, s'écrie : « elle est là, je sens quelque chose de mou ! ». Alors vite, avec beaucoup de précautions, on dégage doucement à la pelle et l'on voit enfin apparaître un bout de manteau, on entend un râle... oui elle est vivante, sous un petit mètre de neige, mais sans connaissance ! Quel soulagement et quelle joie pour tout le monde, comme il est facile d'imaginer, après tant d'efforts.
>
> Mais Joséphine, nous dira plus tard, qu'elle s'était souvenue qu'Adolphe Devillaz lui avait dit un jour, « en cas d'avalanches, quand on est pris il faut plier les bras contre le tête pour garder une provision d'air » et c'est sûrement ce qui l'a sauvée. » [3]

Situons les principaux protagonistes de ce texte : Jeannot Benzoni vit dans la maison la plus proche du sinistre ; de la fenêtre de sa cuisine, il a vu l'avalanche. Il alerte l'homme jugé le plus compétent : Jules Vouilloz, guide professionnel et auteur de ce récit. Frida Ancey habite la maison la plus proche de celle de Joséphine, mais les deux femmes ne sont pas en bons termes. La solidarité l'a emporté sur les inimitiés. La Ruche est une colonie de vacances où sont casernés des militaires de recrutement local. A cette date, le Mont-Blanc tout proche est zone de guerre. Adolphe Devillaz avait été lui-même pris dans une avalanche et avait pu s'en sortir. A l'époque du récit, il est décédé.

Parfois plusieurs avalanches mortelles peuvent se succéder à cause de la confluence de plusieurs couloirs. A la sortie amont du village des Hières (commune de La Grave, Hautes-Alpes), deux jeunes sont ensevelis en 1405. Leur recherche s'organise aussitôt ; une deuxième avalanche fauche les secouristes. Il y a 22 morts. Pour ce village, ce fut pire que l'hécatombe de la première guerre mondiale. Une chapelle rappelle aux passants l'événement meurtrier.

2.7. Les accidents sur les voies d'accès

Mais les grandes catastrophes ont plutôt concerné des gens étrangers à la vallée, ignorant l'existence de couloirs dangereux. Ainsi, le 27 janvier 1913, tout un groupe de maçons piémontais gagnant la Maurienne par la vallée de l'Eau d'Olle est englouti dans le Maupas. Plus gravement encore, en février 1922, l'avalanche coûte la vie à 130 émigrés italiens qui franchissaient en fraude le col du Fréjus.

2.8. ... en alpages

Sur Fréjus, nous sommes déjà dans les zones d'alpage que les montagnards fréquentent fort peu en hiver et connaissent moins. Cependant on fauchait souvent au-dessus de la zone forestière. Ce foin était redescendu en hiver sur des luges. Parfois, il était mangé sur place par les bêtes et là, la mort pouvait surprendre. Ainsi à Valmeinier (Maurienne), la famille Marcellin entretient ses vaches à une heure de marche du village, au chalet de l'Herminaz. En janvier 1912, deux femmes et un garçonnet y sont montés. D'en bas on aperçoit l'avalanche. La colonne de secours, après plusieurs heures d'effort, dégagera trois cadavres. Au printemps, une coulée peut surprendre le troupeau au pâturage. Le 25 avril 1911 vers midi, au quartier des Ruppes, à Vallorcine, une avalanche emporte quatre chèvres. Le petit berger, Marius Ancey, au bruit s'échappe à toutes jambes. L'été 1948 fut particulièrement neigeux à des altitudes anormalement basses. Le 20 août, dans le vallon du vieil Emosson, en territoire suisse entre les deux vallées françaises de Sixt et de Vallorcine, une avalanche partie du versant du Bas des Cavales entre 2 300 et 2 600 m emporta 117 brebis.

En fin de saison, le 16 septembre 1922, une coulée entraîne tout un troupeau en alpage au-dessus de Vaujany [4]. Pour bâtir leurs chalets d'alpage, les gens des montagnes ont choisi des sites qu'ils croyaient sûrs : un replat, un épaulement, l'abri d'un rocher, d'une moraine. Quelquefois, ils ont édifié à l'amont une petite tourne, enterré l'écurie en la couvrant d'un toit à un seul versant dans le sens de la pente.

Le cas le étonnant est probablement celui de l'ancien hameau d'alpage de Commune-à-Sixt dans la haute vallée du Giffre en Haute-Savoie. Un seul chalet a trouvé abri derrière un énorme bloc rocheux ; tous les autres, aujourd'hui abandonnés et en ruine, s'abritaient derrière leurs « lèves » (terme local pour désigner une étrave). La qualité des pâturages avait justifié de tels travaux.

Malgré ces précautions, les destructions dans la zone des alpages semblent avoir été plus fréquentes que dans les vallées. Des montagnards aussi avisés que les Vallorcins avaient cru trouver un bon emplacement, sur un large épaulement pour construire leur chalet-hôtel du Buet. En 1953, l'avalanche le rasa complète-

ment. Le refuge fut reconstruit sur son site primitif à l'abri d'un gros bloc morainique. A la différence des sites d'habitat permanent, de nombreux bâtiments d'alpage furent déplacés pour échapper à une nouvelle catastrophe. Ainsi les Vallorcins abandonnèrent en 1624 le plan de l'Au pour se fixer sur le site actuel de la Loriaz.

2.9. Les avantages tirés des avalanches

Les montagnards trouvaient parfois quelques avantages à l'avalanche. Elle peut descendre du bois. La loi le donne au propriétaire du terrain où il est déposé. Avant l'invention des engins de déneigement, l'avalanche était l'occasion d'embauche momentanée par les Ponts et Chaussées pour le dégagement des routes. A Vaujany (Oisans), l'avalanche est un événement attendu en février-mars, traduit par une expression caractéristique : « la vache a fait le veau », et chaque homme valide d'aller quérir sa pelle. La compagnie de chemin de fer PLM pour dégager la ligne Le Fayet-Vallorcine, embauchait elle aussi.

L'avalanche peut former un pont sur le torrent : au Rif-du-Sap (Valgaudemar), celle de l'ubac permet le passage aisé de la Séveraisse ; jusqu'à la fin de l'été, troupeaux et porteurs de foin l'empruntaient. Enfin la neige descendue, tassée et durcie, fond tardivement, contribuant à la régularisation des sources et à l'alimentation des canaux d'irrigation, parfois nombreux.

2.10. L'évolution jusqu'à l'époque actuelle

Aujourd'hui, l'avalanche est moins redoutée, pèse moins sur la vie locale. Tout à l'amont des hautes vallées alpines, bien des villages sont désormais inhabités l'hiver, par exemple Avérole et les Vincendières en haute Maurienne, Bonnenuit en amont de Valloire, Champhorent, les Étages dans le haut Vénéon, le Rif-du-Sap et le Clôt dans le Valgaudemar, Valpréveyre en Queyras et tant d'autres. Leur abandon se poursuivra sauf s'ils sont sauvés par le tourisme, comme le Fornet à l'amont de Val-d'Isère (et point de départ d'un téléphérique). Mais les derniers habitants y ont connu une solitude hivernale parfois angoissante. Ainsi durant l'hiver 1950-51, les quatre derniers habitants de Lanchâtra à l'ubac de Saint-Christophe se sentent si isolés qu'ils conviennent avec les gens du Puy qui leur font face à l'adret qu'en cas de catastrophe, ils étendront sur la neige une couverture verte et tireront deux coups de fusil [5]. Au début des années soixante, un vieux garçon habite seul au hameau de l'Écot, aux sources de l'Arc (commune de Bonneval). Dans les années 1970, l'unique habitant du presbytère de Vallorcine le quitte en pleine nuit. Encore dans l'hiver 1993-94, un seul homme vit à la Bérarde dans une solitude presque totale, rompue seulement par un coup de téléphone journalier de sa sœur [6]. Les hameaux restés vivants sont moins menacés, protégés par des travaux d'art. Des couloirs d'avalanche sont traversés en tunnel ou purgés par Catex[10]. Le téléphone assure une liaison constante avec l'extérieur, la route menant aux lieux habités est dégagée en permanence. Dans les zones dangereuses, la voiture permet de passer rapidement et sa coque de minces tôles d'acier donne l'impression trompeuse de sécurité. L'hélicoptère, en cas de nécessité, peut amener tout à la fois le pain et le médecin, évacuer le malade ou la future mère. Le risque s'est estompé. La solidarité entre montagnards s'est amoindrie ; les anciens le regrettent. Aujourd'hui la chronique des avalanches situe de moins en moins les catastrophes dans les fonds de vallée mais sur les hautes pentes des alpages traversées par les pistes de ski ou fréquentées par les amateurs de peaux de phoque.

3. L'AVENTURE DU SKI*

Avant de devenir un sport, le ski a été un moyen de locomotion. Il est né dans les pays nordiques bien avant de s'implanter dans les Alpes. Ce n'est que depuis

10. Abréviation pour câble transporteur d'explosifs (voir ch. 7).

* Ce texte est extrait de *l'Homme et la neige* par Jean-Paul ZUANON, hormis le § 3.4 écrit par C. ANCEY.

le début du XX[e] siècle que techniques et matériels ont évolué de façon importante, le ski alpin devenant alors un sport à part entière.

3.1. Naissance et développement du ski

Nos lointains ancêtres du Nord ont connu le ski avant la roue. Des gravures datant de 4 000 avant J.-C. représentent des hommes sur des planches. En ces temps reculés, le ski répond à des nécessités vitales : se déplacer sur la neige, chasser, faire la guerre... Ainsi le ski est né pour des raisons utilitaires dans des pays froids et plats. Personne n'a eu l'idée ni l'audace de transposer cette technique sur des terrains raides et accidentés comme les Alpes. Durant des siècles, le matériel n'a guère évolué. Après des siècles d'une relative éclipse, le ski réapparaît sous une forme sportive au début du XIX[e] siècle. Les premiers concours sont organisés à Télémark, en Scandinavie, vers 1830. En 1888, l'explorateur Nansen réussit à skis la traversée du Groenland en 39 jours. Cet exploit a un retentissement considérable et contribue largement à la diffusion du ski sportif en Scandinavie. En revanche, l'implantation dans les Alpes est longue et difficile. Le ski suscite méfiance et sarcasmes. Tant le matériel que la technique semblent bien peu adaptés au relief alpin. Le dauphinois Henri Duhamel joue un rôle décisif dans l'introduction du ski en France. Après avoir acheté des skis en 1878 lors d'une exposition universelle, il tâtonne pendant onze ans pour trouver un système de fixations et une technique de descente satisfaisante. Enfin parvenu à ses fins, il commande quatorze paires à un fabricant finlandais pour les distribuer à ses amis. L'impulsion est donnée. La première étude sur le sujet paraît dans le *Moniteur dauphinois*; on y parle encore de skisme et de skiste et les conseils donnés sont encore bien sommaires : pour « tracer des courbes gracieuses », il « faut porter le poids du côté où l'on veut tourner. Si l'on est profane, enfoncer le bâton "à droite" dans la neige si l'on veut tourner à droite ». L'armée joue un rôle déterminant dans la diffusion du ski. Elle en voit surtout l'aspect utilitaire : de nombreux postes-frontière sont gardés tout l'hiver et les skis permettent d'aller plus rapidement qu'avec des raquettes.

En France comme en Italie ou en Autriche, ce sont des militaires qui organisent démonstrations et enseignement, souvent avec l'aide d'instructeurs venus de Scandinavie. Dès 1900, l'armée adopte officiellement le ski. Débuts modestes : il s'agit de tester quelques dizaines de paires de ski. Une école est créée à Briançon dès 1901. Dans son rapport, le capitaine Clerc insiste sur l'intérêt du ski, bien au-delà de son seul aspect militaire : ce peut être aussi un outil précieux pour les populations de montagne. Il faut donc œuvrer pour la propagation : on distribue parfois des skis aux stagiaires et on les incite à aller « porter la bonne parole » dans leur village. Les civils ne sont pas en reste, tout en étant plus sensibles à l'aspect touristique et sportif. Dès 1897, le docteur Paulcke traverse l'Oberland bernois. En 1903, le docteur Payot de Chamonix accompagné des guides Ravanel, Couttet et Simond réalise en partie la haute route Chamonix-Zermatt. Dès le début du XX[e] siècle, les premiers clubs sont créés, des compétitions sont organisées (le premier concours international a lieu au Mont-Genèvre en 1907). Le Club alpin et le Touring Club s'associent au travail de propagande fait par l'armée en distribuant brochures et matériel à des gendarmes, forestiers, facteurs... La maison Rossignol est fondée en 1910.

3.2. Développement du ski alpin

Toutefois, le matériel et la technique restent très dépendants des pays nordiques. L'autrichien Zdarsky est le premier à réclamer la rupture avec l'école nordique. Il écrit un manuel, préconise l'usage des skis courts, travaille à l'amélioration des fixations... Ce n'est qu'après la guerre que le ski alpin s'affranchit de la tutelle nordique.

Malgré les réticences scandinaves, les premiers jeux Olympiques d'hiver sont organisés à Chamonix en 1924 avec un programme exclusivement nordique. 1924 marque aussi la création de la FFS et l'organisation du premier combiné alpin (slalom + descente) à l'initiative de l'anglais Lunn. Celui-ci publie en 1930 "Le ski alpin" dans lequel il se félicite de voir que ce ski n'est plus la cendrillon. Longtemps rejeté en tant qu'art mineur, le ski alpin est enfin accepté par la FIS. En 1936, il devient sport olympique à part entière. Dès lors ski alpin et ski nordique vont évoluer séparément. Le premier s'affirme comme sport-vedette et prend le pas sur d'autres sports d'hiver. Il ne tarde pas à devenir le prétexte à un important équipement touristique de la montagne. Cette évolution est favorisée par l'apparition des remontées mécaniques au début des années trente. Après Lunn, l'autrichien Schneider codifie plus précisément l'enseignement du ski. C'est la méthode de l'*Arlberg*, basée sur le virage stemm et révolutionnaire par son caractère progressif. Largement diffusée dans toutes les Alpes, elle reçoit un coup mortel lorsque Seelos gagne le slalom des championnats du monde grâce à sa parfaite maîtrise du virage *skis parallèles*. Engagé comme entraîneur, Seelos mène l'équipe de France à la victoire aux championnats du monde de 1937 et 1938. Cette même année est créée l'école centrale de formation des moniteurs à Val-d'Isère, afin de remédier à la concurrence entre écoles et de dispenser un enseignement homogène.

En même temps que les techniques, les matériels ne cessent de se perfectionner. Les premières fixations à câble et les premières carres métalliques apparaissent. Aux skis de frêne en bois massif, succèdent les skis en hickory puis les skis contrecollés vers 1940. La victoire de Jean Vuarnet aux jeux Olympiques de 1960 consacre les skis métalliques tandis que Schranz fait découvrir au grand public les skis en fibre de verre. Aujourd'hui, la fabrication des skis fait appel à une dizaine de matériaux différents. Le ski a plus évolué en cinquante ans qu'au cours des quatre millénaires précédents. Il en va de même pour les matériels : fixations, bâtons, chaussures. Beaucoup de chemin a été parcouru en quelques dizaines d'années, depuis les premières fixations avec baguette de jonc jusqu'aux fixations très sophistiquées d'aujourd'hui. La technique a évolué, le niveau du skieur moyen s'est considérablement amélioré, le ski est devenu un sport de masse en même temps qu'un phénomène très médiatique. C'est l'activité la plus importante sur le plan économique en même temps que celle qui a le plus marqué paysage et mentalités en montagne.

3.3. D'autres pratiques

Si le ski alpin est aujourd'hui le sport d'hiver-roi, d'autres pratiques se sont développées au cours des dernières décennies. Longtemps confidentiel, le ski de fond ou ski nordique a été redécouvert par des milliers de personnes à l'occasion des jeux olympiques de Grenoble en 1968. En 1976, on estimait le nombre de fondeurs à 440 000 ; aujourd'hui ce nombre a plus que doublé. Quant au ski hors-pistes, il a connu un développement récent considérable. « S'éclater dans la poudreuse » fait largement partie des slogans et des publicités à la mode. Le ski de montagne ou ski-alpinisme, l'ancêtre du ski alpin, s'est fait également éclipser par sa prestigieuse cadette. Sa vocation était tout autre : le ski de montagne était la forme hivernale de l'alpinisme. C'est au début de notre siècle que commença la « deuxième conquête des Alpes » comme le dit Marcel Kurz. En trente ans, les principaux sommets de Suisse, d'Autriche et de France sont gravis par des skieurs : le mont Rose en 1898, le mont Blanc en 1901, le Grand Paradis en 1913, le dôme des Écrins en 1925... Pratique discrète jusqu'aux années 80, le ski de randonnée attire de plus en plus d'amateurs et des voix s'élèvent ici et là pour critiquer amèrement cette fréquentation qui conduit parfois à dénaturer le ski-alpinisme (compétitions, descentes transformées en champs de bosses, refuges saturés...) [7].

3.4. Et d'autres formes

En conclusion de son livre *Alpinisme hivernal*, Marcel Kurz écrit : « bientôt, on pourra tracer une haute route hivernale longeant le faîte des Alpes de Grenoble à Innsbrück, et le jour viendra sans doute où quelque enthousiaste parcourra les Alpes *from end to end*[11] ». Le 1er février 1933, après une préparation méticuleuse de son matériel, Léon Zwingelstein entreprend en solitaire la traversée des Alpes : de Grenoble à Nice, puis de Nice jusqu'au Dreiländerspitze à la frontière autrichienne, atteint le 6 avril [8]. En 1956, l'illustre alpiniste W. Bonatti a repris l'idée du "chemineau de la montagne"[12] avec quelques amis [9]. A moindre échelle, le raid à skis est l'une forme privilégiée du ski de randonnée; très tôt, des hautes routes ont été tracées par des pionniers : en 1903, la haute route Chamonix-Zermatt, en 1927, Nice-Chamonix, en 1932, la traversée du Grand-Paradis...

Parallèlement, l'évolution de la technique et des mentalités amèna certains skieurs à rechercher de plus en plus la difficulté et on a adjoint le qualificatif d'extrême au ski. Assez tôt, les skieurs s'attaquèrent à des sommets à caractère alpin; en 1930, le mont Blanc du Tacul est descendu par sa face nord-ouest. En 1935, deux autrichiens s'adjugent la face nord du Hochsten avec ses mille mètres à plus de 45°. En 1937, le champion E. Allais, M. Lafforgue et A. Tournier réussissent l'aiguille d'Argentières par le glacier du Milieu; en 1944, ils s'attaquent avec succès au pic de Neige-Cordier. En 1953, c'est au tour de la face nord du mont Blanc d'être descendue par le célèbre L. Terray. Mais il faut attendre pour qu'une étape supplémentaire dans la difficulté soit franchie : le suisse Sylvain Saudan descend en 1967 le couloir Spencer à l'Aiguille de Blaitière (massif du Mont-Blanc), puis le couloir Whymper à l'Aiguille Verte, le couloir Gervasutti au mont Blanc du Tacul, le Marinelli au mont Rose... A la même époque, de manière plus anonyme, œuvrent d'autres pionniers : l'italien H. Holzer réussit de grandes premières dans les Alpes (plus de cinquante premières prestigieuses avant 1969) tandis que Clément et Giraud descendent la face nord de la calotte des Agneaux dans l'Oisans, puis l'arête Mettrier dans la face nord des dômes de Miage. Tout s'accélère par la suite, c'est le début tonitruant des Vallençant, Baud, Chauchefoin, Détry, Anselmet, Cachat-Rosset, Bessat, etc. : on assiste à une véritable course aux sommets pour en réaliser les premières descentes, c'est aussi le temps des polémiques au sujet de l'hélicoptère. A la fin de la décennie, apparaît une nouvelle génération d'"extrémistes" : certains skieurs, notamment J.-M. Boivin et S. de Benedetti continuent cette recherche de la difficulté, enchaînent les descentes dans une même journée, etc. Boivin s'adjuge un grand nombre de premières ou de répétitions impressionnantes tant par leur ampleur que par leur difficulté : face est du Cervin, toutes les voies glaciaires de l'aiguille Verte (dont le fameux versant du Nant-Blanc), couloir nord des Drus... Derrière les lumières médiatiques, des anonymes de talent (G. Chantriaux, Izquierdo et tant d'autres) réalisent aussi de grandes premières dans d'autres massifs. La relève aujourd'hui semble assurée par de nombreux skieurs et surfers, tels que P. Tardivel, J. Ruby et E. Ballot. Réservé à une élite de skieurs, le ski extrême n'en connaît pas moins de nos jours un bel engouement et les pentes raides continuent d'attirer des amateurs à un point tel que A. Bertrand déplore dans son livre que le couloir Davin dans l'Oisans soit considéré par certains comme une "piste noire" [10].

11. Allusion au livre de sir CONWAY *The Alps from end to end*, relatant la traversée des Alpes à pied en 1894.

12. C'est le titre donné par J. DIETERLEN à son livre (Flammarion, Paris, 1938) retraçant l'épopée de Zwingelstein.

3.5. L'âge de l'Or Blanc

Les premières vraies stations datent de l'immédiat après-guerre. Le palace du Mont-d'Arbois à Megève est construit vers 1924 par la baronne de Rotschild. En 1930, Chamonix construit le téléphérique du Brévent. C'est aussi à cette époque que se développent des stations comme le Grand-Bornand, Valloire,

Vars, L'Alpe-d'Huez, Auron, le Revard... Ce développement est différent de celui que l'on connaît aujourd'hui. L'équipement reste l'affaire de ceux qui y vivent. Ce sont des opérations d'envergure limitée se greffant assez facilement sur des communautés locales existantes. Les sports d'hiver apparaissent comme un complément de l'agriculture. L'équipement est lent, empirique et résulte d'initiatives individuelles et de financements privés. Rares sont les groupes financiers qui prennent conscience de l'intérêt de cette nouvelle activité économique. Après la seconde guerre mondiale, c'est le décollage. Le tourisme devient un phénomène de masse. Le climatisme et surtout le tourisme hivernal continuent de se développer. C'est l'époque des stations de la première génération : les Contamines, Morzine, Villard-de-Lans, etc. viennent s'ajouter aux stations qui avaient amorcé leur développement avant la guerre. Les années cinquante marquent l'apparition de stations de la seconde génération, caractérisées par une intervention accrue des pouvoirs publics. A la fin de la seconde guerre et sous l'influence d'idées généreuses nées pendant la Résistance, un mouvement s'était dessiné en faveur d'une démocratisation du ski. Dès 1946, le département de la Savoie décide de créer une station de tourisme populaire sur le site de Courchevel. On trouve à l'origine de cette expérience quelques justifications qui seront fréquemment invoquées par la suite pour expliquer de tels aménagements : « la neige pour tous », création d'emplois, revitalisation de l'économie montagnarde. Pour la première fois, une collectivité publique s'engage directement dans l'équipement hivernal de la montagne. Les années soixante, marquées par la grandeur gaullienne, sont aussi celles de l'explosion de l'ère du tourisme et des loisirs de masse. Cette décennie est celle du grand boum de l'or blanc. L'un des objectifs du V[e] plan (1965-1971) est d'équilibrer la balance commerciale de la France grâce au tourisme, 65 000 lits nouveaux de classe internationale susceptibles de concurrencer la Suisse devraient être créés. Cette politique dite du Plan Neige va être encouragée et coordonnée par l'Etat, avec l'intervention massive de grands groupes financiers. Elle s'appuie sur quelques grands principes :

- il faut maîtriser le foncier, chose relativement facile dans la mesure où ces stations sont édifiées en site vierge, à haute altitude ;
- conception, construction et gestion doivent être coordonnées sinon unitaires. C'est en ce sens que l'on parle de stations "intégrées" ;
- fonctionnalité avant tout : il faut faciliter la pratique du ski. Ce n'est pas sans raison que l'on parle d'"usine à skis". Cette doctrine se concrétise par la construction d'une série de stations de la troisième génération dont La Plagne (1961) a été le prototype : les Ménuires, Val-Thorens, les Arcs, Praloup, Isola 2 000, Avoriaz, Flaine...

Les années soixante-dix sont cependant marquées par la remise en cause de ce modèle d'aménagement. La crise de l'hiver 1970-71 révèle les limites du Plan Neige. Certaines stations connaissent des difficultés de commercialisation. Des projets de stations nouvelles échouent : en Vanoise, l'opinion publique mobilisée parvient à faire annuler une décision de déclassement et d'amputation du parc (1968-71). A Cervières (Hautes-Alpes), les habitants rejettent un projet de superstation. Les avalanches de février 1970 ont en outre rappelé ou fait découvrir que la montagne pouvait être dangereuse ou meurtrière. Un mouvement déjà ancien mais jusque-là marginal de contestation des grandes stations s'amplifie. Dès 1967, Samivel avait publié *le Fou d'Edenberg*, roman qui était une sévère critique de certaines formes de développement touristique. Même le ministre Poujade critique les *Sarcelles des neiges*, tandis que le président de la République lui-même déplore dans son discours de Vallouise en août 1977 que « des sites de montagne entiers soient parsemés de constructions hétéroclites et désordonnées ». Que reproche-t-on à ces stations ? D'être le plus souvent des opérations parachutées dont les gens

du pays sont exclus. Elles aboutissent à une privatisation de l'espace au profit de quelques privilégiés, tout en ayant largement recours à des financement publics. La totalité des appartements d'une station n'est jamais occupée plus de quelques semaines par an. La plupart de ces usines à skis sont des échecs sur le plan architectural et urbanistique. Enfin, les emplois promis s'avèrent moins nombreux que prévus. Les objectifs du sixième plan sont donc revus à la baisse. L'accent est mis sur la moyenne montagne, le développement du ski de fond, l'aménagement des stades de neige sans structures d'hébergement (comme à Margeriaz). On insiste sur une meilleure recherche urbanistique et architecturale (comme à Valmorel), sur un tourisme plus social et intégrant mieux les locaux dans le paysage (les Karellis), une meilleure banalisation des hébergements devant assurer un meilleur remplissage. En outre la "directive-montagne" du 22 novembre 1977 introduit une nouvelle procédure, dite des *unités touristiques nouvelles* (UTN), censée mieux maîtriser le développement. Très controversée et souvent qualifiée de tribunal par les élus locaux, elle n'a pas modifié de manière significative ni le volume des autorisations de construire, ni le processus de développement. On peut cependant inscrire à son actif une meilleure concertation, la réorientation de certains projets. Il y a même eu exceptionnellement des refus sur des dossiers très sensibles (comme celui de Carlaveyron) ou face à des projets irréalistes. Ces quatre générations de stations ont poursuivi parallèlement et simultanément leur croissance. Aujourd'hui, malgré le ralentissement dans la croissance de la fréquentation, la morosité économique, les années sans neige, le risque de surcapacité, la nécessité de mettre en valeur le facteur *'qualité'* et non plus *'quantité'*, on assiste parfois à une fuite en avant : les stations étendent le réseau de remontées mécaniques, le densifient, créent de nouveaux lits sans que leur propre rentabilité soit toujours bien assurée, ce qui a conduit certaines stations de ski à de graves difficultés financières, voire au dépôt de bilan [11].

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] E. CLOUZOT : *L'enneigement dans le Queyras au 17e et 18e siècle*, La Géographie (1916) 252-260.
[2] A. BIGALLET : *La vie d'hiver dans le Haut-Vénéon*, Revue de Géographie Alpine **10** (1922) 625-634.
[3] J. VOUILLOZ, *Le Mont-Blanc*, mai-juin (1978) pp. 22-23.
[4] A. ALLIX : *L'Oisans, étude géographique* (1928, A. Colin, Paris) 915 p.
[5] A. ILLAIRE : *La vie dans une cellule de haute montagne : Saint-Christophe-en-Oisans*, Revue de Géographie Alpine **41** (1953) 695-723.
[6] FR3 : reportage *Montagnes* ; émission du 5 mars 1994 sur Rémy Turc.
[7] D. ANKEL : *Le boom du ski-alpinisme*, Alpirando **152**, mars 1992.
[8] L. ZWINGELSTEIN : *Carnet de routes* (1989, Glénat, Grenoble) 72 p.
[9] W. BONATTI : *A mes montagnes* (1962, Arthaud, Grenoble) 275 p.
[10] A. BERTRAND : *Les cent plus belles courses et randonnées à skis dans le Haut-Dauphiné* (1984, Denoël, Paris) 239 p.
[11] V. SHAHSHAHNI : *Où va la neige ?*, Alpirando **138**, décembre 1990.
Ont également servi dans la rédaction de ce chapitre les références suivantes :
– A. ALLIX : *Les avalanches de l'hiver 1922-23 en Dauphiné*, Revue de Géographie Alpine **11** (1923) 513-527.
– L. ANCHIERRI : *La vie en montagne et les avalanches*, Bulletin de la fédération française des études montagnardes **14** (1963-64) 537-561.
– Y. BALLU : *L'épopée du ski* (1981, Arthaud, Grenoble).
– H. BESSAT : *Lieux et mémoires de l'Alpe, toponymie des alpages en Savoie et Val d'Aoste* (1993, Ellug, Grenoble) 230 p.
– R. CLÉMENT, E. PAHAUT et B. HAUDECŒUR : *La neige et les avalanches de janvier 1978 dans les Alpes françaises*, Revue de Géographie Alpine **67** (1979) 113-123.
– F. et C. GARDELLE : *Vallorcine, histoire d'une vallée entre Aoste, Mont-Blanc et Valais* (1988, Textel, Lyon) 173 p.
– F. GEX : *Les avalanches de l'hiver 1922-23 en Savoie*, Revue de Géographie Alpine **11** (1923) 487-512.
– F. GEX : *Le climat de 1927 en Savoie*, Revue de Géographie Alpine **16** (1928).
– J.-P. ZUANON : *L'homme et la neige* (1988, musée-château d'Annecy, Annecy) 50 p.

Chapitre 2
ÉLÉMENTS DE MÉTÉOROLOGIE DE MONTAGNE*

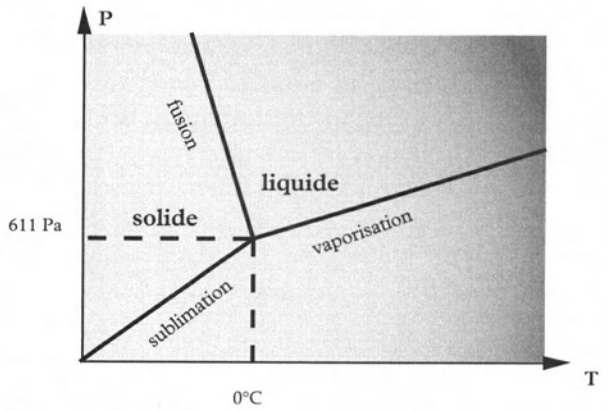
L'objet de ce chapitre est de donner quelques éléments de météorologie de montagne. Le premier paragraphe rappelle des notions de physique (thermodynamique) qui permettent de comprendre un peu mieux ce qui se passe dans l'atmosphère. Le second dresse un tableau des principaux éléments intervenant dans l'évolution du temps en montagne. Le troisième paragraphe entre un peu plus dans le détail en décrivant le scénario-type d'une dépression sur les zones tempérées tandis que le quatrième ouvre une parenthèse sur quelques phénomènes météorologiques particuliers des zones de montagne tels que le foehn. Enfin un dernier paragraphe est consacré aux chutes de neige et au transport de neige par le vent.

1. QUELQUES NOTIONS DE PHYSIQUE

Avant d'aller plus en avant dans la description des phénomènes météorologiques, il n'est pas inutile de donner ou de rappeler quelques propriétés physiques de l'eau. L'eau désigne tout à la fois la molécule (composée de deux atomes d'hydrogène reliés à un atome d'oxygène) et la matière composée d'un grand nombre de ces molécules. Un tel ensemble moléculaire peut exister sous trois états (ou phases) différents :

– solide : *glace*;
– liquide : *eau liquide*;
– gazeux : *vapeur d'eau.*

Ce sont la *température*[1] et la *pression*[2] qui conditionnent la phase sous laquelle se trouve l'eau : considérons un récipient fermé contenant une certaine quantité d'eau et supposons que l'on puisse faire varier la pression et la température au sein du récipient. Selon la valeur du couple pression/température, l'eau se trouve dans l'une de ces trois phases possibles, comme on l'indique dans la figure 1. Dans certains cas (le long des lignes frontières séparant chaque phase sur la figure 1), plusieurs phases peuvent coexister dans le récipient. Sur la figure 1, on distingue 3 courbes frontières : les courbes de *fusion, sublimation* et *vaporisation* constituent les lieux où s'effectuent les changements de phase de l'eau. Ces courbes se rencontrent en un point, appelé *point triple*[3], où l'eau existe sous ses trois phases. On rappelle dans la figure 2 la définition des changements de phase.



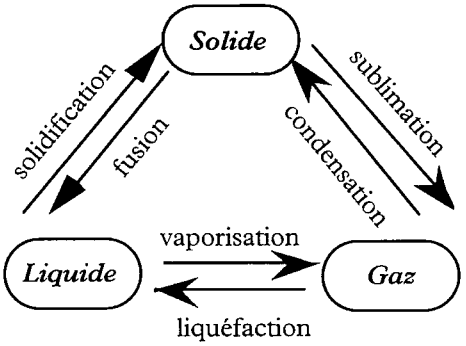
➡ Figure 1 : diagramme des phases en fonction de la température (T) et de la pression P. Les coordonnées du point triple sont indiquées.

* Les sections 3 et 4 de ce chapitre ont été écrites par Jacques VILLECROSE (ingénieur-divisionnaire à Météo-France et prévisionniste au Centre Départemental de Météorologie de Saint-Martin-d'Hères) avec la participation de Patrick BORNUAT (chef du Centre Départemental de Météorologie de Tarbes). Le reste a été rédigé par Christophe ANCEY.

1. Nous utiliserons comme unité de mesure de la température le degré celsius (abrégé °C).

2. Nous utiliserons comme unité de mesure de la pression le pascal (abrégé Pa). La pression atmosphérique vaut environ 10^5 Pa.

3. Ce point est atteint pour une température de T=0 °C et une pression P=611 Pa.



→ Figure 2 : désignation des différents types de changements de phase selon le sens de ce changement.

Pour passer d'une phase à l'autre, il faut fournir ou retirer de l'énergie au système : par exemple, pour faire fondre un glaçon maintenu à une température de 0 °C, il faut fournir une quantité de chaleur supplémentaire de 334 joules[4] par gramme d'eau. Inversement, pour solidifier un gramme d'eau liquide à 0 °C, il faut retirer 334 J. On appelle par la suite *chaleur latente* la quantité de chaleur échangée au cours d'un changement de phase.

2. L'ATMOSPHÈRE

2.1. La composition de l'atmosphère

L'atmosphère est une mince pellicule (quelques kilomètres d'épaisseur) qui entoure le globe terrestre. Elle est composée d'un mélange de gaz (azote, oxygène...). L'eau y est également présente sous les trois états : gazeux, liquide (nuage), solide (neige, grêle). La phase gazeuse est largement dominante. L'air ne peut pas contenir n'importe quelle quantité de vapeur d'eau à une température et à une pression données : il existe une valeur limite, appelée *seuil de saturation*, au-delà de laquelle la vapeur d'eau se condense sous forme liquide ou solide selon la température. Ce mécanisme de condensation est fondamental car il conditionne les précipitations de pluie ou de neige. La valeur du seuil de saturation est une fonction croissante de la température : ainsi à 20 °C, l'air peut contenir jusqu'à 17,2 g de vapeur d'eau par m^3 tandis qu'à 0 °C, le seuil de saturation est de 4,8 g. Pour savoir si l'air est saturé ou non, les météorologistes emploient le taux d'humidité (mesuré avec un hygromètre) qui est le rapport de la quantité de vapeur d'eau contenue sur le seuil de saturation (à convertir en %).

♀ Une expérience simple permet de se faire une idée du phénomène de condensation. Lorsque l'on chauffe une casserole d'eau, il faut attendre un certain moment pour que l'eau évaporée condense sous forme de buée sur les parties les plus froides de la pièce.

2.2. Champ de pression

La structure de l'atmosphère est complexe et, à l'échelle planétaire, de grands ensembles tourbillonnaires apparaissent sous l'effet conjugué de la rotation de la Terre (force de Coriolis) et de la répartition inégale de la température à la surface de notre planète. Celle-ci résulte du bilan entre énergie reçue (rayonnement solaire) et celle perdue (rayonnement terrestre). Le bilan est positif dans les régions équatoriales et tropicales, mais largement négatif aux pôles. Ce déséquilibre entraîne entre les régions froides et les régions chaudes des échanges thermiques plus ou moins réguliers, dont la trajectoire est fortement perturbée par la rotation de la Terre sur elle-même.

Si celle-ci n'intervenait pas, on pourrait imaginer un mécanisme de circulation atmosphérique très simple qui se résumerait à une seule cellule convective : chauf-

4. Nous utiliserons comme unité de mesure de la chaleur le joule (abrégé J).

fé à l'équateur, l'air s'élèverait en altitude (mouvement ascendant) puis prendrait directement la route du nord pour combler le déséquilibre thermique du globe. Ce faisant, il se refroidirait peu à peu. Devenu trop froid, donc trop lourd, au niveau des pôles, il finirait par "retomber" sur les régions polaires (mouvement descendant). Les mouvements descendants provoquent une augmentation de la pression atmosphérique ; à l'inverse les mouvements ascendants provoquent une diminution de la pression atmosphérique. Nous n'aurions donc, dans le scénario simplifié proposé, qu'une zone de hautes pressions au niveau des pôles et qu'une zone de basses pressions au niveau de l'équateur.

La réalité est bien différente. La rotation de la Terre sur elle-même entraîne la dislocation de la cellule convective précédemment décrite en une chaîne de cellules plus petites ; et, consécutivement, l'apparition d'un chapelet de zones permanentes ou semi-permanentes de basses et de hautes pressions ceinturant le globe et dont la position exacte varie suivant la saison.

Ainsi distingue-t-on par exemple les zones de hautes pressions subtropicales, dont le fameux anticyclone des Açores ; à noter que d'autres anticyclones, comme l'anticyclone Sibérien, résultent essentiellement d'effets thermiques saisonniers (important refroidissement hivernal de l'air dans les basses couches) et non de la circulation atmosphérique générale qu'ils peuvent d'ailleurs contrarier.

Aux latitudes moyennes (grosso modo entre les parallèles 40° et 60°) il apparaît des centres d'action dépressionnaires, mobiles et à la durée de vie limitée. Ces dépressions résultent de véritables à coups (ou turbulence) dans les mécanismes des échanges air chaud-air froid. Elles donnent naissance aux perturbations nuageuses de grande étendue dont le passage, comme nous le verront plus loin, occasionne à nos latitudes de fréquents changements de temps.

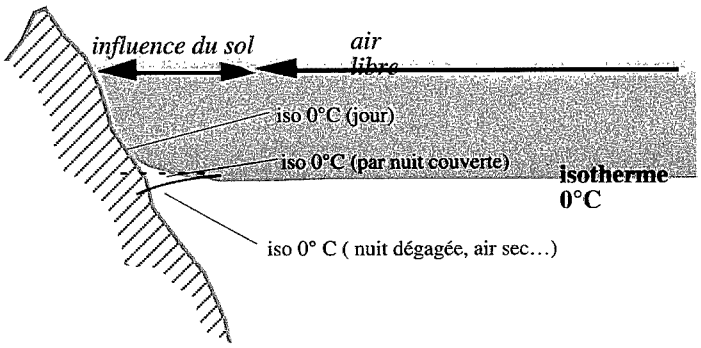
Le qualificatif 'basse'ou 'haute'est choisi en référence à une pression normale (standard) prise au niveau de la mer (à 15 °C) : P_{mer} = 1 013,3 hPa =760 mm de mercure. Mais cette pression varie beaucoup dans le temps et l'espace. Dans nos régions, elle fluctue généralement entre 950 et 1 050 hPa. Ces champs de pression sont responsables de grands mouvements d'air, dont la vitesse augmente quand la pression diminue, ou plus exactement quand il existe un gradient de pression entre deux points. En outre la pression décroît régulièrement quand l'altitude augmente (c'est ce principe qui est utilisé pour les altimètres). Vers 3 000 m, la pression atmosphérique baisse d'un tiers par rapport à la pression au niveau de la mer. Vers 5 000 m, ce rapport n'est plus que de la moitié.

2.3. Champ de température

Le perpétuel déséquilibre de l'atmosphère à l'échelle du globe est encore renforcé par un déséquilibre au niveau local où l'influence du relief et des courants thermiques devient prépondérante. On peut dire de manière grossière que les grandes structures liées aux champs de pression provoquent des déplacements horizontaux tandis que les effets thermiques et le relief sont la cause de courants verticaux. L'air froid plus dense que l'air chaud a tendance à glisser vers les couches inférieures de l'atmosphère et inversement l'air chaud aura tendance à remonter vers les couches supérieures de température *normale* plus froide : ce sont les courants de convection qui assurent à l'échelle locale l'équilibre (plus ou moins stable) de l'atmosphère et la formation des nuages par condensation de la vapeur d'eau. La température est donc le deuxième agent important dans la dynamique de l'atmosphère. Dans des conditions normales, on observe que la température décroît à peu près linéairement (en moyenne entre 0,6 et 0,7 °C tous les cent mètres) tant que l'on ne s'éloigne pas trop de la troposphère (entre 0 et 11 km d'altitude).

Pour se faire une idée rapide du champ de température au sein de l'atmosphère, on cherche souvent à connaître la position des *isothermes* (0° et - 10 °C). L'isotherme 0 °C représente la surface, plus ou moins accidentée, qui regroupe

les points de l'atmosphère où la température est égale à 0 °C en *atmosphère libre* (loin de l'influence du sol). Au-dessus de cette surface, la température de l'air est négative et devient positive au-dessous d'elle. Sa connaissance est dès lors fondamentale car elle renseigne grossièrement sur l'état thermique de l'atmosphère, et plus ou moins directement sur la limite possible pluie/neige ou encore l'altitude au-dessus de laquelle on peut s'attendre à un regel nocturne. Elle est déterminée par le lâcher biquotidien de ballons-sondes à partir de 7 stations couvrant le territoire national. L'isotherme 0 °C ne subit que peu de variation d'altitude entre le jour et la nuit. En revanche, des changements météorologiques (comme le passage d'une dépression) peuvent entraîner des variations importantes de l'isotherme 0 °C, à cause du changement des masses d'air.



➡ Figure 3. Température au sol et isotherme 0 °C en fonction des conditions météorologiques et de l'heure.

La transformation glace/eau n'étant pas immédiate, la limite pluie/neige se situe en général 300 à 400 m au-dessous de l'isotherme O° C. Mais, dans certaines conditions, elle peut descendre beaucoup plus bas (jusqu'à 1 000 m au-dessous), notamment lorsque les précipitations sont très intenses. Dans ce cas, la fonte de la neige demande beaucoup d'énergie; celle-ci étant puisée dans la couche d'air (chaleur latente), un refroidissement supplémentaire se propage vers le sol à condition qu'il n'y ait pas trop de vent. Ce phénomène s'observe assez fréquemment sous de puissants *cumulonimbus* (au printemps, par exemple) mais également l'hiver dans certaines régions comme le nord du sillon rhodanien et plutôt par régime perturbé du sud-ouest. Dans ce dernier cas, pour peu que la masse d'air de basse couche soit en situation d'isothermie faiblement positive, des chutes de neige se produisent jusqu'en plaine avec un isotherme 0 °C situé théoriquement vers 1 500 m, d'où quelques mauvaises surprises pour les automobilistes et les météorologistes... Le gel nocturne dépend non seulement de l'altitude de l'isotherme mais aussi de la nébulosité, de la nature du sol (sol enneigé, sec...), du profil de la pente... De manière grossière, on peut tout de même préciser que :

- lorsque le ciel est dégagé, que l'air est sec, et qu'il n'y a pas de vent, la limite de gel est largement au-dessous de l'altitude de l'isotherme 0 °C. Dans le cas de la neige (importantes pertes calorifiques par rayonnement infrarouge durant les nuits dégagées), il est fréquent de trouver une croûte de regel plusieurs centaines de mètres au-dessous de l'isotherme 0 °C;
- lorsque le ciel se couvre de nuages (effet de serre), la limite de regel est approximativement l'altitude de l'isotherme 0 °C. La présence de végétation (sous-bois) joue un rôle similaire aux nuages en réfléchissant le rayonnement infrarouge.

Il faut par ailleurs noter qu'il peut exister plusieurs isothermes 0 °C dans l'atmosphère : ce phénomène appelé *inversion de température* se rencontre par exemple l'hiver dans les basses vallées alpines qui sont recouvertes d'une épaisse chape nuageuse alors que le soleil brille généreusement sur les hauteurs; c'est la mer de nuage.

☞ On retiendra que la pression et la température sont les deux principaux agents qui gouvernent la dynamique infiniment complexe de l'atmosphère. Pour

l'étude de celles-là, les centres de météorologie sont amenés à dresser des cartes de champs de pression et des profils de température. Pour avoir une idée du champ de pression, on trace une carte avec des courbes isobares, qui sont les courbes le long desquelles la pression reste constante (principe semblable aux courbes de niveau sur une carte topographique). En ce qui concerne la température, les météorologues cherchent à connaître le profil vertical de température (mesures réalisées avec un ballon-sonde). Les bulletins météorologiques donnent ainsi la valeur de l'isotherme 0 °C ou -10 °C : c'est-à-dire l'altitude à laquelle la température de l'air ambiant est de 0 °C ou -10 °C.

2.4. Le vent

2.4.1. Le vent synoptique

Les différences de pression à la surface du globe donnent naissance à des mouvements d'air : on appelle *vent synoptique* ce mouvement régi à l'échelle terrestre par les champs de pression. On caractérise le vent par sa direction et par son intensité : la direction indique d'où vient le vent et l'intensité traduit la force qu'il exerce sur les obstacles (en fonction de sa vitesse).

➠ Un vent de nord-ouest de 30 km/h est un mouvement d'air dirigé du nord-ouest vers le sud-est avec une vitesse de 30 km/h par rapport au sol.

A l'échelle planétaire, ces mouvements initialement dirigés vers les basses pressions sont contrariés par la force de Coriolis qui est un effet résultant de la rotation de la terre sur elle-même : le vent est ainsi dévié et tend à prendre une direction parallèle aux courbes isobares. C'est pour cela que les dépressions ont une structure en spirale si caractéristique sur les photographies prises de satellite et que le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'un anticyclone de l'hémisphère nord (et dans le sens opposé pour une dépression).

2.4.2. Le vent local

A l'échelle locale, le vent subit l'influence du sol et du relief qui modifient son intensité et sa direction. Le sol a pour effet de freiner l'air mais en même temps au contact des versants, des crêtes, et des cols sa vitesse est accélérée. Le relief va forcer le vent à changer de direction pour le contourner latéralement ou passer par dessus. De plus, localement, les effets thermiques et les variations de pression influent considérablement sur le vent. Il est donc très important de retenir qu'en altitude, les caractéristiques du vent synoptique (direction, intensité) sont liées aux conditions météorologiques (champs de pression et de température) ; lorsqu'on s'approche du sol, ces caractéristiques sont modifiées par le relief. Par ailleurs en montagne, on distingue les *versants au vent* et *sous le vent*, selon que le vent souffle contre la pente ou non.

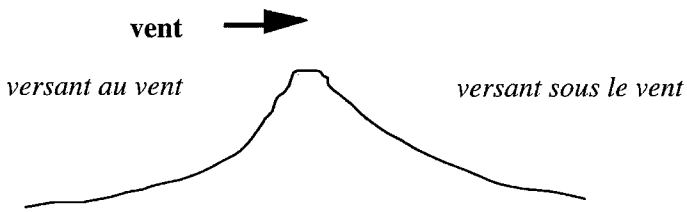


Figure 4 : définition des versants au vent et sous le vent.

➠ En pratique, il est assez facile de constater qu'au passage d'un col ou d'une ligne de crête l'intensité du vent est nettement augmentée. En outre, des changements de direction du vent (par rapport au vent synoptique) sont fréquents en zone de montagne : ainsi dans la vallée de la Tarentaise pour un flux d'altitude provenant de l'est, le foehn prend une orientation sud à Val-Thorens et nord-est à La Rosière (les effets thermiques semblent jouer un rôle important dans ce cas-ci).

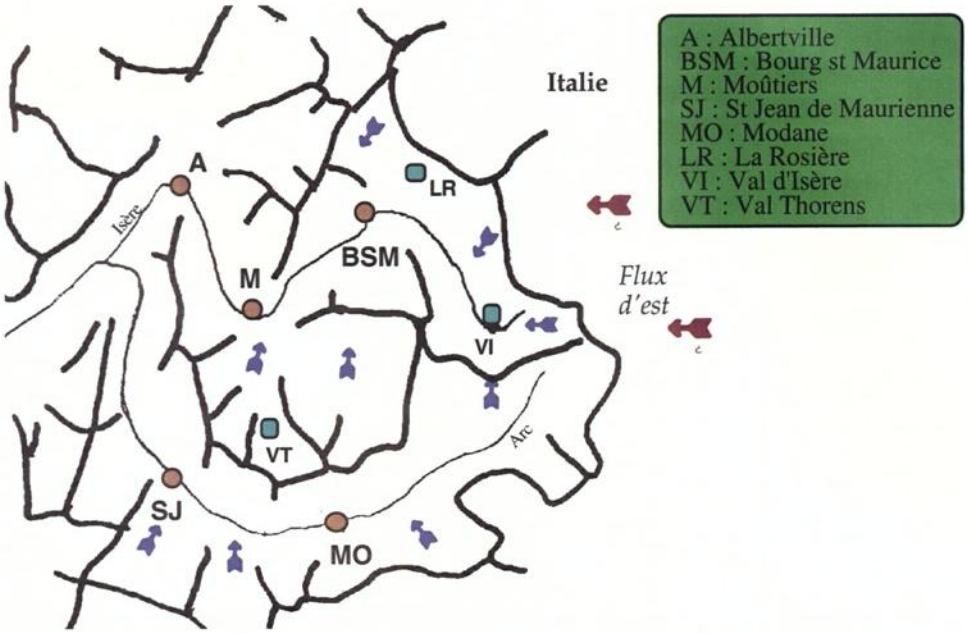


Figure 5. Carte d'écoulement de foehn dans les vallées de la Maurienne et de la Tarentaise. D'après [10].

2.5. Les nuages

Les nuages sont composés, pour une grande part, de micro-gouttelettes d'eau liquide et solide en suspension, qui résultent de la condensation de la vapeur d'eau ; un tel processus est toujours issu dans l'atmosphère d'un refroidissement. Les origines de ce refroidissement peuvent être diverses mais il est souvent consécutif à une *détente*, c'est-à-dire à une diminution de pression. Une masse d'air, saturée ou non au départ, qui subit une détente, libère le surplus de vapeur d'eau sous forme généralement liquide (même si la température est négative, par effet de surfusion), parfois sous forme solide quand la température est très basse (-40 °C environ) : c'est le cas des nuages se formant à très haute altitude (6 à 8 000 m) du type *cirrus* ou *cirrostratus* dont la composition uniquement cristalline[5] explique le phénomène du halo (diffraction des rayons du soleil par les cristaux de glace).

⚲ Un exemple courant de détente est donné par les bombes à aérosol : lorsque l'on pulvérise un gaz initialement contenu dans une bombe, celui-ci se détend car son volume augmente. Sa température baisse inversement et refroidit la surface de la bombe.

Ce processus initial est suivi, dans certaines conditions de température et en présence d'impuretés atmosphériques (noyaux de condensation), de phénomènes de condensation solide qui aboutissent à la naissance, au grossissement puis à la chute vers le sol des cristaux de glace dont le destin final va dépendre de la structure thermique de la masse d'air. On aura alors soit de la neige, soit de la pluie (cf. § 5). Certains nuages peuvent se former localement en raison d'un renforcement du vent au voisinage d'une crête ou d'un sommet se trouvant, à cause de son altitude, à proximité d'une tranche d'air humide ("âne" sur le mont Blanc par exemple) ou d'un réchauffement important du sol qui, si la masse d'air est suffisamment instable, va se propager vers le haut et donner naissance aux nuages à forte extension verticale (dits d'évolution diurne) du type *cumulus* ou *cumulonimbus*. Mais les formations nuageuses les plus étendues se rencontrent généralement au voisinage des perturbations atmosphériques.

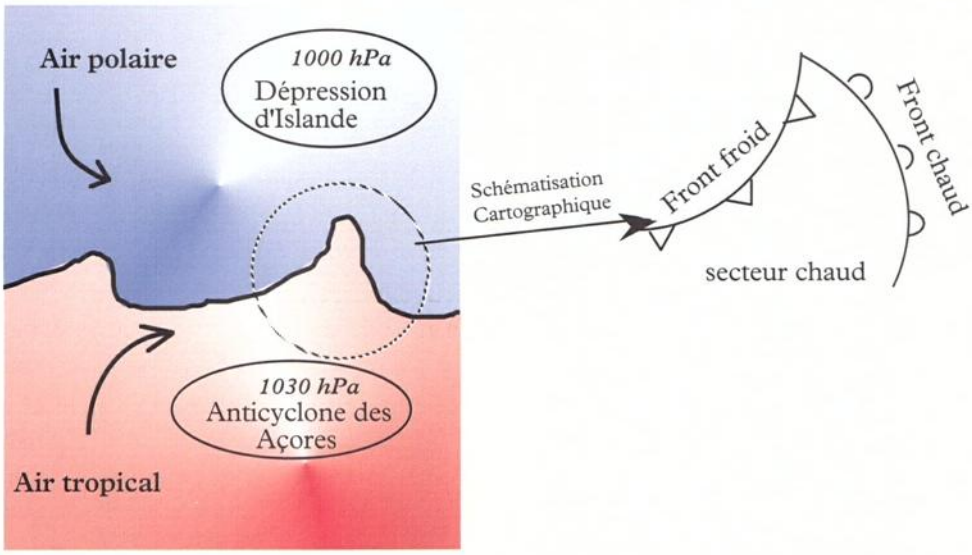
5. c'est-à-dire que le nuage ne comporte que des cristaux de glace.

3. La perturbation

3.1. La naissance d'une perturbation

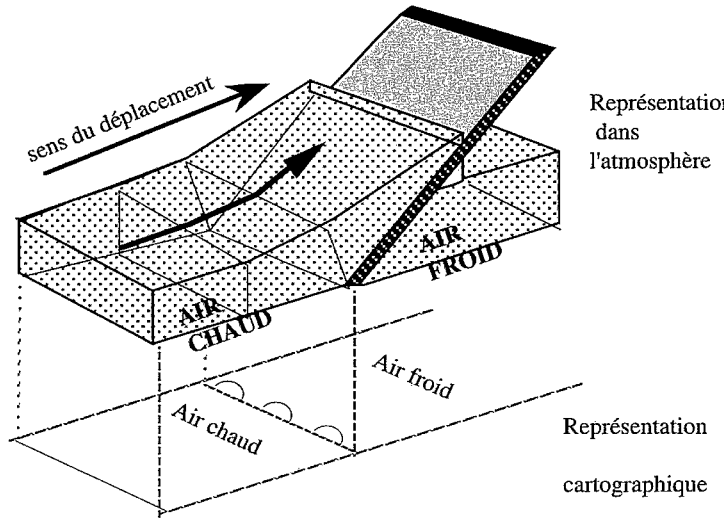
En raison de la circulation atmosphérique générale, les masses d'air froid polaire et chaud tropical se côtoient le long de zones ou lignes de courants de vents forts en altitude appelés *courant-jet*. Ce contact ne reste pas éternellement pacifique car ces axes de courant-jet sont animés de turbulences qui donnent naissance à des couples dépression-perturbation dont la vie et la mort vont ensuite conditionner en grande partie le temps tel que nous le ressentons en régions tempérées.

Très schématiquement, on peut dire que l'air froid, dense, a tendance à s'écouler vers le sud et qu'en échange l'air chaud s'efforce de progresser vers le nord. Ces zones d'échange constituent les dépressions dont le centre se comporte comme un véritable tourbillon, lui-même entraîné par le flux général (en majorité d'ouest à nos latitudes). L'effet d'aspiration vers le centre du tourbillon (convergence) provoque un enroulement en spirale ou en "coquille d'escargot" si caractéristique sur les images satellite ; c'est un phénomène comparable au tourbillon généré par un siphon lorsque l'on vide une cuve d'eau par exemple.



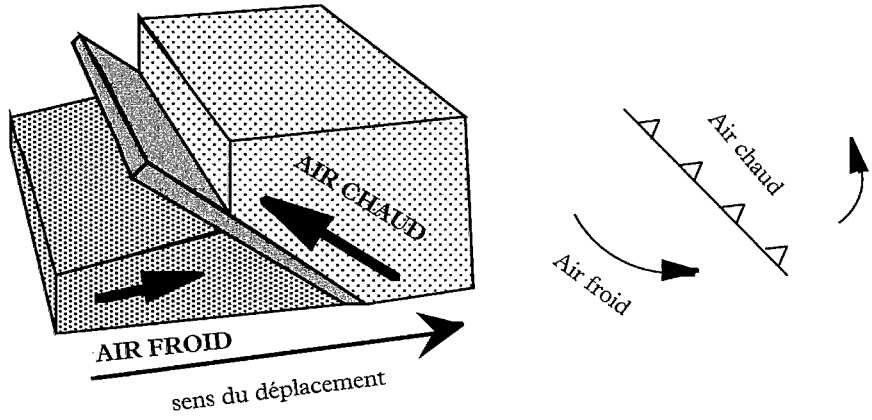
➟ Figure 6 : la perturbation née de la zone de contact (rencontre des masses d'air tropical et polaire) provoque un enroulement en spirale caractéristique sur les vues de satellite. D'après [1].

Dans le même temps l'air chaud, plus léger que l'air froid environnant, est en permanence rejeté en altitude. La zone de contact entre les deux s'établit donc selon des surfaces (plus ou moins) faiblement inclinées que l'on appelle *surfaces frontales* dont l'intersection avec le sol constitue des lignes appelées *fronts* qui composent la perturbation proprement dite. Lorsque le déplacement de ces lignes est impulsé par de l'air chaud, celui-ci, au cours de son effort pour remplacer (littéralement laminer) l'air froid antérieur, est obligé du fait de sa faible densité de passer au-dessus de ce dernier, de se soulever : on parle de *front chaud.*



➟ Figure 7 : dans le cas d'un front chaud, l'air chaud monte lentement au-dessus de l'air froid. Comme la surface frontale est faiblement inclinée, le front s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres. Les cartes météorologiques ne peuvent pas rendre compte de l'étalement de la surface frontale en altitude. Pour le représenter sur une carte, on trace l'intersection de la surface frontale avec le sol. La frontière ainsi délimitée est appelée front chaud, et on la représente comme l'indique la figure, par une ligne continue avec des demi-cercles pointés vers la masse froide. D'après [1].

Lorsqu'au contraire l'impulsion vient de l'air froid, celui-ci du fait de sa forte densité se déplace comme un coin qui serait dirigé vers le sol et il soulève devant lui l'air chaud plus léger : on parle alors de *front froid.*



➟ Figure 8 : dans le cas du front froid, l'air chaud est chassé par l'air froid et rejeté violemment en altitude. La surface frontale est fortement inclinée, le front s'étend sur quelques dizaines de kilomètres. Le principe de représentation est identique au cas précédent. Le front froid est schématisé comme indiqué sur la figure. D'après [1].

Dans les deux cas, le *soulèvement* de l'air chaud en altitude provoque des phénomènes de détente et donc une très forte condensation. En définitive, il y a apparition le long des lignes frontales de zones nuageuses très étendues et suffisamment épaisses pour provoquer des précipitations. Enfin, au cours de l'évolution d'une perturbation (et notamment là où l'air froid se déplace très rapidement) l'air froid rejette tout l'air chaud en altitude et parvient à rattraper une autre masse d'air froid aux caractéristiques différentes, puis à entrer en contact avec lui : on parle alors d'*occlusion.*

3.2. Le voyage d'une perturbation

Chaque perturbation amène son lot de nuages et de précipitations mais aucune n'est exactement semblable à l'autre. Chacune a sa propre signature que le météorologiste, avec plus ou moins de succès, essaye de déchiffrer à l'avance. On peut néanmoins décrire le scénario "type" du passage d'une perturbation océanique, c'est-à-dire circulant dans un flux général de sud-ouest à nord-ouest, tel qu'il peut être observé d'un point donné de notre continent. Comme on va le voir, le fait de se placer en montagne va modifier sérieusement (souvent dans un sens aggravant, parfois au contraire de façon positive) les phénomènes atmosphériques résultant du passage de la perturbation.

On peut découper ce scénario en trois phases :

- l'arrivée de l'air chaud (*front chaud*) ;
- la zone de transition entre le *front chaud* et le *front froid* ;
- l'arrivée de l'air froid (*front froid*).

3.3. Vers le chaud

L'arrivée de l'air chaud (ou si l'on préfère l'approche d'un front chaud) se manifeste d'abord à haute altitude par l'apparition de nuages fibreux plus ou moins espacés (*cirrus*) qui, si l'aggravation est sérieuse, sont bientôt remplacés par des voiles grisâtres de plus en plus épais de *cirrostratus* (halo). Ces nuages peu dangereux pour l'alpiniste, puisqu'évoluant largement au-dessus des sommets, ne font qu'altérer la qualité de l'ensoleillement mais, si le voile est suffisamment épais, ils peuvent modifier le bilan thermique à la surface de la neige, empêchant par exemple un dégel significatif. La pression atmosphérique peut être déjà en baisse sensible. Le vent généralement se renforce, au moins sur les hauts sommets où il s'oriente généralement (tout au moins dans le cas d'une circulation océanique) au sud-ouest. On se trouve dans ce que les météorologistes appellent la *tête* et qui n'est rien d'autre que la marge rapprochée de la perturbation.

➠ On peut noter à ce sujet que l'apparition de cirrus et de cirrostratus annonce souvent une dégradation plus ou moins rapide des conditions météorologiques, mais pas toujours. La partie active du front chaud peut en effet passer nettement plus au nord, cas fréquent dans les Alpes du Sud et les Pyrénées en régime océanique, ou bien ces nuages ne sont pas associés à une perturbation organisée et ne font, d'une certaine manière, que passer, pris dans un rapide courant général d'altitude qui peut être, lui, franchement anticyclonique sur nos régions et provenant de "champs de bataille" dépressionnaires très éloignés.

Mais généralement la concomitance de ces nuages, d'un renforcement du vent et d'une forte baisse de la pression constitue un indice assez fiable d'aggravation sérieuse qui va trouver sa confirmation, au fil des heures, par l'arrivée d'*altostratus* (voile épais mais encore translucide par endroit) et (ou) d'*altocumulus* (appellation générique recouvrant des nuages pouvant avoir des aspects très différents : nappes en galets, rouleaux plus ou moins soudés ou bancs effilés en forme d'os de seiche). Ces nuages évoluent entre 3 000 et 5 000 m, de sorte que les hauts sommets sont déjà pris et reçoivent bientôt les premières chutes de neige. Du fait de la très faible pente du front chaud, on voit que l'aggravation ressentie par l'alpiniste peut se produire plusieurs heures avant le passage du front lui-même. En région de plaine et de vallée par contre, les conditions sont encore clémentes malgré la disparition du soleil. La baisse de pression s'accentue. En montagne, il suffit de surveiller son altimètre. Si l'on a pris soin la veille de le caler avec soin sur l'altitude vraie du refuge, une augmentation de 100 m ou plus le matin (soit une chute de pression supérieure à 1 hPa/h) est un très mauvais signe. Le vent (tout au moins celui ressenti sur les sommets car, plus bas, sa direction est souvent modifiée par



"L'âne" (nuage lenticulaire) sur la Grande Casse et ciel chargé de cirrus.
De quoi sera fait le temps demain ? Cliché J. Villecrose.

le relief) tourne plus au sud et son renforcement peut être ressenti à des altitudes de plus en plus basses. Ce vent de sud entre dans les grandes vallées pyrénéennes orientées nord/sud. La vallée d'Aspe, la plus à l'ouest, est la première atteinte puis le phénomène se propage vers l'est et se produit successivement dans les vallées d'Ossau, du Gave, d'Aure et ainsi jusqu'au Luchonnais.

Lorsque le front lui-même se rapproche (on parle alors de *corps* perturbé), le plafond baisse graduellement ou parfois très vite jusqu'à noyer la montagne dans des nuages très sombres et aux contours flous (*nimbostratus*) que l'on peut éventuellement distinguer de la vallée tandis que l'alpiniste est dans le brouillard. Les précipitations se renforcent. Elles sont souvent plus fortes qu'en plaine. C'est d'ailleurs vrai aussi bien pour le front froid que pour le front chaud. En effet, à l'effet de soulèvement frontal, se superpose celui dû à la présence du relief (on parle alors de soulèvement forcé). C'est ainsi qu'à Saint-Pierre-de-Chartreuse le cumul annuel de pluie représente en moyenne le double de celui mesuré à Grenoble.

➠ A souligner que l'accroissement des précipitations avec l'altitude n'est pas homogène ni d'un massif à l'autre, ni même à l'échelle d'un seul massif. La position de celui-ci par rapport au flux général mais aussi la topographie locale jouent un rôle important. Les ascendances (et donc l'instabilité) sont renforcées en des endroits privilégiés : parties concaves, resserrements des vallées, cirques, etc. La vallée de l'Eau d'Olle, ligne de partage entre les massifs de Belledonne et des Grandes-Rousses, en constitue un exemple frappant : la topographie locale favorable entraîne dans cette zone des précipitations pouvant représenter dans certains cas le triple de ce qui tombe à altitude égale, par exemple, sur le versant Grésivaudan de Belledonne.

Du côté des températures, la masse d'air s'est globalement radoucie même si l'impression ressentie par l'alpiniste soumis au vent et à l'humidité est parfois tout autre. Ce radoucissement peut entraîner, au-dessous d'une certaine altitude, la

transformation de la neige en pluie mais, pour une masse d'air donnée, ce niveau d'altitude pourra être très variable d'un massif à l'autre. En hiver dans le nord des Alpes, les massifs préalpins sont soumis de plein fouet au redoux (dit noir lorsqu'il s'accompagne de précipitations). En revanche, dans les massifs situés plus à l'intérieur, l'air froid antérieur reste longtemps prisonnier des vallées et l'air chaud a bien du mal à le remplacer. Ainsi il n'est pas rare que, pendant plusieurs heures voire une journée ou plus, il pleuve à 1 800 ou 2 000 m dans le Vercors alors que dans le même temps il neige à gros flocons à Bourg-Saint-Maurice, pourtant situé à 850 m d'altitude.

3.4. Entre le front chaud et le front froid

Une fois le front chaud passé, on entre dans ce que les météorologistes appellent le *secteur chaud*. Les précipitations s'arrêtent ou deviennent très faibles voire sporadiques. L'air est nettement plus doux. La couche nuageuse se fractionne et des éclaircies peuvent apparaître entre des bancs nuageux persistant à plusieurs niveaux.

En fait, la physionomie du secteur chaud va beaucoup dépendre de la position exacte où l'on se trouve par rapport au centre de la dépression ou plutôt par rapport à ce que l'on appelle le *point triple* de la perturbation et qui n'est que la projection sur un plan horizontal de l'intersection des fronts chaud et froid avec l'occlusion. Si l'on s'en trouve assez près, le secteur chaud ne verra que très peu d'amélioration sensible du temps. Seule une légère et temporaire atténuation des précipitations sera observée avant l'arrivée, souvent rapide, du front froid. Au contraire, plus on est loin du point triple et plus l'amélioration peut être belle. Dans certains cas, la masse d'air s'assèche considérablement surtout dans sa partie supérieure tandis que l'humidité reste importante dans les basses couches : brumes et nuages de type *stratus* (sorte de brouillard décollé du sol) ou *stratocumulus* (d'aspect voisin de certains altocumulus mais d'altitude nettement plus basse) persistent en plaine et vallée alors qu'il fait assez beau en montagne, tout au moins à partir d'une certaine altitude, avec des voiles nuageux très élevés plus ou moins denses.

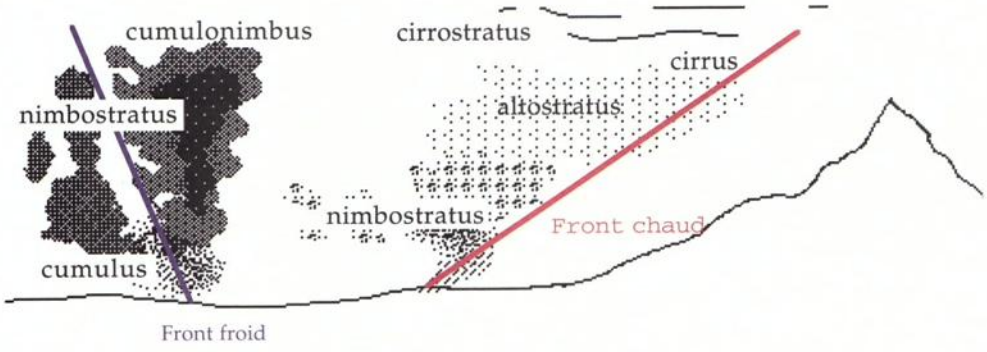


Figure 9 : passage d'une dépression polaire, avec passage dans un premier temps d'un front chaud, puis d'un front froid. Si ce dernier rattrape le front chaud, il y a occlusion : l'air chaud se retrouve entièrement rejeté en altitude. D'après [1].

Dans tous les cas de figure, la pression atmosphérique se stabilise. Le vent général souffle maintenant de l'ouest. Il reste souvent fort à très fort dans les secteurs chauds actifs mais autrement, il a tendance à faiblir.

3.5. Vers le froid

L'irruption de l'air froid provoque un nouveau soulèvement de l'air chaud qui s'accompagne d'une aggravation nuageuse et pluvieuse souvent brusque, beaucoup plus rapide en tout cas que celle due au passage du front chaud (la pente

du front froid est en effet plus forte). Le vent a tendance à revenir temporairement au secteur sud et la pression recommence à baisser. Au passage du front froid proprement dit, les précipitations sont intenses, accompagnées souvent de manifestations orageuses durant le printemps et l'été, parfois même en plein hiver lorsque la poussée froide est suffisamment vigoureuse pour entraîner de rapides ascendances turbulentes qui donnent lieu à la formation de ces fameux *cumulonimbus* (nuages très sombres et très développés verticalement, en forme de tours finissant par une enclume, particulièrement redoutables pour l'alpiniste).

Dans le cas d'un secteur chaud actif, l'arrivée du front froid ne constitue pas à proprement parler une surprise puisque l'on est déjà dans le mauvais temps. En revanche, si le secteur chaud a été peu actif ou carrément inexistant (puisque certaines perturbations se présentent privées en quelque sorte de leur front chaud), le front froid peut arriver sans signe annonciateur dans le ciel et surprendre donc complètement l'alpiniste qui, de plus, suivant son cheminement, ne bénéficie que d'un horizon limité.

Puis, tout aussi brusquement qu'elle avait commencé, la pluie cesse et un coin de ciel bleu apparaît. L'atmosphère est plus fraîche. La pression connaît une hausse, elle aussi brutale. Le vent s'oriente franchement nord-ouest à nord. Le front froid est passé. On est déjà dans ce que les météorologistes appellent la *traîne*, appellation générique qui, en région de plaine, se traduit souvent par un temps incertain avec alternance de belles éclaircies et de passages nuageux plus ou moins denses et parfois accompagnés d'averses ou bien par un ciel le plus souvent gris et bas. Mais en montagne, surtout l'hiver, les temps de *traîne* sont ressentis bien différemment. En gros, deux schémas sont possibles tout en admettant, surtout à partir du printemps, de nombreuses variantes. Mais revenons à l'hiver !

• Soit les masses d'air froid postérieures sont relativement homogènes avec leur humidité concentrée essentiellement en basse couche. Dans ce cas, même si la masse d'air est potentiellement instable, les phénomènes *de convection* (liés à l'échauffement par le bas) sont insignifiants en région de montagne (températures trop froides, sol enneigé) et les nuages s'étalent en *strato-cumulus* constituant ainsi les fameuses mers de nuages qui, si elles persistent, constituent un cauchemar pour ceux qui vivent au-dessous, et... un paradis pour les montagnards qui bénéficient d'un ciel bien dégagé et généralement très limpide. Suivant les cas, le sommet de ces mers de nuages se situe entre 1 000 et 2 000 m. Au-dessus, il n'y a que le vent, qui peut rester fort au moins sur les crêtes, et... les avalanches dues aux récentes chutes de neige pour poser problème.

• Soit l'air froid postérieur comporte des limites secondaires surtout marquées en altitude et qui correspondent à des discontinuités d'épaisseur de la couche d'air froid instable. Alors, dans ce cas, celles-ci vont se comporter en région de montagne comme de véritables fronts, le vent et le relief provoquant de nouveaux soulèvements. Ainsi, après les quelques éclaircies qui ont suivi immédiatement le passage du front, le mauvais temps affecte à nouveau le relief qui reste alors dans le brouillard et soumis à des précipitations quasiment continues sous forme de neige jusqu'à des altitudes de plus en plus basses. Ces chutes de neige se présentent souvent sous forme de neige roulée en raison du caractère instable de la masse d'air. En résumé, le front froid est passé depuis longtemps et pourtant on a l'impression que rien n'a vraiment changé.

Les successions de perturbation/traîne active (fréquentes dans les régimes d'ouest à nord-ouest) apportent des précipitations neigeuses souvent importantes sur le nord des Alpes et des Pyrénées. Ce sont surtout elles qui favorisent un bon enneigement à basse et moyenne altitude.

Par ailleurs, bien plus qu'au passage des fronts eux-mêmes, les *traînes* donnent lieu à des *effets de foehn* assez spectaculaires entre le sud et le nord des Alpes,

voire même entre des massifs relativement proches. Par régime de nord-ouest par exemple, on observe souvent un dégradé du mauvais vers le beau entre les Préalpes du Nord (Chartreuse, Vercors, Chablais...) et les massifs plus intérieurs comme l'Oisans, le sud de la Vanoise et la haute Maurienne et plus encore derrière la ligne de foehn, vers les Hautes-Alpes, où la masse d'air, après avoir en quelque sorte déversé son humidité sur les massifs situés en amont du flux, continue son voyage sous une forme nettement asséchée qui entraîne souvent du grand beau temps. On l'aura peut-être déjà compris, la prévision de l'activité d'une *traîne* n'est pas toujours chose aisée et les temps de traîne offrent de bonnes et de mauvaises surprises au montagnard... comme au météorologiste!

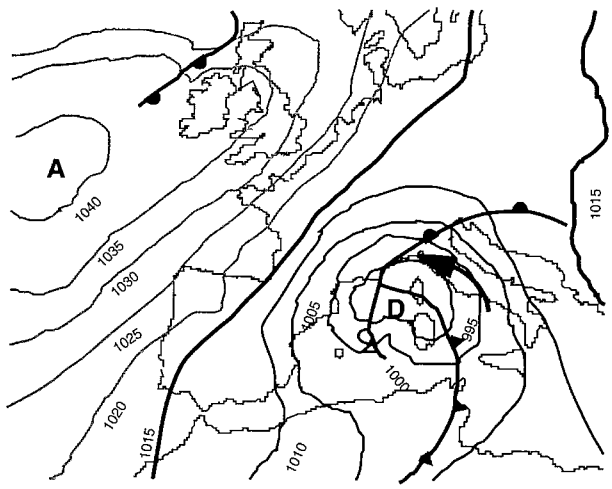


Figure 10. Situation dite de retour d'est. Épisode du jeudi 12 janvier 1978 à 18 heures : une dépression située sur la Méditerranée occidentale est en train de se combler, mais un retour d'est (signalé par la flèche) va occasionner d'importantes chutes de neige sur les Alpes (plusieurs avalanches mortelles dans la vallée de Chamonix). D'après [11].

Nous venons de voir le scénario-type d'une perturbation océanique c'est-à-dire correspondant à une circulation zonale (de secteur ouest au sens large) qui est généralement la plus fréquente sur les Alpes d'octobre à avril. D'autres sont possibles : méridiennes (Sud ou Nord), elles apportent dans le premier cas d'importantes précipitations limitées au sud des Alpes soit, dans l'autre, du froid bien sûr mais généralement peu d'humidité. Enfin, du fait de creusements dépressionnaires importants dans le golfe de Gênes, certaines perturbations océaniques se réactivent en Méditerranée et reviennent en quelque sorte vers les Alpes où elles peuvent provoquer en quelques heures d'abondantes chutes de neige sur la chaîne frontalière (Mercantour, Queyras, haute Maurienne). Ce sont les situations dites de *retour d'est* ou *lombarde*[6]. Des phénomènes similaires peuvent affecter également les Pyrénées (Canigou, Pyrénées ariégeoises) lors de dépressions centrées à proximité des Baléares.

De mai à septembre, les pulsations d'air froid polaire deviennent moins vigoureuses et le temps sur les Alpes est plus souvent commandé par des situations moins bien organisées où les évolutions *convectives* prennent le dessus sur celles purement *dynamiques*. Les chutes de neige se limitent généralement au domaine de la haute montagne, ce qui n'exclut pas des quantités ponctuellement importantes.

4. Quelques phénomènes particuliers aux zones montagneuses

En montagne, le relief est la source de phénomènes particuliers qui contribuent à rendre plus complexe encore la météorologie des zones alpines :

4.1. Les brises

Les *brises* sont des vents journaliers avec un cycle horaire fixé par le soleil. Ainsi les brises de pente sont des vents qui soufflent le long des versants ensoleillés et dont la direction dépend du soleil : le jour, le soleil réchauffe le sol et on

6. La lombarde est un vent violent d'est, qui souffle sur les chaînes frontalières et qui peut être associé à d'importantes chutes de neige.

assiste à une brise montante tandis que la nuit le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère et la brise devient descendante. La vitesse est de l'ordre de la dizaine de kilomètres par heure. Le basculement entre brises montante/descendante se fait environ 30 minutes après le lever du soleil. L'intensité de la brise est fonction de la position du soleil : elle croît le matin, atteint son maximum à midi (heure solaire) et décroît l'après-midi. A une échelle plus vaste, le phénomène est identique pour un massif : un flux s'organise entre la vallée et la plaine en fonction du soleil. La brise de vallée est plus conséquente, peut atteindre des vitesses respectables (40 km/h) et contrarie fortement le vent synoptique. Les brises de vallée s'établissent le plus souvent en période météorologiquement calme. En cours de nuit, la brise descendante s'établit et provoque dans les vallées un brassage de l'air qui contrarie fortement la formation des brouillards locaux. C'est ainsi que la région de Tarbes et Lourdes au débouché de la vallée du Gave de Pau profite des brises nocturnes pour balayer 40 à 50 % des brouillards qui sévissent à proximité.

4.2. Foehn et effet de foehn

Le *foehn*, dans son acception la plus courante désigne un vent descendant, turbulent, chaud et sec. Dans les Alpes françaises, ses effets les plus spectaculaires et sa fréquence la plus élevée sont observés à proximité de la chaîne frontalière avec l'Italie qui constitue un obstacle de grandes dimensions à l'écoulement de l'air humide accumulé dans les plaines lombardes. La barrière des Pyrénées s'oppose à la circulation méridienne des perturbations et provoque un effet de foehn marqué et très fréquent sur les versants français par flux de sud à sud-ouest et sur les versants espagnols par flux de nord à nord-ouest.

A Bourg-Saint-Maurice, par exemple, le foehn souffle en moyenne 11 % des jours de l'année. Sa vitesse moyenne varie entre 3 et 10 m/s mais avec des pointes de 20 à 40 m/s. La hausse de température qui l'accompagne est brutale : 3 à 5 °C et jusqu'à 15 °C en 2 heures. Parallèlement l'humidité relative baisse d'au moins 30 %. Si le terme de foehn prédomine en haute Tarentaise, celui de lombarde est plus souvent employé en Maurienne et haute Maurienne, ainsi que plus généralement du Briançonnais au Mercantour.

D'un point de vue météorologique, le foehn se déclenche le plus souvent par un régime de sud-ouest à sud en altitude (foehn océanique) mais également par régime de sud-est (foehn méditerranéen). Dans le cas, le plus classique (foehn océanique), il résulte de la transformation locale que subit une masse d'air tiède et humide au sud-est ou à l'est des Alpes lorsqu'elle franchit les cols, attirée en quelque sorte par une dépression se dirigeant de sud-ouest en est, au nord de la chaîne. Quel que soit le type de foehn, cette transformation (appelée *effet de foehn*) suit le processus suivant : l'air doux et humide, obligé de remonter le versant au vent, se refroidit par détente, d'où la formation de nuages et de précipitation si les nuages sont suffisamment épais. Passée la ligne de crête, la masse d'air subit une compression, donc un réchauffement qui a pour conséquence la disparition progressive des nuages. Mais l'air, ayant perdu de la vapeur d'eau en précipitant, se réchauffe plus rapidement qu'il ne s'était refroidi. D'où, en vallée, des contrastes thermiques saisissants de part et d'autre de la crête. Au niveau de cette dernière et à proximité, un rouleau de nuage persiste et semble ne pas pouvoir dépasser les lignes de crête : on parle de *mur de foehn*.

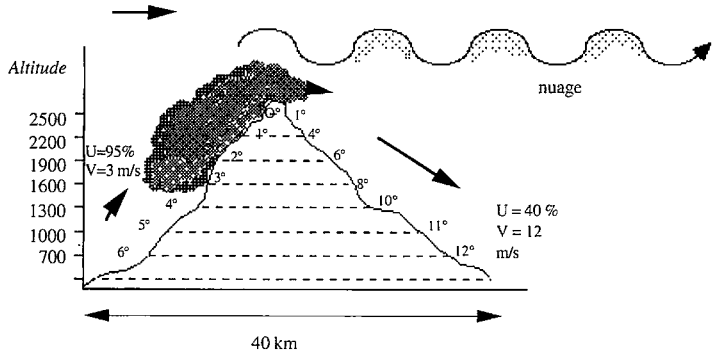


Figure 11 : effet de foehn. De l'air chaud et humide remonte une pente. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense et forme des nuages, qui peuvent donner des précipitations. L'air libéré de son humidité provoque un vent chaud et sec sur l'autre versant. C'est l'effet de foehn. Le passage de la crête provoque un sillage, qui donne naissance à des nuages lenticulaires. A titre indicatif, on donne la variation de température de chacun des versants, ainsi que la perte d'humidité (relative U) du vent dont la vitesse moyenne croît.

Plus haut, on assiste souvent à la formation de nuages lenticulaires, appelés nuages d'onde, et qui sont dus à un effet de sillage de l'air au passage de la ligne de crête : le mouvement de montée/descente associé au scénario classique refroidissement/réchauffement provoque la condensation de la vapeur d'eau, donc la naissance de nuages, dont la forme épouse la forme des ondulations de l'air. Dans certaines situations (flux de sud-est en altitude), les nuages épais et les précipitations débordent sur le versant français de la chaîne frontalière. L'hiver et au printemps, il peut alors tomber 1 à 2 mètres de neige en 24 heures sur certains massifs comme la haute Maurienne ou l'est du Queyras (secteur d'Abriès) alors que quelques kilomètres plus à l'ouest, les chutes de neige sont insignifiantes ou nulles.

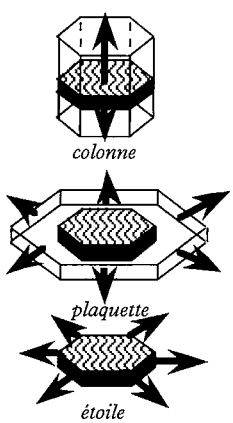
5. Les chutes de neige*

La neige désigne tout à la fois des flocons en train de tomber et l'agglomération au sol de cristaux de glace. Ce paragraphe concerne spécifiquement les chutes de neige et le transport de neige par le vent. La neige au sol fait l'objet du chapitre suivant.

5.1. Précipitation de neige

5.1.1. Formation dans les nuages

Les cristaux de glace s'élaborent dans les nuages par condensation solide de la vapeur d'eau. Ceux-ci sont composés de vapeur d'eau et de micro-gouttelettes (résultant de la saturation de l'air) qui peuvent rester à l'état liquide même par des températures largement inférieures à 0 °C : on parle alors de surfusion. Cet équilibre est instable et cesse dès qu'il est perturbé : des noyaux de congélation en suspension permettent alors le développement de cristaux de glace élémentaires, appelés *germes*, qui vont croître en respectant une symétrie hexagonale. On assiste à un grossissement des cristaux au détriment des gouttelettes surfondues et des cristaux les plus petits.



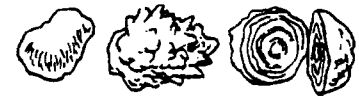
de -6° à -10°C
Croissance des grandes face

de -10° à -12°C
Croissance des petites faces

de -12°C à -20°C
Croissance des arêtes

➟ Figure 12. Les différents types de croissance en fonction de la température de l'air.

* Par C. Ancey

Nom	Conditions de formation	Forme du cristal
Plaquettes	Température de l'air entre -10 °C et -12 °C.	
Étoiles	Température de l'air entre -12 °C et -20 °C.	
Colonnes	Température de l'air entre -6 °C et -10 °C.	
Aiguilles	Température de l'air de -5 °C à -8 °C avec forte humidité.	
Dendrites spatiales	Température inférieure à -20 °C. Congélation simultanée de plusieurs cristaux.	
"Boutons de manchette"	Combinaison des autres formes par changement des conditions au cours de la chute du cristal.	
Particules irrégulières	Combinaison des autres formes.	
Neige roulée (grésil)	Congélation de gouttelettes surfondues autour d'un cristal durant sa chute.	
Granules de glace	Gouttes de pluie congelées.	
Grêle	Gouttes de pluie congelées formées dans un cumulonimbus d'orage.	

➠ Tableau de classification des 9 familles de cristaux d'après l'O.M.M.

Le cristal possède donc une forme initialement hexagonale, puis évolue vers des formes plus complexes en fonction de la température extérieure. Ainsi c'est la température au sein du nuage qui conditionne la direction de la croissance du germe ; les directions privilégiées sont les bases, les faces latérales et les arêtes, qui vont respectivement former trois familles de cristaux : les *colonnes*, les *plaquettes* et les *étoiles*. La température au sein de la masse nuageuse pouvant fluctuer, la forme des cristaux pourra être complexe et résulter des trois processus mentionnés plus haut. Dès que la masse des cristaux est suffisante pour compenser les effets de la pesanteur et de turbulence au sein du nuage, ils tombent. Si les températures restent négatives ou proches de zéro pendant la chute, les flocons se déposent au sol sous forme de neige.

5.1.2. Les différents types de cristaux

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a proposé une classification morphologique des différents cristaux : parallèlement aux trois familles

respectant la symétrie du germe, il existe d'autres classes présentant des formes nettement plus complexes et asymétriques : *aiguilles, dendrites spatiales, colonnes entre deux plaques* (ou *en "boutons de manchette"*) et *particules irrégulières*. De plus, il existe des formes particulières de précipitation solide :

- la *neige roulée* ou *grésil* : ce sont des cristaux ayant traversé des masses nuageuses turbulentes composées de gouttelettes surfondues, qui au contact des cristaux se congèlent (processus de givrage). On observe surtout la formation de grésil lorsque la masse d'air est sursaturée (plus de 140 % d'humidité) et dans les nuages convectifs (au passage d'un front froid par exemple ou dans la traîne). Si le phénomène dure assez longtemps, le cristal disparaît sous une gangue de particules sphériques de glace opaque qui rappelle l'aspect de boules de mimosa. Ces cristaux grossièrement sphériques et de taille importante (5 à 6 mm) ne subissent par la suite que peu de transformations au sein du manteau (tant que la neige est sèche) et constituent des *couches fragiles* (de peu de cohésion) qui favorisent le départ des avalanches ;
- les *granules de glace* : ce sont des cristaux de glace issus de la congélation de gouttes de pluie ayant rencontré une tranche d'air à température négative au voisinage du sol. Leur forme est grossièrement sphérique comme le grésil mais leur taille moyenne est plus petite (moins de 5 mm) ;
- la *grêle* : elle est formée de morceaux de glace d'un diamètre en général compris entre 5 et 50 mm ; le grêlon est le résultat de la superposition de couches de glace plus ou moins sphériques. La grêle se rencontre habituellement lors de violents orages.

Remarque : il existe des cristaux qui ne résultent pas de précipitations. Il s'agit du :

– *givre de surface*, qui se forme la nuit par ciel dégagé lorsque la neige subit un important refroidissement (bilan thermique négatif) et refroidit l'air à son contact. La vapeur d'eau de l'air se condense en plaquettes de givre ou en paillettes sur les cristaux de neige à la surface du manteau. Du givre de surface, une fois enfoui, forme également des *couches fragiles* ;

– *givre opaque*, qui est un dépôt de glace provoqué par la congélation de gouttelettes (en surfusion) sur des surfaces très froides exposées au vent. Ce phénomène se rencontre habituellement par temps de brouillard et venteux. Des "flammes" de glace apparaissent le long de ces objets et sont orientées dans le sens du vent ; leur effet sur certaines structures (câbles, pylônes...) peut être désastreux car les dépôts de glace entraînent une surcharge importante. Nous n'en reparlerons pas car il ne concerne pas le manteau neigeux.

5.2. Influence de la température

Si la température est largement négative, les cristaux tombent isolément ou en légers flocons. Au-dessous de -5 °C, les flocons ne subissent que très peu d'altérations et se déposent en couches de neige poudreuse de faible masse volumique (entre 20 et 100 kg/m^3). Si la température augmente et s'approche de 0 °C (jusqu'à +2 °C au voisinage du sol), des flocons plus humides et volumineux arrivent au sol. Des précipitations de neige avec intermittences de pluie sont alors possibles. La couche déposée est constituée de neige humide et lourde (de 150 à 200 kg/m^3 voire plus). En moyenne, la limite pluie/neige se situe de 200 à 400 m au-dessous de l'isotherme 0°.

5.3. Influence du vent

L'action du vent est double. D'une part, il va être l'agent de transformation mécanique le plus important ; son action commence dès la chute des cristaux car il augmente les chocs et casse leurs branches. D'autre part, au cours de la précipitation il transporte la neige qui se dépose dans les zones les moins soufflées.

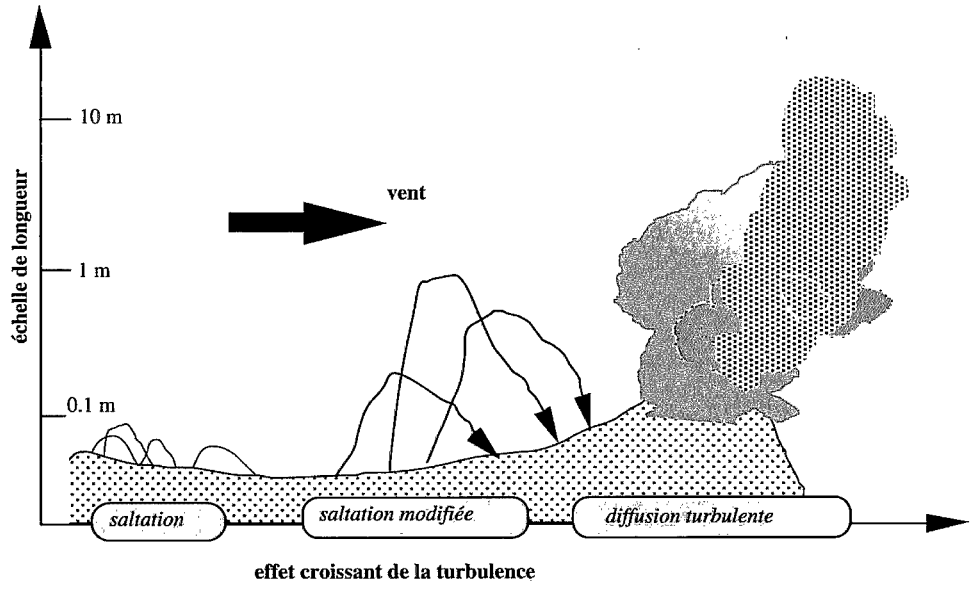
La neige déposée au sol peut être encore reprise par le vent et transportée sur des grandes distances, parfois plusieurs jours après la chute (surtout lorsqu'il s'agit de neige poudreuse). D'importantes accumulations de neige peuvent dès lors prendre naissance.

5.3.1. Mécanisme de transport par le vent

Le vent est capable d'éroder localement le couvert neigeux et de transporter les particules arrachées. La capacité d'érosion et de transport est fonction de l'intensité du vent et de la qualité superficielle de la neige : en deçà d'une vitesse seuil, le vent est incapable de contrebalancer efficacement l'équilibre des grains (par gravité et force de cohésion). Cette vitesse seuil dépend fortement de l'état de surface du manteau : pour une neige poudreuse, une vitesse de 5 m/s est suffisante pour mettre en mouvement les particules tandis que pour une neige compacte, un vent de 30 m/s n'a qu'un faible effet [2].

Il existe trois modes de transport de la neige :

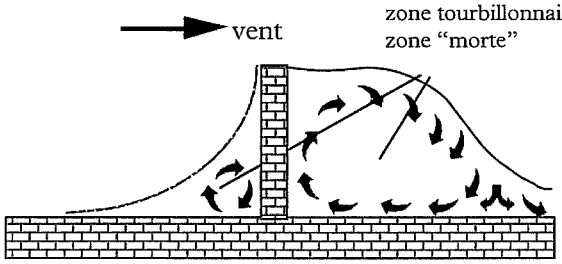
- le *charriage* : à de faibles vitesses du vent, les grains sont mis en mouvement et se déplacent le long du sol en glissant et en roulant sur les autres grains ;
- la *saltation* : à des vitesses plus importantes, le vent est capable d'éjecter les particules qui rebondissent et heurtent en retombant d'autres particules qui se mettent à leur tour en mouvement ou bien marquent un temps d'arrêt avant d'être de nouveau éjectées. Ces trajectoires en *sauts de puce* sont irrégulières. Lorsque l'écoulement d'air près du sol est sous forme de bouffées turbulentes, des tourbillons prennent et projettent (jusqu'à 1 mètre de hauteur) les particules de neige qui sont reprises par le vent tant que sa concentration en particules est inférieure au seuil de saturation [3] (on parle de *saltation modifiée*). Au sol, ces différences de vitesse donnent naissance à des zones de circulation rapides et lentes, qui créent des formes particulières d'érosion et de dépôt : les *rides*, les *vagues* ou les *zastrugis* ;
- la *suspension* : il s'agit d'une diffusion turbulente provoquée par des tourbillons qui mettent en suspension les particules de neige préalablement projetées par saltation. Ces phénomènes sont souvent visibles près des crêtes ou des cols : on parle de la "chasse-neige" (ou de crêtes qui "fument"). La neige peut parcourir ainsi de grandes distances (de l'ordre du kilomètre), limitées toutefois par la sublimation des particules.



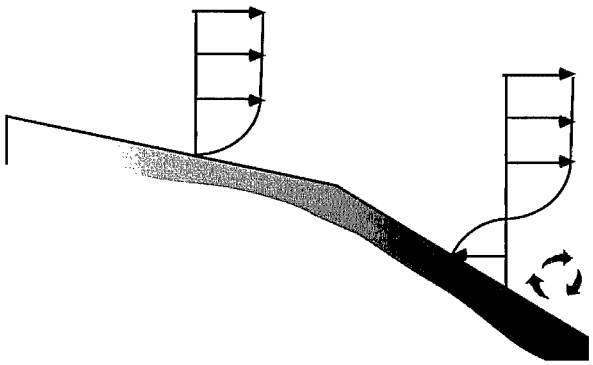
➡ Figure 13. Les principaux modes de transport de neige par le vent et leur échelle de longueur (hauteur de l'écoulement de neige reprise).

5.3.2. Accumulation de neige par le vent

La neige transportée par le vent se dépose dans les zones de moindre influence : accumulations, congères et corniches sont les types de dépôt qu'on rencontre couramment en montagne. Sur les plateaux ou en plaine, les dépôts existent sous forme de congères et de glaçage des routes (ou "tôle ondulée").



➡ Figure 14.
Effet d'un obstacle sur un écoulement d'air : création de zones mortes



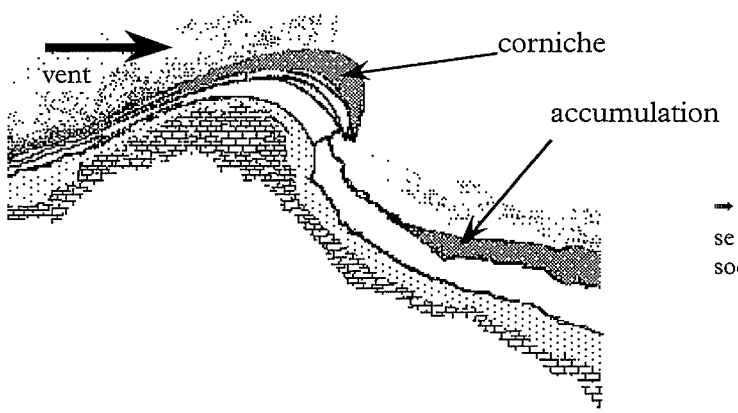
➡ Figure 15 :
Effet d'un changement de déclivité.

La position de ces accumulations est intimement liée aux perturbations des mouvements d'air dues au relief. En effet, lorsqu'un mouvement d'air rencontre un obstacle, il se crée des zones "mortes" (devant ou derrière l'obstacle) qui ne participent plus au courant général. L'influence du vent y devient négligeable ou bien il se crée un flux local tourbillonnaire en "circuit fermé" (zone de recirculation). C'est ainsi que des congères importantes se forment derrière des obstacles tels que haies, édifices, croupes... Un changement de déclivité dans une pente peut être suffisant à provoquer un décollement des lignes de courant, alimentant un courant de sens inverse au flux général ou créant des effets de sillage.

5.3.3. Les différents types de dépôt

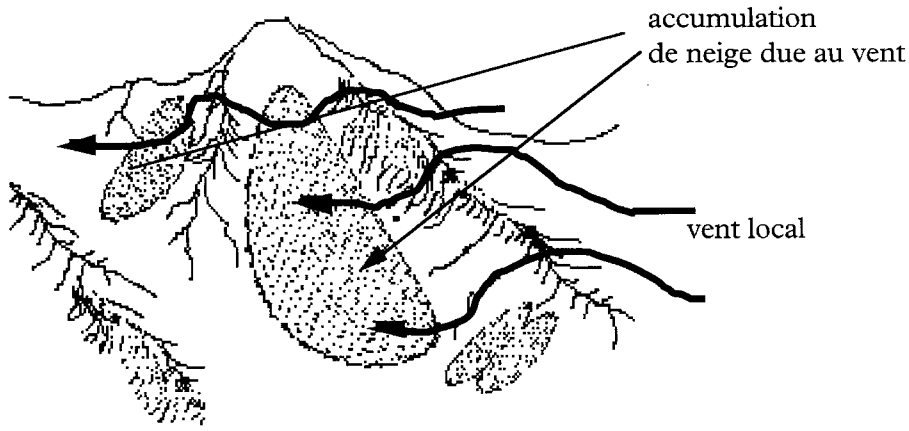
Les trois formes classiques de dépôt sont :

– la *corniche*, qui se forme le long de crêtes ventées. Selon un scénario souvent proposé pour expliquer leur croissance, les corniches sont formées de grains très fins (0,1 mm) qui s'agglomèrent très facilement [4] ;



➡ Figure 16 : la corniche se forme au fil des épisodes venteux.

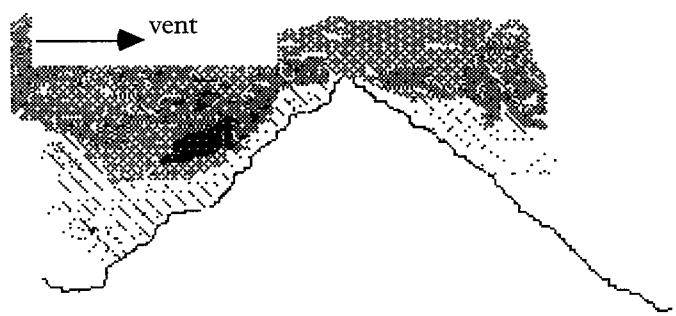
- la *congère*, qui est une accumulation de neige derrière un obstacle (bâtiment, végétation, rocher...) ou dans les creux (combes, trous, cuvettes...) ;
- la *plaque à vent*, où la neige entraînée par le vent durant la précipitation ou reprise au sol, est déposée plus loin, dans une zone plus ou moins à l'abri du vent. Ainsi, on trouve fréquemment des accumulations de neige soufflée juste derrière une ligne de crête. L'épaisseur de ces dépôts est souvent importante, et c'est ainsi que le vent peut adoucir ou gommer le relief en garnissant les creux, en formant des "plaques", en surchargeant des pentes entières (le plus souvent, la pente sous le vent).



➟ Figure 17 : la plaque à vent est une accumulation de neige transportée par le vent durant ou après une précipitation.

⚠ Beaucoup d'idées fausses circulent encore couramment sur la plaque à vent : par définition, c'est une accumulation de neige soufflée. A ce stade, on ne peut rien dire sur la nature de la neige déposée, sur son extension géographique ou sur sa stabilité : ainsi, certaines personnes la décrivent comme une couche de neige dure, de densité élevée (supérieure à 200 kg/m^3), de couleur mate, se formant derrière une crête ou un col, adhérant mal à la sous-couche, susceptible de se briser en blocs et de partir en avalanche au passage de skieur(s). Ces descriptions sont souvent erronées [5-9] ; entre autres, le skieur doit prendre garde à ne pas focaliser son attention uniquement sur les plaques dures.

Par ailleurs, il faut préciser que les accumulations de neige soufflée par le vent existent avec des tailles diverses : à l'échelle locale (ordre de grandeur la dizaine de mètres, voire la centaine), on parle de plaque à vent ; à l'échelle d'un versant, on parle également de *suraccumulation de neige*, dont la formation conjugue plusieurs effets : transport de neige par le vent, effet de barrière du relief qui "accroche les nuages", conformation du relief qui dévie le vent synoptique... La notion de suraccumulation est surtout employée pour l'analyse spatiale du risque.



➟ Figure 18 : exemple de suraccumulation affectant le versant au vent durant un épisode météorologique, qui va surcharger ce versant-ci.

5.3.4. La répartition des zones d'accumulation et d'érosion

La répartition locale du vent pour un vent synoptique donné dépend fortement de la configuration du terrain et des micro-reliefs. De ce fait, le transport et le dépôt de neige par le vent sont aussi extrêmement variables sur le terrain. Cette variabilité des caractéristiques des accumulations (dont leur localisation géographique) est encore renforcée par l'existence de plusieurs modes de dépôt :

- *affaiblissement du vent* : lorsque la vitesse du vent diminue, les particules de neige se déposent ;
- *zone "morte"* : dans certains contextes météorologiques, le relief peut créer des zones qui ne participent que faiblement au courant général, "piégeant" ainsi la neige qui s'y dépose ;
- *obstacle* : lorsque la neige en mouvement rencontre un obstacle, elle peut être arrêtée ou freinée par celui-ci ; on peut ainsi trouver des accumulations au pied d'un couloir ou de barres rocheuses.

5.3.5. Natures de la neige déposée

La morphologie des grains et les caractéristiques mécaniques (cohésion, résistance au cisaillement...) sont extrêmement variables dans les zones d'accumulation : on trouve toute une gamme de qualité de neige allant de la neige friable à de la neige très dure. La neige transportée contient des grains fins, des particules reconnaissables et de très petits grains (0,1 mm de diamètre). Il semble que plus le vent souffle violemment, plus on peut s'attendre à trouver des particules fines avec des angles aigus. [4]. Le vent peut par ailleurs reprendre de la vieille neige déjà métamorphosée et rien n'interdit de trouver des accumulations avec des grains à faces planes. Comme le vent a tendance à diminuer la taille des grains, le temps de frittage[9] s'en trouve extrêmement diminué : on peut alors aboutir plus rapidement à une bonne cohésion de frittage que dans le cas d'une métamorphose de faible gradient affectant une couche de neige non ventée. Dans beaucoup de cas, lorsque le vent souffle irrégulièrement au cours du temps, la nature du dépôt est complexe et laisse apparaître différentes natures de neige lorsque l'on effectue un sondage par battage. Au cours d'un même épisode venteux, le dépôt peut résulter de la superposition de plusieurs couches : on trouvera ainsi à la fois des grains fins et particules reconnaissables, compte tenu d'une part de la variation d'intensité du vent et d'autre part du frittage.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] J.-P. TRIPLET et G. ROCHE : *Météorologie générale* (1996, Ecole Nationale de Météorologie, Toulouse), 318 p.

[2] F. NAAIM et G. BRUGNOT : *Transport de la neige par le vent. Connaissances de bases et recommandations* (1992, Cemagref, Grenoble). Voir aussi H. MARTINEZ : *Contribution à la modélisation du transport éolien de particules. mesures de profils de concentration en soufflerie diphasique*, thèse de l'Université Joseph Fourier (1996) 204 p.

[3] A. CLAPPIER et T. CASTELLE : *Modélisation numérique du transport de neige par saltation*, symposium de Chamonix, CISA-IKAR, juin 1991 (1991, ANENA, Grenoble) 105-117.

[4] G. GUYOMARC'H et L. MERINDOL : *Étude du transport de neige par le vent*, symposium de Chamonix, CISA-IKAR, juin 1991 (1991, ANENA, Grenoble) 77-82.

[5] A. DUCLOS : *Plaques à vent ou plaques friables*, La Montagne et Alpinisme **175** (1994) 72-74.

[6] C. ANCEY : *Avalanches : dangers réels et dangers perçus par le skieur*, Sommet **2** (1994) 29-35.

[7] C. REY : *La prévision du risque et les plaques*, Neige et Avalanches **62** (1993) 24-27.

[8] A. DUCLOS : *Neige, vent et avalanches*, Neige et Avalanches **64** (1993) 21-27.

[9] C. ANCEY : *Plaque à vent : mythes et réalité*, Rapport interne CA/R5 (1994, Cemagref, Grenoble).

[10] P. SOUHAITÉ : *Contribution à la prévision du foehn en Savoie*, Rapport interne (Météo-France, CDM de Bourg-Saint-Maurice, janvier 1989).

[11] DIRECTION DE LA MÉTÉOROLOGIE : Bulletin quotidien de renseignements du vendredi 13 janvier 1978.

Références complémentaires :
J.-J. THILLET et A. JOLY : *Débat sur le font polaire*, La Météorologie 8e série, 18 (1995) 58-67.
E. CHOISNEL : *Le cycle de l'eau, processus* zone d'érosion *aires*, La Météorologie 8e série, 20 (1997) 12-30.
J.-J. THILLET : *La météorologie de montagne* (1997, Le Seuil, 192 p.).
P. SOUHAITÉ : *Recueil de fiches d'aide à la prévision montagne en Savoie pour les situations d'hiver*, Monographie n° 7 (Météo-France, Paris, 1993) 60 p.

Chapitre 3

LES MÉTAMORPHOSES DE LA NEIGE, PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES

L'examen d'une coupe, réalisée dans un manteau neigeux, montre que celui-ci est constitué d'un empilement de strates de neige aux propriétés physiques et mécaniques différentes. Chacune de ces strates se constitue au cours d'un épisode neigeux. Les conditions météorologiques au moment de la chute ainsi que celles qui règnent ensuite lui confèrent ses caractéristiques. Celles-ci continuent d'ailleurs d'évoluer jusqu'à la fonte finale. Outre les conditions météorologiques proprement dites, l'exposition topographique joue un rôle important car elle peut influencer fortement l'effet des événements météorologiques. Le manteau neigeux est donc un matériau hétérogène.

Les caractéristiques physiques et mécaniques d'une strate de neige dépendent en grande partie des types de cristaux de neige qui la composent. A partir de la neige fraîche qui se dépose, on assiste à des transformations des cristaux initiaux sous l'influence d'effets thermodynamiques et mécaniques. Ces transformations, ou métamorphoses, conduisent de la neige fraîche à la fonte par une évolution continue. Les phases de transition sont caractérisées par des combinaisons de cristaux (appelés aussi grains de neige) à des stades d'évolution différents.

1. LES MÉTAMORPHOSES*

La neige est un matériau poreux dont la température est toujours inférieure ou au plus égale à 0 °C. Mélange d'air et de glace, uniquement à température négative, on dit alors que la neige est sèche. Cependant l'air contient de la vapeur d'eau et l'eau est alors présente sous deux de ses phases, gazeuse et solide. Lorsqu'il y a présence d'eau liquide, la neige est dite humide. La coexistence des trois phases de l'eau (gazeuse, liquide, solide), en équilibre thermodynamique, se traduit par une température de 0 °C.

Lorsque la neige est sèche, les métamorphoses des grains de neige se font par l'intermédiaire de la phase vapeur alors que dans le cas de la neige humide, elles se font essentiellement par la phase liquide, la phase gazeuse étant généralement assez réduite. C'est la raison pour laquelle nous distinguerons deux types de métamorphoses : les métamorphoses de la neige sèche et les métamorphoses de la neige humide [1]. Outre ces transformations thermodynamiques, les cristaux de neige peuvent subir des transformations liées à des contraintes mécaniques dues au vent ou, lorsqu'ils sont enfouis, au poids des couches de neige supérieures. Il existe plusieurs facteurs ou moteurs des métamorphoses. Certains ne concernent que la neige sèche. Dans le cas de neige humide, la présence d'eau liquide associée à une isothermie à 0 °C diminue ou empêche leur action et ce sont d'autres agents qui interviennent alors.

1.1. La neige sèche

1.1.1. Les agents des métamorphoses de la neige sèche :

En l'absence d'eau liquide, les transformations de la neige sont dues soit à des effets mécaniques, soit à des phénomènes thermodynamiques où n'interviennent que deux phases de l'eau, solide et gazeuse [2].

* Par Claude SERGENT (Météo-France).

L'effet de rayon de courbure des cristaux :

Nous avons vu précédemment (chapitre 2) que l'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau (tension de vapeur saturante), ne dépendant que de la température. Au voisinage d'une surface de glace, cette quantité dépend aussi de la forme de cette surface, laquelle peut être caractérisée par son rayon de courbure. On considère que les formes convexes (pointes, bosses) ont des rayons de courbure positifs et que les formes concaves (creux) ont des rayons de courbure négatifs. Ceux-ci sont d'autant plus petits, en valeur absolue, que les convexités ou concavités sont prononcées. Au voisinage des convexités, les tensions de vapeur saturante sont d'autant plus élevées que les rayons de courbure sont petits et inversement au voisinage des concavités. Les quantités de vapeur d'eau ont donc tendance à être plus importantes au voisinage des fortes convexités qu'au voisinage des faibles convexités et surtout des concavités.

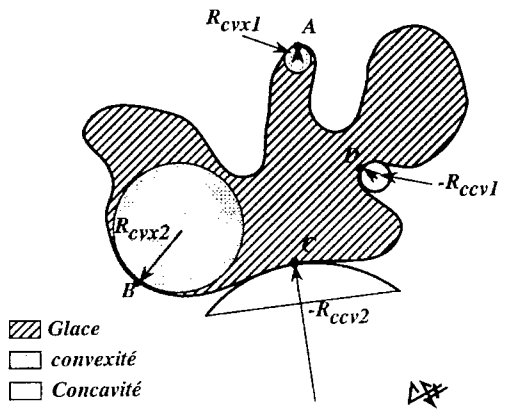


Figure 1. Schéma explicatif des rayons de courbure : Le rayon de courbure **Rcvx1**, en **A**, est le rayon du cercle qui s'inscrit au mieux dans la convexité en **A**. **Rcvx1** est plus petit que **Rcvx2** et la convexité au voisinage du point **A**, est plus marquée qu'au voisinage du point B. Pour les concavités aux points **C** et **D**, **Rccv1** est plus petit que **Rccv2** et la concavité est plus marquée au point **D** qu'au point **C**.

Le déséquilibre de répartition des tension de vapeur provoque l'établissement d'un flux de vapeur d'eau des zones convexes vers les zones concaves. La sous-saturation qui en résulte au voisinage des convexités se traduit par la sublimation d'une partie de la glace. A l'inverse, la sursaturation qui apparaît au voisinage des zones moins convexes et concaves a pour conséquence la condensation solide, sur ces surfaces, de la vapeur d'eau en trop. A l'échelle des grains, ce processus se traduit par un adoucissement des contours, par la disparition des plus petits grains et même à un arrondissement des cristaux à l'issue d'un temps assez long. On constate qu'il y a transfert de glace des parties convexes vers les parties concaves par l'intermédiaire de la phase vapeur.

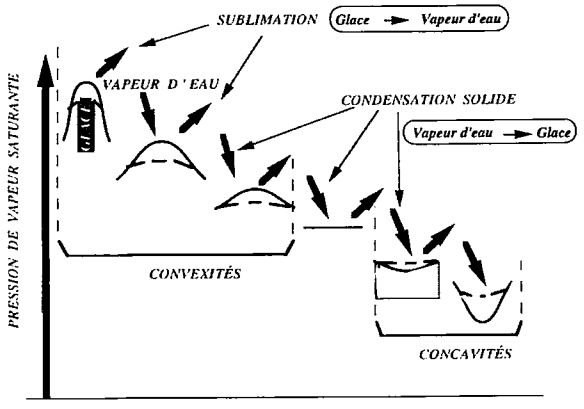


Figure 2.
Schéma des transferts de glace, par la phase vapeur, des surfaces les plus convexes vers les surfaces moins convexes et concaves.

Une autre conséquence importante de l'effet de rayon de courbure est l'apparition de la cohésion de frittage. Lorsque deux grains de neige, que nous sup-

poserons sphériques pour simplifier la démonstration, sont en contact, la zone de contact forme une concavité. La vapeur d'eau a donc naturellement tendance à se condenser autour du point de contact, créant ainsi un pont de glace entre les deux grains. On dit alors qu'il y a cohésion de frittage entre les deux grains. La rapidité de formation et l'importance des ponts de glace sont d'autant plus grandes que les grains de neige sont petits. Chaque fois qu'il y a contact entre les grains de neige, un pont de glace se forme conférant à la neige une certaine cohésion dont la qualité dépend du nombre de ponts de glace. Les neiges sèches constituées de petits grains (< 0,3/0,4 mm) ont donc en général une bonne cohésion de frittage, tandis que celles constituées de grains plus gros ont une plus faible cohésion de frittage.

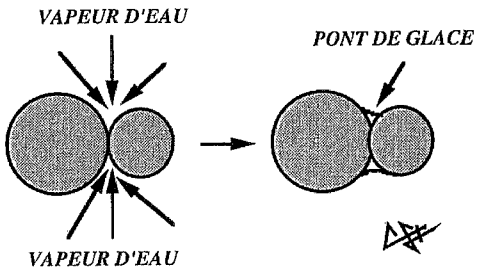


Figure 3. Schéma explicatif du phénomène de frittage. La concavité autour du point de contact entre les deux grains est le siège de la condensation solide de la vapeur d'eau.

Le gradient vertical de température :

Le gradient vertical de température d'une couche de neige caractérise la répartition verticale de température dans cette couche. D'une façon générale, la base du manteau neigeux est à une température proche de 0 °C, alors qu'en surface, lorsque la neige est sèche, la température peut être assez basse avec des valeurs atteignant parfois -20 à -30 °C. Le gradient vertical de température est exprimé par le rapport entre la différence de température entre deux niveaux et la distance verticale qui sépare ces deux niveaux. Il est lié à la qualité d'isolant de la neige, fonction de la quantité d'air qu'elle contient, et donc de sa masse volumique. C'est donc en général dans les couches de surface, peu épaisses et généralement constituées de neiges récentes, que l'on peut rencontrer les forts gradients. Plus en profondeur, les neiges étant plus denses, ils sont moins importants. Lorsqu'une couche de neige est humide, la présence d'eau liquide implique une température uniforme de 0 °C et par conséquent un gradient nul (voir § 1.2.).

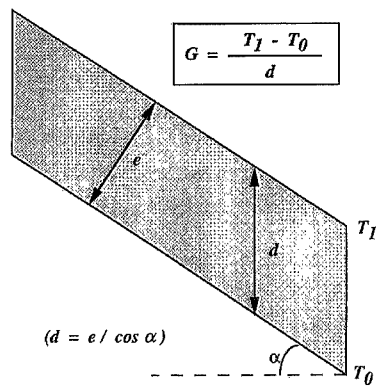


Figure 4. Méthode du calcul du gradient vertical de température pour une couche de neige située sur une pente.

Dans une couche de neige sèche soumise à un gradient vertical non négligeable, chaque grain de neige est plus chaud que celui qui est au-dessus de lui. A son voisinage immédiat, l'air qui est à la même température, peut contenir plus de vapeur

d'eau que celui du grain supérieur. Le déséquilibre local des pressions de vapeur entraîne alors un transfert de vapeur du grain le plus chaud vers le grain le plus froid. Pour combler la perte de vapeur d'eau à son voisinage, le grain le plus chaud se sublime donc en partie. Au dessus, le grain plus froid élimine le trop plein de vapeur d'eau à son voisinage en subissant une condensation solide de ce trop plein, caractérisée par l'apparition d'angulosités (cristallisation dans le système hexagonal). On dit aussi que ce dernier subit un givrage. On peut observer qu'il y a transfert de glace de grain à grain par l'intermédiaire de la phase vapeur.

La température :

Dans le cas de la neige sèche, la température a un rôle important sur les métamorphoses car elle les freine ou les accélère. La quantité maximale de vapeur d'eau qu'il peut y avoir au voisinage d'un grain de neige est fortement liée à la température de l'air environnant. Plus la température d'une couche de neige est proche de 0 °C, plus les transferts de glace par la phase vapeur sont efficaces. L'adoucissement des contours des grains et leur arrondissement, liés à l'effet du rayon de courbure, sont alors plus rapides. Pour ce qui est de l'effet dû au gradient de température, les transferts de grains à grain sont aussi plus rapides. A titre d'exemple, deux couches de neige identiques, de 30 cm d'épaisseur et dont les températures base/sommet sont respectivement de -5/-20 °C et de -15/-30 °C, sont soumises au même gradient de température (50 °C/m). Néanmoins, la première couche évoluera plus vite, sa température moyenne étant plus élevée que celle de la seconde.

Le vent :

Il s'agit dans ce cas d'un agent mécanique de transformation des cristaux de neige qui peut agir soit au moment des chutes de neige, soit après une chute de neige lorsqu'il est capable de reprendre la neige de surface dont la masse volumique et la cohésion sont encore assez faibles [3]. Les turbulences liées au vent provoquent la sublimation d'une partie des cristaux et des collisions entre ceux-ci. Les structures dendritiques fragiles résistent mal aux chocs et se brisent. Plus le vent est fort, plus les collisions sont nombreuses, réduisant les cristaux à de petites particules de glace parfois très fines (diamètre < 0,1 mm). De même, pour ce qui concerne la sublimation si l'air est très sec. Lorsque cette neige se dépose, elle prend une cohésion de frittage. Celle-ci est d'autant plus forte et se fait d'autant plus rapidement que les particules sont petites. Le dépôt qui se constitue généralement dans des combes abritées des vents forts, peut avoir une consistance friable ou dure suivant la nature des grains de neige présents. C'est ce phénomène qui est aussi à l'origine de la formation des corniches.

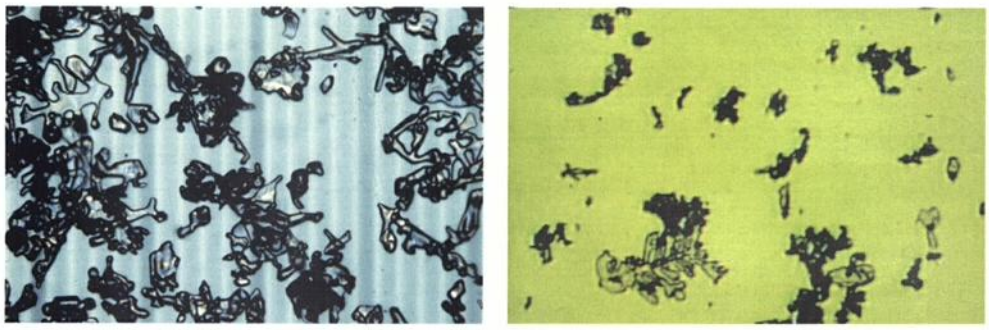
1.1.2. Les métamorphoses pendant la chute de neige



Différents types de cristaux de neige fraîche : plaquette, étoile, aiguilles.
Photographie Météo-France/CEN/Edmond PAHAUT.

Lors d'une chute de neige par température négative, les cristaux, souvent agglomérés en flocons, peuvent être soumis à l'action mécanique du vent qui a

pour conséquence, comme montré plus haut, de briser plus ou moins, suivant sa vitesse, les structures dendritiques fragiles. Si les destructions ne sont pas très importantes, on peut encore voir de nombreuses formes originelles dendritiques et on ne parle plus de cristaux de neige fraîche (symbole : +) mais des particules reconnaissables (symbole /). Si les destructions sont très importantes, la neige qui se dépose est constituée de très fines particules et il devient difficile de trouver encore des structures dendritiques. Ces cristaux ou grains de neige se nomment grains fins (symbole •), que l'on pourrait qualifier de mécaniques, étant donné leur origine et par différenciation avec ceux qui sont obtenus par des mécanismes thermodynamiques (voir § 1.1.3).



Particules reconnaissables photographiées à différents grossissements (à gauche). Grains fins (neige ventée) (à droite). Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond PAHAUT.

Si on fait abstraction du vent, les cristaux de neige pendant leur chute, sont soumis à l'effet de rayon de courbure dont la conséquence est un adoucissement des contours. Cet effet est d'autant plus marqué que la température de l'air est proche de 0 °C. Cependant, il est insuffisant pour faire disparaître toute forme dendritique et la neige qui se dépose est alors du type particules reconnaissables. Avec des températures assez basses (< -10/-8 °C) l'effet de rayon de courbure est peu efficace et la neige qui se dépose est généralement composée de cristaux peu transformés de neige fraîche. En fait, aux altitudes moyennes (1 800/2 000 m), les chutes de neige sont souvent accompagnées de vent plus ou moins forts et de températures de l'ordre de -3 à -6 °C. Dans ces conditions la neige qui se dépose est constituée d'un mélange de fragments dendritiques et de cristaux aux contours adoucis, le tout étant souvent plus ou moins givré (gouttelettes d'eau surfondues captées pendant la chute).

Avec la réduction des structures dendritiques, la neige déposée voit ses distances inter granulaires diminuer et, par conséquent sa masse volumique augmente. Une neige tombée sans vent par une température assez basse de l'ordre de -15 °C a en moyenne une masse volumique de l'ordre de 20 à 50 kg/m^3, alors qu'avec un vent de l'ordre de 10 m/s et une température de -5 °C, elle peut atteindre des valeurs de 150 à 200 kg/m^3. Mais on constate qu'en moyenne, au moment de la précipitation, la neige a une masse volumique de l'ordre de 100 kg/m^3, ce qui permet d'appliquer la correspondance : 10 cm de neige/10 mm d'eau.

Autre conséquence de la diminution des distances inter granulaires, le nombre des points de contact, autour desquels se produit le frittage, augmente et la cohésion aussi. Plus les transformations sont importantes pendant la chute (vent fort, température proche de 0 °C), plus la neige déposée a une forte densité et une forte cohésion de frittage.

Il faut garder à la mémoire que plusieurs jours après une chute de neige, tombée sans vent et restée légère du fait de températures assez basses, le vent peut se lever et effectuer une reprise de cette neige pour la transporter, parfois sur de

longues distances, et la déposer dans les endroits où il se calme. On assiste alors au même phénomène que lors des chutes de neige ventées avec le risque de surcharges locales pouvant donner lieu à des départs spontanés d'avalanche.

1.1.3. La métamorphose de faible gradient (G < 5 °C/m)

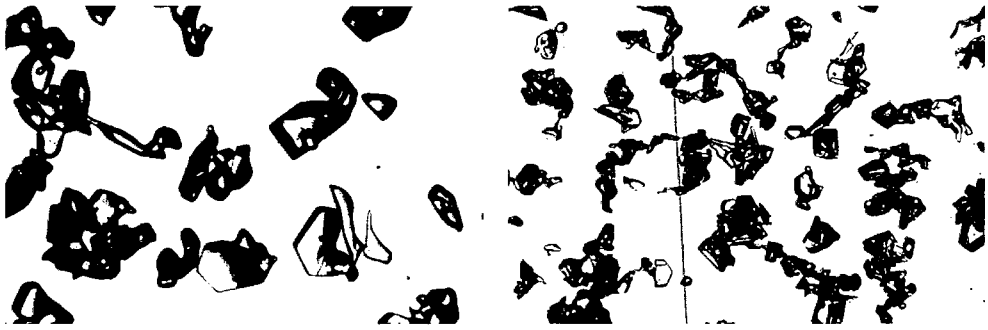
Au sein d'une strate de neige sèche, les effets de rayon de courbure et de gradient de température sont simultanés mais antagonistes puisque l'un tend à arrondir les cristaux alors que l'autre tend à les rendre anguleux. C'est la valeur du gradient qui régule le type de transformation [4].

Pour de faibles gradients (G < 5 °C/m), l'effet de rayon de courbure l'emporte sur l'effet de gradient, ce qui provoque un arrondissement des grains. Si au départ, nous avions de la neige fraîche (+), celle-ci voit ses formes s'émousser, et se transforme peu à peu en particules reconnaissables (/), puis, si le processus persiste, toutes les formes dendritiques disparaissent laissant la place à des grains aux formes arrondies nommés grains fins (•) dont les diamètres sont de l'ordre de 0,1 à 0,3 mm. La rapidité des transformations dépend évidemment de la température de la neige. Si le passage, de l'état de neige fraîche à l'état de particules reconnaissables, est assez rapide (quelques jours), l'apparition des grains fins demande plus de temps. A titre d'exemple, avec un gradient de 3 °C/m et une température moyenne de la couche de neige de -3,5 °C, il faut attendre une dizaine de jours pour obtenir un mélange particules reconnaissables/grains fins.

Dans cette métamorphose, la disparition des formes dendritiques se traduit par un rapprochement des grains, et par là même à une augmentation du nombre des points de contact autour desquels le frittage se produit. A l'échelle de la strate de neige, on observe alors un tassement général, avec une augmentation notable de la masse volumique qui atteint alors 200 à 300 kg/m^3 et le passage de la cohésion de feutrage (imbrication des dendrites) à la cohésion de frittage. Au début de la perte de cohésion de feutrage, on peut assister sur les pentes les plus raides à des instabilités à l'origine de purges spontanées. Mais, la prise de cohésion de frittage confère ensuite à la strate une meilleure stabilité. De plus, cette cohésion est d'autant meilleure que les grains sont petits puisque les points de contact sont nombreux. Seule ombre au tableau, ce type de neige manque de plasticité et supporte mal les contraintes.

1.1.4. La métamorphose de moyen gradient (5 °C/m < G < 20 °C/m)

Dans ce cas, la différence de température, selon la verticale, entre les grains devient sensible. Chaque grain est plus chaud que celui qui est au-dessus de lui. L'effet de gradient entre en concurrence avec l'effet de rayon de courbure et l'emporte. Les flux de vapeur liés aux différences de température entre les grains sont plus importants que ceux liés aux différences de courbure. La cristallisation de la vapeur d'eau aux points froids, caractérisée par l'apparition d'angulosités, est plus rapide que la sublimation liée à l'effet de rayon de courbure. Néanmoins, l'effet de courbure permet au début de la métamorphose de provoquer la sublimation des petits grains, induisant une augmentation moyenne des tailles de grains. Le résultat global est donc l'apparition d'un type de grains anguleux comportant des facettes faisant des angles à 120° (cristallisation dans le système hexagonal). Ces grains sont appelés grains à faces planes (symbole □).



Grains à faces planes photographiés à différents grossissements. Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond PAHAUT.

Cette métamorphose peut affecter la neige fraîche, les particules reconnaissables et les grains fins. Dans les deux premiers cas, elle s'accompagne d'un tassement important de la couche de neige lié à la disparition rapide des structures dendritiques. Pour ce qui concerne les grains fins, la variation de densité est faible. Avec un gradient de 15 °C/m, Il faut environ 10 jours pour qu'une neige fraîche se transforme en un mélange de particules reconnaissables et de grains à faces planes. Les grains à faces planes ont en moyenne des masses volumiques de l'ordre de 250 à 350 kg/m^3. Leurs tailles sont sensiblement plus élevées que celles des grains fins, pouvant aller en moyenne de 0,4 à 0,6 mm de diamètre. Ceci à pour conséquence un moins grand nombre de points de contact et donc une faible cohésion de frittage. La présence de cette neige est une source d'instabilité lorsqu'elle est recouverte par d'autres chutes de neige. Une telle strate, dite couche fragile, est souvent observée comme plan de glissement dans les avalanches, notamment de type déclenchement accidentel. Cependant, lorsqu'une couche de grains à faces planes est soumise à un faible gradient, l'effet de rayon de courbure peut alors provoquer un retour vers des formes arrondies. S'ils sont encore assez petits, la cohésion de frittage peut à nouveau consolider la strate.

1.1.5. La métamorphose de fort gradient (G > 20 °C/m)

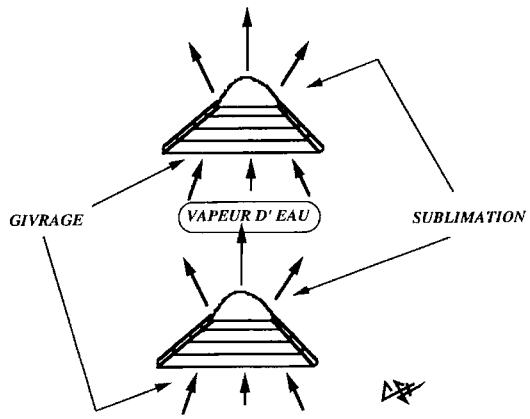
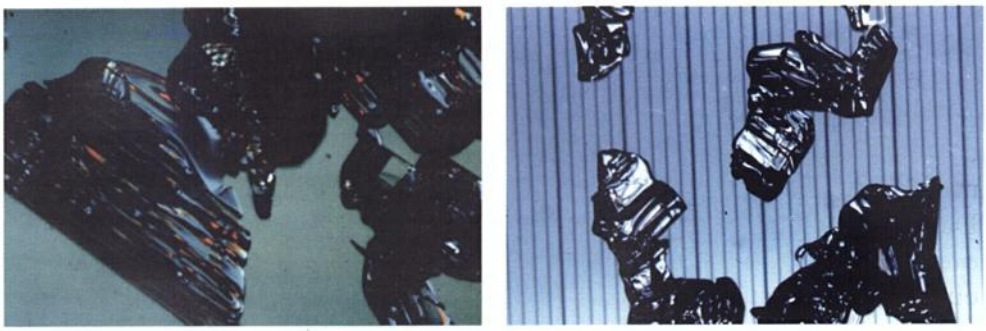


Figure 5.
Schéma de formation des gobelets.

Dans ce cas, la différence de température entre les grains suivant la verticale est très marquée, et les flux de vapeur sont plus intenses. Le premier stade de transformation se caractérise par l'apparition rapide de grains à faces planes accompagnée d'un tassement notable pour ce qui concerne la neige récente (+ ou /). Puis, peu à peu, chaque grain voit sa base croître par condensation de la vapeur d'eau provenant du grain inférieur. En raison de l'intensité du flux de vapeur, cette condensation se fait sous la forme de marches de glace. D'autre part,

sa partie supérieure est le siège de sublimation qui va lui donner un aspect plus arrondi et plus lisse. Dans sa forme finale, le grain prend généralement une forme pyramidale striée très caractéristique, communément appelée "gobelet" ou givre de profondeur (symbole Λ). Ses dimensions sont importantes (0,6 à 2 mm, et peuvent atteindre parfois 4 mm et plus).



Gobelets (ou givre de profondeur) photographiés à différents grossissements.
Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm.
Photographies Météo-France/CEN/Edmond PAHAUT.

A l'échelle de la strate de neige, ces grains de grosse dimension impliquent une très faible cohésion de frittage, les points de contact étant peu nombreux. Elle se comporte de façon caractéristique comme du gros sel et coule dans la main quand on essaye de la manipuler. Sa masse volumique, peu différente de celle des faces planes, varie entre 250 et 400 kg/m^3. C'est évidemment une neige qui, enfouie au sein du manteau neigeux, induit une instabilité latente importante. Surmontée d'une strate dure, elle est aussi à l'origine de nombreux départs d'avalanches suite à des surcharges naturelles ou accidentelles. La croissance des gobelets nécessite des échanges de vapeur d'eau de grain à grain ainsi que de l'espace pour se développer. La densité de la neige initiale, pour permettre ceci, ne doit pas être trop élevée. Dans des conditions naturelles, les neiges dont les densités excèdent 350 kg/m^3 ont peu de chance d'évoluer en gobelets, tout au plus en grains à faces planes.

Il faut noter que, même avec le rétablissement d'un faible gradient, les gobelets ne peuvent plus être transformés et que la strate gardera sa fragilité. Seule une humidification notable pourra les transformer. L'expérience montre qu'une couche de neige constituée de grains fins, d'une densité de 260 kg/m^3 et soumise à un gradient de l'ordre de 55 °C/m, se transforme en couche de gobelets dont les tailles atteignent en moyenne 2 mm au bout de 26 jours. Un très fort gradient peut en quelques jours transformer une neige récente en grains à faces planes. Un exemple assez classique est celui d'une faible chute de neige (10 cm) qui se dépose sur un manteau neigeux humidifié, cette chute étant suivie d'un refroidissement sensible avec des températures de surface de l'ordre de -10 °C. Le gradient subi est alors de l'ordre de 100 °C/m (base de la couche à 0 °C). En deux jours, des grains à faces planes peuvent apparaître et, avec le tassement, constituer une couche fragile, de l'ordre de quelques centimètres, très dangereuse pour l'avenir.

1.2. La neige humide

Lorsque de l'eau liquide est présente dans la neige, on dit qu'elle est humide et la température d'équilibre entre les trois phases présentes de l'eau (solide, liquide et gazeuse) est nécessairement de 0 °C. Si ceci est vrai à l'échelle de la strate de neige humide, il n'en est pas de même à l'échelle des grains de neige pour lesquels les températures d'équilibre ou températures de fusion de la glace vont être légèrement inférieures ou même parfois supérieures à 0 °C (entre

quelques millièmes et quelques dix millièmes de degré) suivant leur forme (convexité ou concavité) ou leur grosseur [5]. Ces très petites variations ainsi que la quantité d'eau liquide présente permettent d'expliquer les métamorphoses observées dans ce cas. On peut distinguer deux régimes de transformation liés à la quantité d'eau liquide présente, ou teneur en eau liquide (TEL) [6], ou encore à la composition du mélange eau, glace, air (vapeur d'eau).

1.2.1. Les régimes de la métamorphose de la neige humide

Le régime des faibles TEL

Dans le cas où la quantité d'eau liquide est faible (TEL massique < 2 %), celle-ci, sous l'effet des forces de capillarité, se loge autour des points de contact, formant ainsi un ménisque d'eau entre les grains ainsi que dans les creux des grains. Dans cette configuration, les diamètres des grains et, surtout, les forces capillaires exercées entre les grains, vont avoir pour effet d'abaisser la température d'équilibre ou point de fusion de la glace. Plus la quantité d'eau est faible et plus les forces capillaires sont importantes et abaissent la température de fusion (de l'ordre du millième de degré au-dessous de 0 °C). Les grains, dont les ménisques sont les plus petits en volume, auront donc tendance à fondre les premiers. Ce phénomène conduit à une harmonisation des quantités en eau des liaisons inter granulaires.

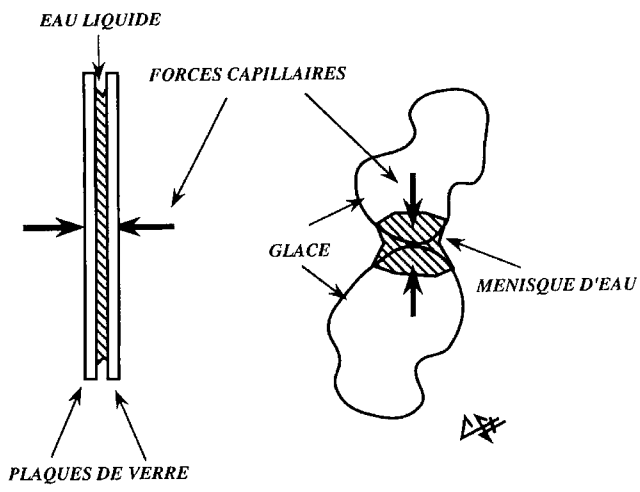


Figure 6. Lorsque l'on accole deux plaques de verre mouillées, on constate qu'il est très difficile de les séparer ensuite. Les forces capillaires se développent au sein du film d'eau liquide et s'exercent sur les plaques. C'est le même phénomène qui se produit lorsque deux grains de neige humides sont en contact. L'eau liquide forme un ménisque autour du point de contact et les forces capillaires tendent à les maintenir accolés.

Pour ce qui concerne les grains, l'abaissement de la température du point de fusion est inversement proportionnel à leur diamètre. En conséquence les grains les plus petits auront tendance à fondre les premiers ainsi que les parties les plus convexes (leur petit rayon de courbure les assimile à des grains de petit diamètre). Dans les deux cas, l'eau liquide libérée migre par capillarité vers les grains restants, ainsi que vers les zones concaves, provoquant leur arrondissement et leur grossissement en regelant.

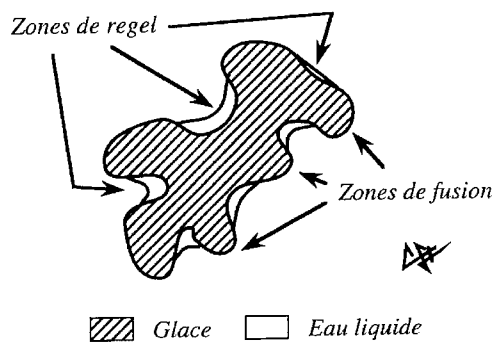


Figure 7. Schéma montrant, pour un grain de neige, les zones de fusion (convexités) et les zones de regel (concavités).

Ces passages de l'état solide à l'état liquide, et inversement, induisent respectivement absorption et libération de chaleur qui entretiennent la métamorphose. Les flux de chaleur entre les grains se font principalement par les liaisons eau/glace. A faible TEL, la phase liquide est très discontinue et cela nuit à la vitesse de la métamorphose. Si la TEL augmente, la métamorphose devient plus rapide en donnant de plus en plus la prédominance à l'influence du diamètre des grains. Ainsi dans le cas des faibles TEL, le grossissement des grains est assez lent du fait de la présence d'interfaces glace/air, mais devient plus rapide lorsque la TEL augmente. Cependant, même si la transformation est lente à l'échelle de la strate de neige, on observe un arrondissement des grains ainsi qu'un grossissement global. D'autre part, la présence de fortes pressions capillaires entre les grains maintient une assez bonne cohésion d'ensemble.

Le régime des fortes TEL :

Lorsque la TEL devient importante (>12% en masse), c'est à dire lorsque la phase liquide devient continue, les interfaces glace/air n'existent plus ou très peu. Dans ce cas, la pression capillaire est faible et seul le rayon de courbure des grains a un effet sur la modification de la température du point de fusion de la glace (de l'ordre du dix millième de degré au-dessous de 0 °C). Les grains les plus petits fondent alors au profit des plus gros sur lesquels il y a regel puisque la température de fusion y est plus élevée. De la même façon, les parties les plus convexes fondent au profit de celles qui le sont moins (notamment les parties concaves). Les flux de chaleurs, liés aux changements de phase (fonte, regel), se font facilement par la phase liquide. Celle-ci est en effet continue et sa conduction thermique est nettement supérieure à celle de l'air. Les transformations sont donc plus efficaces en régime de forte TEL.

La contrainte exercée aux points de contact entre les grains, si elle est assez forte (à la base d'une couche de neige épaisse), a pour conséquence d'abaisser la température du point de fusion à cet endroit. On observe alors une fusion et un élargissement des contacts. Cet effet est important puisque le point de fusion peut être de l'ordre du millième ou du centième de degré au-dessous de 0 °C. Dans ce régime de métamorphose, à l'échelle de la strate de neige, on assiste a une densification rapide avec arrondissement et grossissement des grains, mais, d'un point de vue mécanique, la disparition des liaisons entre les grains diminue fortement la cohésion globale.

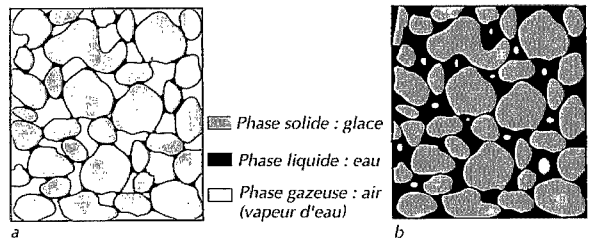


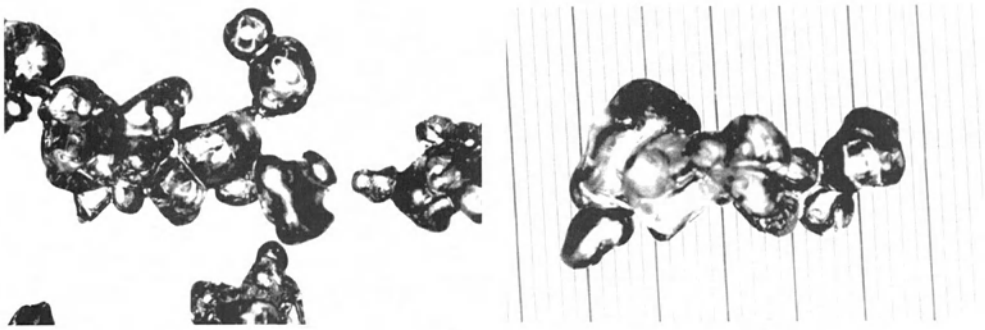
Figure 8. Schéma de la répartition des trois phases de l'eau, dans le cas des faibles TEL (a) et dans le cas des fortes TEL (b).

1.2.2. La métamorphose de la neige humide

L'humidification des strates de neige se fait essentiellement par la surface du manteau neigeux et de deux façons. Soit par fusion de surface sous l'effet d'un bilan énergétique positif des échanges neige/atmosphère (air chaud, fort rayonnement solaire, etc.), soit par l'apport direct d'eau liquide qu'est la pluie. Que ce soit l'eau de pluie, ou l'eau de fusion de surface, sa pénétration en profondeur ne se fait pas de façon homogène, mais par des cheminements préférentiels ou chemins de percolation. On peut donc trouver dans une couche de neige humide des TEL variables, voire sur un même niveau des zones humides et des zones sèches.

Cependant, pour une couche de neige dont la base ne repose pas sur une surface imperméable, il y a le plus souvent drainage de l'eau liquide dès que sa

capacité de rétention en eau est dépassée [7]. La valeur de rétention en eau de la neige dépend de sa densité avant humidification et varie entre 12 % en masse pour des densités de l'ordre de 250 kg/m^3 et 7 % pour des densités de l'ordre de 500 kg/m^3. Dans ces conditions, la métamorphose implique un arrondissement des grains assez rapide et on peut observer l'apparition de grains ronds (symbole ❍). Quant au grossissement, très lent pour les basses TEL, il devient plus rapide avec les TEL proches de la valeur de rétention. L'expérience montre qu'une neige récente, soumise à une humidification pendant 16 jours, se transforme en neige de grains ronds dont les diamètres atteignent environ 0,2 mm avec une TEL massique de l'ordre de 2 % et 0,6 mm si la TEL est de 10 %. A l'échelle de la strate de neige, on constate une augmentation progressive de la densité (jusqu'à 500 kg/m^3) et la cohésion, assez bonne aux faibles valeurs de TEL, tend à diminuer si cette dernière augmente.



Grains ronds photographiés à différents grossissements. Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond PAHAUT.

Lorsqu'une strate de neige s'humidifiant repose sur une surface imperméable, ou sur une couche de neige dans laquelle l'eau ne peut pas s'écouler (grains plus gros ou neige moins dense), une couche saturée peut se former. Dans ces conditions, la métamorphose se produit en régime de très forte TEL. D'une part, le grossissement des grains ronds est rapide et d'autre part, les liaisons de glace ainsi que capillaires entre les grains disparaissent. A l'échelle de la strate, la densification est importante, mais la cohésion devient très faible. On peut alors assister à des déclenchements d'avalanche de neige humide ou avalanches de fonte.

Lorsque ces neiges humides subissent un refroidissement, l'eau liquide présente gèle progressivement, créant de solides liaison de glace entre les grains ronds avec formation d'agglomérats de plusieurs mm et parfois de croûtes de glace. La neige acquière alors une excellente cohésion dite de regel. C'est ce que l'on peut observer fréquemment au printemps avec l'alternance des réchauffements diurnes et des refroidissements nocturnes.

Tous les types de neige peuvent être transformés par humidification en grains ronds et c'est d'ailleurs la seule transformation que peuvent subir des grains tels que les gobelets et la neige roulée. Les tailles des grains ronds sont généralement comprises entre 0,2 et 2 mm. Au cœur de l'hiver, un fort réchauffement accompagné de pluie peut donc être salutaire pour l'avenir d'un manteau neigeux fragilisé par la présence de telles strates. Il ne faut cependant pas négliger dans ce cas les risques de crue avalancheuse au moment du réchauffement.

2. Propriétés de la neige

Nous venons de voir comment le manteau neigeux, matériau poreux constitué de cristaux de glace, d'air (et parfois d'eau liquide), était formé et nous allons maintenant nous intéresser à ses propriétés physiques. Dans un premier temps, on passera en revue les propriétés mécaniques de la neige afin de mieux

comprendre son comportement si spécifique. Dans un deuxième temps seront abordées ses propriétés thermiques.

2.1. Les propriétés mécaniques de la neige*

2.1.1. Généralités

Si l'on examine plusieurs échantillons de neige, on ne peut que rester perplexe devant le large éventail de comportements observés. Ainsi, on notera que la neige est un matériau compressible, hétérogène (à toutes les échelles), pouvant subir des restructurations irréversibles, et se présentant sous des consistances diverses. Examinons plus en détail ces diverses caractéristiques.

La diversité des caractéristiques de la neige ne peut que rendre plus complexe l'étude fine de son comportement mécanique. Dans la pratique on examine la réponse du matériau selon les trois sollicitations élémentaires : la compression, la traction, le cisaillement.

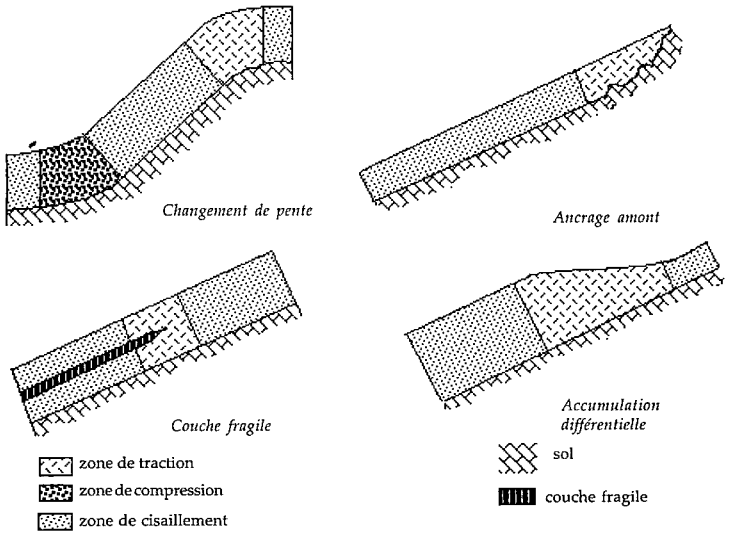
- Soumis à une *compression*, un échantillon de neige se tasse jusqu'à ce que la masse volumique atteigne une valeur maximale. Si la compression se fait rapidement, les grains n'ont pas le temps de se réorganiser et il y a rupture de l'échantillon. L'ordre de grandeur de la résistance à la compression est 10^5 Pa.
- Soumis à une *traction*, l'échantillon résiste jusqu'à une certaine limite fixée par sa cohésion. Meilleure est la cohésion, meilleure sera la résistance à la traction. Au-delà de ce seuil, l'échantillon casse. La résistance à la traction de la neige dépend de la vitesse de sollicitation : plus l'étirement sera rapide, plus brutale sera la rupture. En outre cette résistance est faible en comparaison de la résistance à la compression (la *résistance à la traction* est maximale pour des grains fins pour lesquels elle approche les 8 10^3 Pa).
- Soumis à un *cisaillement* important, un échantillon homogène se déforme jusqu'à la rupture. La *résistance au cisaillement* est essentiellement une fonction de la cohésion de la neige, mais d'autres paramètres (comme la masse volumique ou la forme des grains) jouent un rôle important. L'ordre de grandeur de cette résistance est 10^5 Pa. Si l'échantillon contient différentes strates, la résistance dépend des frottements à l'interface entre couches. La rupture se fera préférentiellement le long de ces interfaces.

On remarquera aussi que la réponse à une sollicitation est fonction du déplacement imposé, mais aussi de la vitesse de cette déformation. De même, il est important de retenir que la résistance de la neige et la déformation critique (au-delà de laquelle il y a rupture) dépendent entre autres de la vitesse de déformation.

2.1.2. La répartition des contraintes au sein du manteau

Quoique la force de gravitation s'applique uniformément au manteau neigeux, les contraintes au sein du couvert neigeux ne sont pas uniformes : elles varient afin de maintenir l'équilibre mécanique global au sein du manteau neigeux. Les accumulations, le relief, le déplacement imposé sur les pentes (reptation) provoquent des tensions supplémentaires (cisaillement, traction ou compression) qui évoluent en même temps que le manteau, par exemple à la suite d'une augmentation du fluage ou d'une diminution de la cohésion... Quelques configurations simples permettent de comprendre l'apparition ou la répartition de ces contraintes.

* Par Christophe ANCEY (Cemagref).



→ Figure 9. Schémas de principe de l'apparition des zones où le cisaillement devient important et conditionne l'instabilité éventuelle du manteau.

- Un changement de pente donne naissance à des régions où les contraintes de traction ou de compression vont devenir prépondérantes. Si la pente augmente vers le bas (zone concave), la vitesse de reptation augmente et tend à mettre en traction le manteau. Inversement, si la pente diminue vers le bas (zone convexe), une région de compression apparaît. Comme la résistance à la traction est moindre, la zone convexe sera une zone privilégiée de rupture ; c'est pourquoi ce type de terrain est un facteur favorable au départ d'avalanches.
- Lorsque le manteau neigeux est en contact avec une paroi, on parle d'*ancrage* du manteau (même si la paroi n'a aucune action d'adhérence sur le manteau neigeux). Cette zone est généralement supposée être une zone de traction. Le terme d'ancrage est une notion "fourre-tout", qui recouvre des acceptions variées selon les personnes : adhérence du manteau ou action d'obstacles (comme des rochers proéminents) qui freinent le glissement du couvert neigeux. Dans l'ensemble, il faut retenir qu'un ancrage désigne tout ce qui sert à retenir le manteau neigeux.
- L'existence d'accumulations d'épaisseur différente sur une pente provoque des différences de fluage et de pression, donc apparition d'une zone de traction si la variation de hauteur de neige se fait selon la ligne de pente ou d'une zone de cisaillement si la variation intervient sur une même ligne de niveau.
- L'existence d'une couche fragile (neige de faible cohésion favorisant le glissement entre strates) induit également des différences de fluage, donc l'apparition d'une zone de traction à la liaison des deux zones.

2.2. Les propriétés thermiques de la neige

La température joue un rôle important dans l'évolution de la neige et la diversité de ses caractéristiques. Les variations de température proviennent essentiellement des conditions atmosphériques. Donnons rapidement ici quelques indications sur les propriétés thermiques de la neige.

2.2.1. Capacité calorifique et chaleur latente

La différence de température entre l'air et l'intérieur du manteau entraîne des transferts de chaleur entre les deux milieux. Pour en rendre compte, on introduit la *capacité calorifique* que l'on peut définir comme la quantité de chaleur (en joule) reçue ou perdue pour une variation de température de 1 °C. Pour la neige, matériau poreux, la capacité calorifique est considérée comme étant celle de la glace, c'est-à-dire : C=2,09 J /g/°C. En outre, lorsqu'il y a un changement d'état, il faut fournir une quantité de chaleur (dite *chaleur latente*) L à l'eau (ou en dissiper) afin que le changement d'état se réalise.

Changement d'état	L(J/g)
Fusion	+ 334
Sublimation	+ 2834
Vaporisation	+ 2500
Condensation solide	- 2834
Solidification	- 334
Condensation liquide	- 2500

Le changement d'état eau/glace nécessite une chaleur latente déjà importante, puisque dix fois supérieure à la capacité calorifique de la glace. Ainsi, il faut fournir Q_1=21 J pour faire passer la température d'un échantillon d'un gramme de glace de -10 °C à 0 °C, alors que Q_2=334 J sont nécessaires pour assurer la fusion d'un gramme de neige. La fonte de la neige nécessite donc des quantités importantes de chaleur.

2.2.2. Conductivité de la neige

La neige est un milieu poreux capable de conduire la chaleur : les échanges de chaleur se font par conduction dans les phases gazeuse et solide et par diffusion de la vapeur d'eau. Pour étudier comment se propage la chaleur dans un corps, le physicien introduit la *conductivité thermique* qui traduit la capacité du matériau à transmettre la chaleur. La conductivité thermique λ de la neige est faible : la neige est un excellent isolant car elle emprisonne beaucoup d'air. Cette conductivité est fonction de la densité de la neige : plus la neige a une masse volumique faible, plus elle contient d'air et plus elle est isolante. Pour de la neige fraîche, le pouvoir isolant est proche de celui du polystyrène. Pour fixer les idées, on a $0{,}05<\lambda<1$ W/m/°C pour la neige. En comparaison, on a λ(air)=0,02, λ(glace)=2,22 et λ(polystyrène)=0,1 W/m/°C. C'est ce pouvoir isolant qui est exploité par exemple dans la construction des igloos ou qui permet de protéger la végétation des rigueurs de l'hiver.

2.3 Bilan énergétique du manteau neigeux*

L'état thermique du manteau neigeux dépend étroitement des échanges avec l'atmosphère. Le bilan énergétique fait intervenir de nombreux termes : rayonnement solaire et infrarouge, température et humidité de l'air, vent, nébulosité, précipitations (figure 29). La neige interagit également avec le sol sous-jacent mais les échanges sont faibles : dans le cas d'un manteau neigeux saisonnier, le flux thermique du sol est de l'ordre de quelques W/m². Il correspond essentiellement à la restitution de la chaleur emmagasinée par celui-ci durant l'été, le flux géothermique (chaleur provenant des couches internes de la Terre) étant beaucoup plus faible. Dans la plupart des cas, ce flux est suffisant pour maintenir la base du manteau neigeux à 0 °C, voire d'y entretenir un fonte très faible mais continue pendant tout l'hiver. En haute montagne (ou par temps froid si le manteau neigeux est très peu épais) la base du manteau neigeux peut être à des températures négatives.

2.3.1 Le rayonnement solaire

Une grande partie du rayonnement solaire incident est réfléchie par la neige. L'albédo (c'est-à-dire le rapport du rayonnement réfléchi sur le rayonnement incident) est fort : il varie de 0,9 pour une neige récente à 0,5 pour une neige de printemps. Par comparaison, l'albédo d'une surface herbeuse est de 0,2 à 0,3.

Deux facteurs sont responsables de la diminution de l'albédo. Le premier est la présence d'impuretés (particules de carbone-suie, débris végétaux...), le deuxième est la taille des grains : il diminue lorsque la taille des grains augmente. Même si dans tous les cas l'albédo de la neige est fort, il faut noter que ses variations ont des conséquences très importantes pour le bilan énergétique de la neige : si l'albédo varie de 0,9 à 0,5 la part du rayonnement solaire absorbé est multipliée par

* Par Eric MARTIN (Météo-France).

5, passant de 10 à 50 % du rayonnement incident. La partie non réfléchie du rayonnement solaire ne pénètre pas au-delà d'une vingtaine de centimètres.

Le rayonnement solaire a des variations importantes tout au long de l'année. La quantité d'énergie incidente (pour une surface horizontale) est multipliée par environ 5 entre décembre et avril. L'énergie effectivement absorbée par le manteau neigeux est multipliée par un facteur plus important à cause de la baisse de l'albédo. Ainsi, le rayonnement solaire est négligeable dans le bilan de surface en hiver, il est prépondérant au printemps.

2.3.2 Le rayonnement infrarouge

Tout corps émet un rayonnement dont l'intensité et la gamme de longueurs d'onde dépendent de sa température. C'est le cas du soleil (température environ 6 000 °C, cas traité dans le paragraphe précédent) mais aussi celui des corps de notre environnement (atmosphère, nuages, arbres, neige..., températures de -40 à 40 °C) ce dernier type de rayonnement étant appelé infrarouge ou thermique. De plus, l'énergie émise augmente avec la température. La neige absorbe entièrement ce rayonnement et en émet un.

Le rayonnement reçu dépend des conditions atmosphériques. Par ciel clair il est très faible : la neige se refroidit jusqu'à ce que le déficit en rayonnement infrarouge soit compensé par d'autres flux (flux turbulents de chaleur par exemple). Dans le cas de brouillard ou de nuages très près du sol, neige et nuage sont à peu près à la même température et le bilan est globalement équilibré.

2.3.3 Les flux turbulents de chaleur sensible et latente

L'air peut réchauffer ou refroidir la surface du manteau neigeux, le sens des échanges dépend des températures et humidité des deux milieux. Cet échange ne se fait pas par conduction (la conductivité thermique de l'air est extrêmement faible), mais par échanges turbulents. La chaleur est transmise par les nombreux tourbillons existant dans l'écoulement de l'air au-dessus de la neige. Ce transfert est d'autant plus efficace que la vitesse du vent est importante, mais la surface de la neige étant lisse, ces échanges restent assez faibles si on les compare à ceux se produisant sur d'autres surfaces (prairie par exemple).

Il existe deux types d'échanges de chaleur. Le premier est le flux de chaleur sensible. Il est fonction de paramètres tels que la différence de température entre l'air et la neige, la stabilité de l'air et la rugosité de surface. Le deuxième est le flux de chaleur latente, qui dépend de la différence entre pression de vapeur d'eau à la surface de la neige et dans l'air. Il est associé à un transfert de masse : condensation solide (dépôt de givre) ou liquide, sublimation ou vaporisation selon les cas.

En général, la température de surface de la neige est inférieure à celle de l'air, les échanges turbulents de chaleur sensible contribuent généralement à réchauffer la neige. Les échanges de chaleur latente sont plus variables, un air sec a tendance à faire sublimer la neige, et donc à la refroidir, alors qu'une couche de givre de surface est la preuve d'un apport passé de chaleur latente.

2.3.4 Les précipitations

On peut considérer que les précipitations sont associées à des transferts de chaleur. Une chute de neige correspond plutôt à une perte d'énergie (apport de froid) pour le manteau neigeux, en ce sens qu'il faudra apporter plus d'énergie pour le faire fondre. La pluie, en plus d'humidifier le manteau neigeux et d'en modifier profondément les caractéristiques physiques lui apporte un peu de chaleur. Contrairement à une idée répandue, ce n'est pas l'action directe de la pluie qui fait fondre la neige : dans ce type de situation, la fonte est essentiellement dû au flux infrarouge provenant des nuages et aux flux turbulents de chaleur. 50 mm de pluie à 1 °C font fondre moins de 1 cm de neige légère (100 kg/m^3).

2.3.5.Quelques situations typiques

Par rapport à un autre type de sol (prairie par exemple), la neige se caractérise par un albédo élevé (qui limite le rayonnement absorbé) et une surface lisse (qui limite les échanges turbulents de chaleur). De plus, ses faibles capacité calorifique et conductivité font que la température près de la surface peut être très différente de celle de l'air (dans certaines conditions 10 °C ou plus). En fonction de l'équilibre entre les différents termes, la quantité de chaleur entrant dans le manteau neigeux peut être positive (augmentation de la nébulosité, début de matinée) ou négative (refroidissement ou nuit de ciel clair).

Dans l'immense majorité des cas le bilan est équilibré et la température de surface de la neige est inférieure à celle de l'air : la perte d'énergie par rayonnement infrarouge est compensée par des apports de chaleur sous forme de flux infrarouge, solaire et turbulents. En cas de Föhn le rayonnement infrarouge incident et les flux turbulents augmentent fortement (nuages, augmentation de la température de l'air, vent), des quantités importantes de neige peuvent fondre dans ce genre de situations (quelle que soit la quantité de pluie). En période de fonte au printemps, c'est évidemment le rayonnement solaire qui joue un rôle déterminant pour la fonte de la neige.

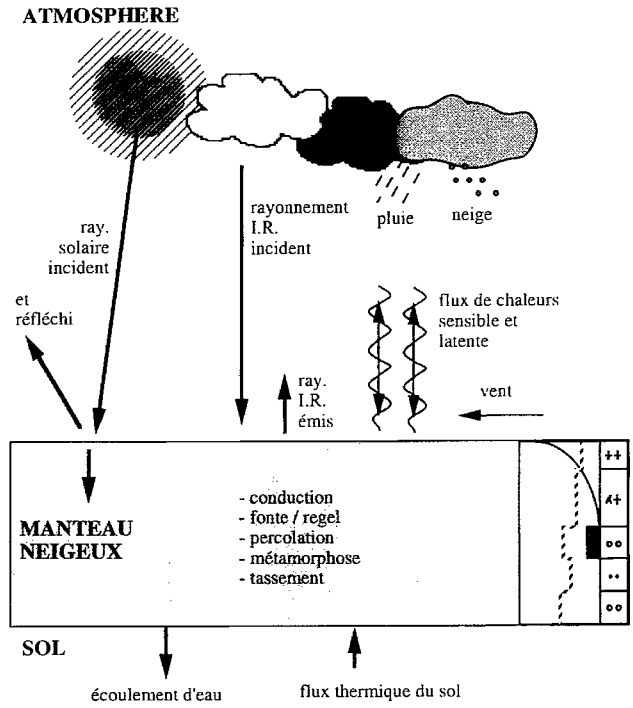


Figure 10. Les termes du bilan énergétique du manteau neigeux.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] E. PAHAUT, *Les cristaux de neige et leurs métamorphoses*, Monographie de la Météorologie Nationale N° 96, (1975).

[2] S. C. COLBECK, *Théorie of metamorphism of dry snow*, Journal of geophysical research, 88 (1983) 5475-5482.

[3] G. GUYOMARC'H, L. MERINDOL, *Etude du transport de neige par le vent. Symposium ANENA-CISA-IKAR* (1991) 77-82.

[4] D. MARBOUTY, *An experimental study of temperature-gradient metamorphism*, Journal of glaciology, vol. 26 (1980) 303-312.

[5] S.C. COLBECK, *Théorie of metamorphism of wet snow*, CRREL Report 313, (1973).

[6] E. BRUN, *Investigation on wet snow metamorphism in respect of liquid water content*, Annals of glaciology 13 (1989) 22-26.

[7] C. COLÉOU, *Irreductible water saturation in snow : experimental results in a cold laboratory*, Annals of glaciology, 26 (1998) 64-68.

Chapitre 4
COMMENT CONNAÎTRE LES CARACTÉRISTIQUES D'UN MANTEAU NEIGEUX* ?

L'objet de ce chapitre est de donner des indications sur les méthodes pratiques d'investigation des caractéristiques du manteau neigeux. Le premier paragraphe s'intéresse aux sondages par battage et stratigraphique, qui sont couramment utilisés au sein du réseau nivo-météorologique de Météo-France ; l'accent est surtout mis sur l'analyse des histogrammes de battage. Le deuxième paragraphe donne quelques moyens plus sommaires d'investigation et s'adresse surtout aux skieurs et autres randonneurs. Le dernier paragraphe met l'accent sur les renseignements que l'on peut tirer d'une observation directe de la surface du manteau neigeux.

1. CONNAISSANCE DU MANTEAU NEIGEUX

1.1. Les paramètres physiques du manteau

Pour comprendre un peu mieux la structure et les caractéristiques d'un manteau neigeux donné, on cherche à quantifier un certain nombre de grandeurs représentatives des propriétés que l'on souhaite étudier. Tout d'abord, on cherche généralement à décrire la structure du manteau et à cet effet on réalise une coupe verticale pour mettre en évidence la superposition des différentes couches : c'est l'objet du *sondage stratigraphique*. Ensuite, on essaye de caractériser ces couches par le relevé d'un certain nombre de mesures ou de données qualitatives :

• la *hauteur* de la couche : le profil étant vertical, la hauteur d'une couche est mesurée verticalement avec un décimètre ; il faut prendre garde de ne pas confondre avec l'épaisseur de la couche (mesurée selon la perpendiculaire à la ligne de pente) ;

• la *nature des grains* : on donne le type de grains et leur diamètre moyen. Dans certains cas, une même couche est constituée de plusieurs sortes de grains et on les indique par ordre d'importance. L'observation se fait à la loupe, plus rarement à l'œil nu (valable pour des gobelets), mais elle est parfois délicate à réaliser sur le terrain [1]. L'usage de l'iso-octane permet d'observer au microscope les grains longtemps après leur prélèvement [2] ;

• la *masse volumique* : c'est la masse de neige contenue dans un volume d'1 m^3. Elle se mesure en pesant la masse de neige contenue dans un carottier. La masse volumique dépend de nombreux paramètres, notamment l'humidité, le degré de vieillissement, etc. Elle varie entre 20 et 600 kg/m^3 ;

• la *température* : elle est mesurée par une sonde électronique ou avec un thermomètre classique ;

• la *teneur en eau liquide* (TEL) : c'est une mesure de l'humidité de la neige. On parle en général de TEL volumique mais il existe aussi une TEL massique. On la définit comme le rapport du volume d'eau liquide sur le volume total de neige (en %). On la détermine à l'aide d'un appareil basé sur l'atténuation des ondes radioélectriques. Dans tout le texte, seule la TEL volumique sera utilisée ;

• les *caractéristiques mécaniques* : on mesure de *la résistance au cisaillement* à l'aide d'un scissomètre (cf. ch 6, § 1.5.1.) et la *résistance à la pénétration* à l'aide d'un sondage par battage (ou plus sommairement par un test manuel).

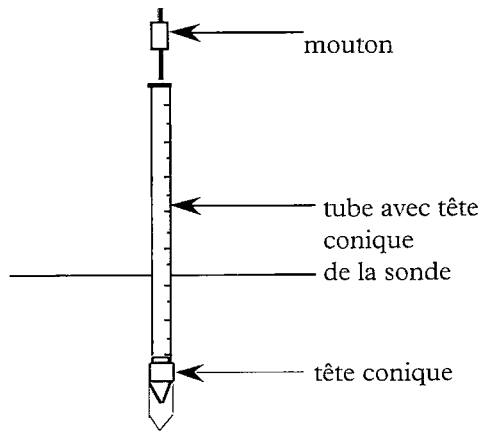
* Ce chapitre a été écrit par Christophe ANCEY.

1.2. Sondages stratigraphique et par battage

Les nivo-météorologues arrivent à donner une description relativement complète du manteau neigeux à l'aide d'une série de sondages stratigraphiques et de battage. Un sondage est caractéristique d'une pente, d'une exposition, d'une altitude et de la date : sous forme d'un histogramme, il donne strate par strate le type de grains, des valeurs de résistance mécanique, d'humidité, de température.

1.2.1. Principe

Un profil stratigraphique est précédé en général par un sondage par battage. Cette méthode est issue des études géotechniques pour étudier le sol lors de la construction d'ouvrages. Elle consiste à enfoncer un tube en laissant tomber le long d'une tige un poids (appelé *mouton*, de poids P) d'une distance fixée h. L'opérateur fixe cette hauteur h pour avoir approximativement un enfoncement de 1 cm par lâcher.



→ Figure 1. Schéma de principe d'une sonde de battage.

On réitère l'opération n fois jusqu'à ce que cet enfoncement soit compris entre 3 et 5 cm. On continue ainsi de suite jusqu'à la pénétration totale. Lorsque la sonde a une longueur insuffisante, on la rallonge avec des tubes supplémentaires (de longueur 100 cm). On désigne par q le nombre de tube(s) utilisé(s) et Q le poids de la tige (en général Q=1 kgf). En connaissant la mesure de la pénétration de la sonde (notée d en cm), on détermine une résistance au battage R (en kgf pour kilogramme-force où 1kgf = 10 newtons) :

$$R = \frac{nhP}{d} + P + qQ$$

La résistance à la pénétration donne une idée de la cohésion des couches suffisamment épaisses et, plus difficilement, une idée des résistances à la traction et à la compression. Il faut retenir que, plus la résistance R est élevée, meilleure est la cohésion de la couche.

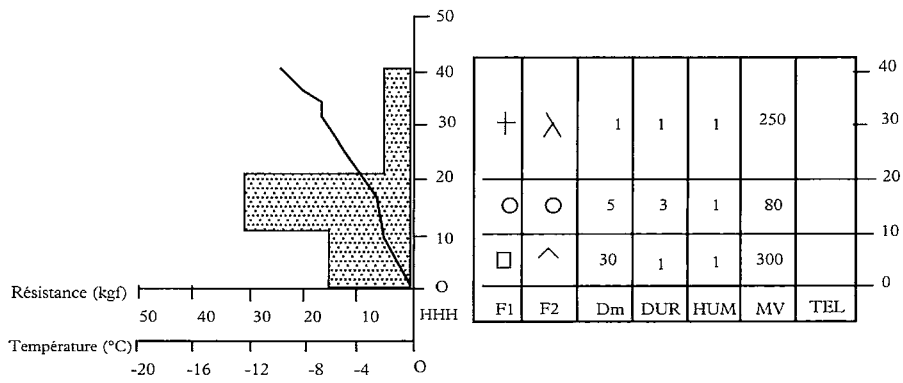
On reporte le profil de battage sous forme d'un histogramme que l'on complète par la mesure de la masse volumique, de la TEL et en précisant la nature de chaque grain (F1 désigne le type de grains majoritaires, F2 indique le type de grains minoritaires) et leur diamètre moyen (Dm). Ces mesures sont effectuées en creusant une tranchée verticalement dans le manteau pour effectuer le sondage stratigraphique. Le profil stratigraphique permet d'individualiser les différentes strates. Un indice sommaire permet d'évaluer la dureté (D) de chacune selon que l'on enfonce le poing (dureté 1), les quatre doigts (dureté 2), un doigt (dureté 3), un crayon (dureté 4), un couteau (dureté 5). On peut de même se

faire une idée du degré d'humidité (Hu) de la couche en essayant de former des boules de neige avec une main gantée. On attribue le degré 1 lorsque la confection de boules est impossible (neige sèche), le degré 2 lorsque cela est possible (neige peu humide), le degré 3 lorsque la boule mouille le gant (neige humide), le degré 4 lorsque l'eau suinte de la boule (neige mouillée), le degré 5 lorsque l'on est en présence d'un mélange eau+neige. Le profil stratigraphique permet aussi de mettre en évidence l'existence de couches minces dont la faible épaisseur empêche la détection par la méthode de battage classique. Le choix de la situation du sondage est essentiel pour que le sondage soit représentatif du manteau. L'extrapolation à d'autres pentes, altitudes, expositions est délicate. Il faut de plus noter qu'il n'y pas toujours une superposition précise du relevé stratigraphique et de l'histogramme de battage. Ce décalage éventuel est atténué par l'utilisation d'un pénétromètre dynamique (voir le *pandalp*, § 1.2.6.). Il ne faut pas oublier de noter les conditions météorologiques au moment du sondage et la description du lieu.

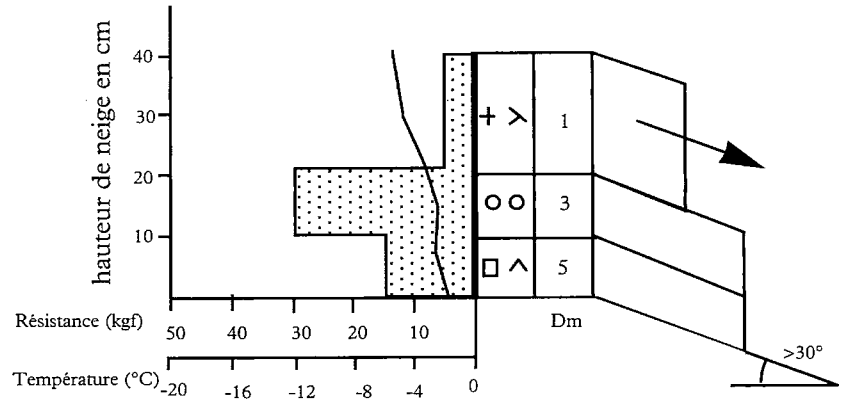
Éventuellement, on peut mesurer la résistance au cisaillement d'une couche à l'aide d'un scissomètre, qui se compose d'un petit moulinet muni de quatre ailettes qu'on enfonce dans la neige. On tourne le moulinet jusqu'à avoir rupture de l'échantillon; on peut relier la résistance au cisaillement à la valeur du couple exercé pour qu'il y ait rupture (cf. ch. 6).

1.2.2. Représentations d'un sondage

La manière la plus facile de reporter les données est de les représenter sous forme d'un histogramme qui donne un profil de résistance (issu du sondage par battage) accompagné du profil de température. On juxtapose un tableau réalisé à partir des données du sondage stratigraphique : nature des grains (F1, F2), diamètre moyen (Dm), dureté (DUR), humidité (H), masse volumique (MV), et teneur en eau liquide (TEL) en fonction de la hauteur de neige (HHH). On complète en général par le descriptif du lieu (massif, date, exposition, altitude) et des conditions atmosphériques (température de l'air, nébulosité, précipitation, vent...). A noter qu'il existe plusieurs variantes de représentation selon les pays.



➡ Figure 2. Type de représentation préconisé par Météo-France. HHH désigne la hauteur de neige en cm, F1/F2 le type de grains majoritaires/minoritaires, Dm le diamètre moyen, DUR et HUM les indices de dureté et d'humidité, MV et TEL les mesures de masse volumique et de TEL.



➟ Figure 3. Type de représentation en usage en Suisse (IFENA) et aux États Unis. La flèche indique qu'il y a eu un décrochement de la couche superficielle. La déclivité est indiquée également.

1.2.3. Analyse d'un sondage

1.2.3.1. Analyse quantitative

La résistance au battage R traduit la cohésion de la couche. Une résistance inférieure à 4 kgf indique la présence d'une couche de faible cohésion tandis qu'une couche de résistance supérieure à 50 kgf est considérée comme solide. Les couches fragiles minces (épaisseur inférieure à 2 cm) ne sont pas détectables par le sondage par battage ; il faut alors se ramener à l'utilisation de l'indice de dureté (D). Ce test manuel est l'équivalent grossier du sondage par battage :

Cohésion	Degré	Test manuel	R équivalente
Très tendre	1	Poing	0-2 kgf
Tendre	2	4 doigts	2-15
Dur	3	1 doigt	15-50
Très dur	4	Crayon	50-100
Compact	5	Couteau	>100

La température permet de préciser les processus de métamorphoses en cours. Pour des conditions nivo-météorologiques pérennes, le calcul des gradients couplé à l'analyse morphologique des couches permet de faire des hypothèses sur l'évolution du manteau. Si la température de la neige est de 0 °C, il y a présence d'eau liquide et il faut alors tenir compte de la TEL. Le troisième paramètre, la TEL, permet d'apprécier l'humidité des couches. Si une faible valeur de la TEL (le seuil est voisin de 5 %) permet d'accroître la stabilité (cohésion capillaire), des valeurs supérieures augmentent l'instabilité de la couche.

1.2.3.2. Analyse qualitative

Le profil de résistance permet de subdiviser le manteau en quelques parties homogènes (où la résistance à la pénétration est du même ordre de grandeur). L'allure du profil de battage est *régulièrement croissante* si les résistances sont croissantes en allant de la surface vers le sol. On peut aussi déceler les couches fragiles, qui confèrent au manteau une structure en plaques, c'est-à-dire une succession irrégulière de couches cohérentes séparées par des couches fragiles (de plus ou moins grande épaisseur). Une analyse plus fine doit tenir compte par la suite des renseignements concernant la morphologie, la masse volumique, l'humidité, l'épaisseur de chaque couche et la nature des liaisons entre couches. Dans ce

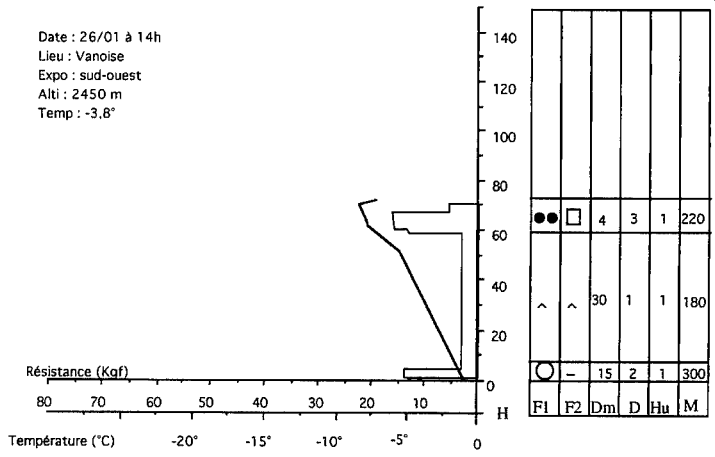
dernier cas, une attention toute particulière doit être faite dès que l'on rencontre une discontinuité ou une couche mince entre deux parties bien individualisées :

- surface de contact entre une vieille neige (dont la métamorphose est bien avancée) et une neige récente ;
- couche intermédiaire de faible cohésion : givre de surface enneigé ou couche de gobelets ;
- croûte de regel ou lamelle de glace ;
- surface de contact entre de la neige sans cohésion et la partie supérieure (couches superficielles).

1.2.4. Exemples de sondage stratigraphique

Les figures suivantes illustrent quelques exemples de sondage et leur analyse.

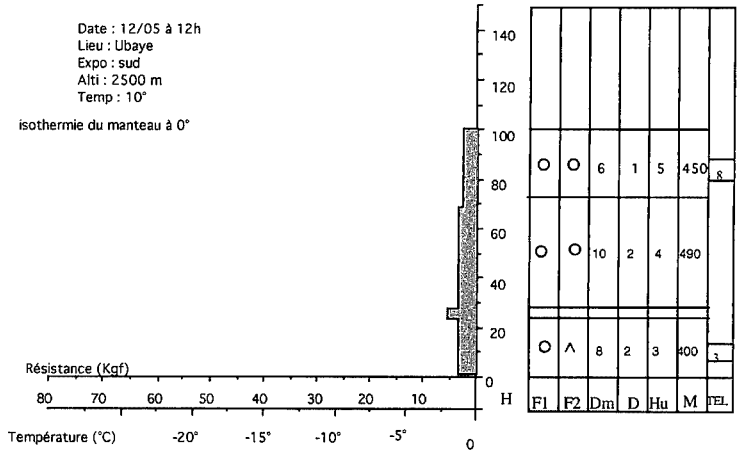
– *Manteau neigeux à structure de plaque dure :*



➟ Figure 4. Profil réalisé dans le massif de la Vanoise par beau temps le 26 janvier à 14 h à 2450 m. Le profil met en évidence l'existence d'une plaque de faible épaisseur (10 cm), composée de grains fins (neige légèrement ventée ?) et de grains à faces planes (métamorphose de gradient moyen due aux conditions anticycloniques régnant depuis plusieurs jours).

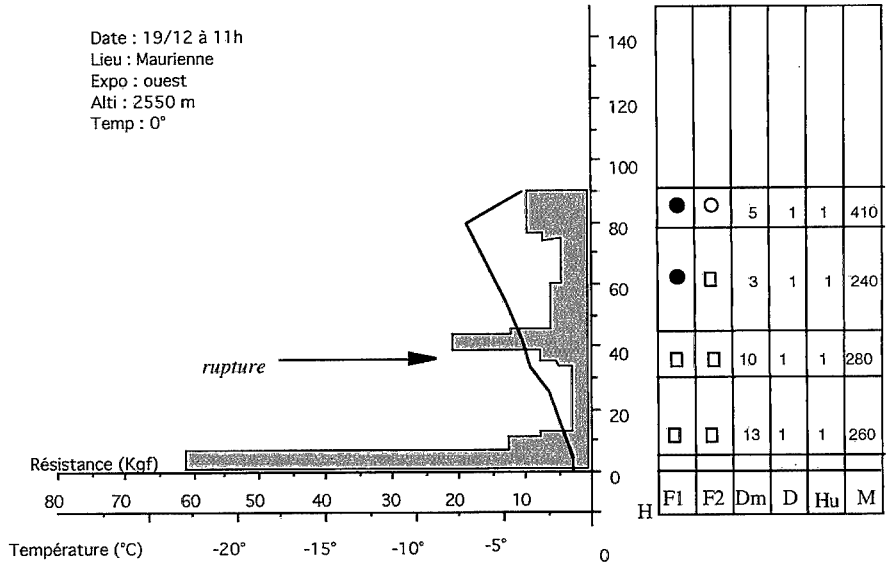
Cette plaque repose sur une épaisse couche de gobelets (50 cm) de faible cohésion. Cette couche d'épaisseur importante date probablement de décembre (temps sec et froid). Le gradient de température est encore important (jusqu'à 0,18 °C/cm entre 40 et 50 cm). On peut considérer ce manteau comme instable compte tenu de la superposition d'une plaque dure (solidité moyenne, faible épaisseur) sur une grosse couche de faible cohésion : il a provoqué la mort d'un skieur retrouvé enseveli sous 1,50 m de neige. D'après [3].

– *Manteau neigeux de printemps :*



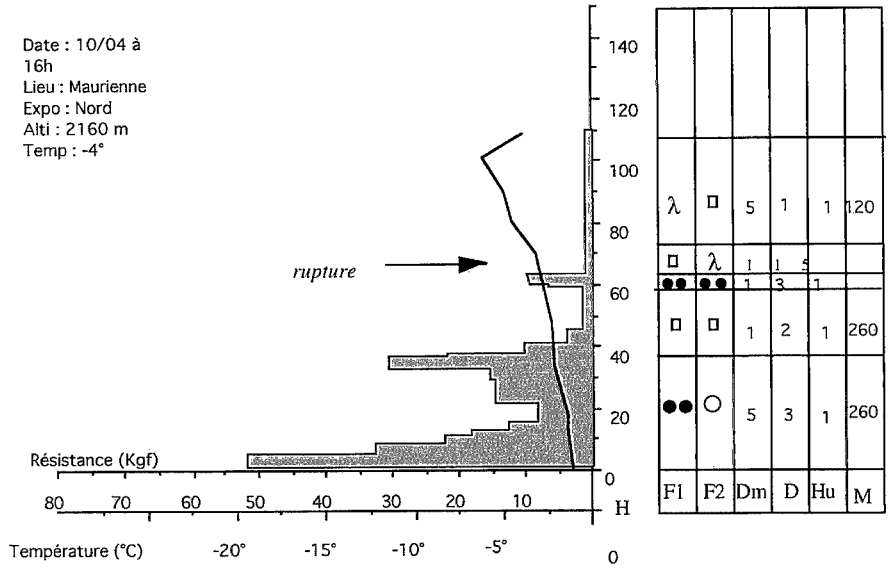
➟ Figure 5. Profil réalisé dans la vallée de l'Ubaye par beau temps le 12 mai à 12 h à 2500 m d'altitude. L'ensemble du manteau est de faible cohésion et largement humidifié. La TEL est supérieure à 6 % sur la quasi totalité du manteau, ce qui indique le "pourrissement" de l'ensemble du manteau, qui est déjà ancien (la masse volumique approche dans la partie médiane les 500 kg/m³). Le risque d'avalanche (mobilisant de la neige lourde) n'est pas négligeable. D'après [3].

– *Manteau neigeux de faible cohésion :*



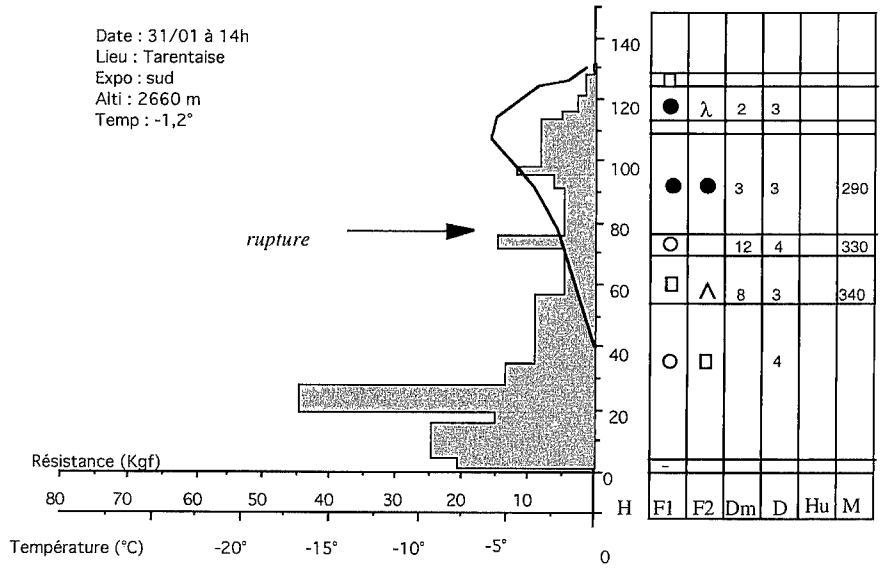
➟ Figure 6. Profil réalisé dans la vallée de la Maurienne par temps couvert le 19 décembre à 11 h à 2 550 m. Le manteau est composé de neige froide et dense mais de faible cohésion. Il présente une structure en sandwich. Deux couches (entre 60 et 75 cm et entre 10 et 40 cm) sont visibles et présentent une résistance faible (moins de 8 kgf). La partie inférieure (de 5 à 55 cm) du manteau est composée essentiellement de faces planes.
Il s'agit d'un couvert neigeux fragile qui est parti naturellement en avalanche avec départ en plaque. La rupture a affecté les cinquante premiers centimètres en surface (entre 40 et 90 cm). La raison du départ et de ligne de fracturation (en pleine pente) ne sont pas élucidées. Le sondage n'a été effectué que le lendemain.

– *Manteau neigeux après une chute de neige :*



➟ Figure 7. Profil réalisé dans la vallée de la Maurienne par beau temps le 10 avril à 16 heures à 2 160 m. Le manteau se structure *grosso modo* en 3 parties : à la base, on trouve une épaisse couche de neige transformée (grains fins et ronds sur 40 cm) dont la résistance à la pénétration présente d'importantes variations (entre 10 et 50 kgf).
Juste au-dessus, on est en présence d'une couche de faces planes (croûtée à l'interface) sur une vingtaine de centimètres; sa résistance est médiocre (environ 3 kgf). La couche superficielle est composée de particules reconnaissables en cours de métamorphose (apparition de faces planes), elle reste encore légère (poudreuse skiable). Cette configuration du manteau est responsable d'une avalanche accidentelle ayant emporté deux skieurs (1 victime, 1 blessé). La rupture a mis en mouvement les quarante centimètres en surface. D'après [8].

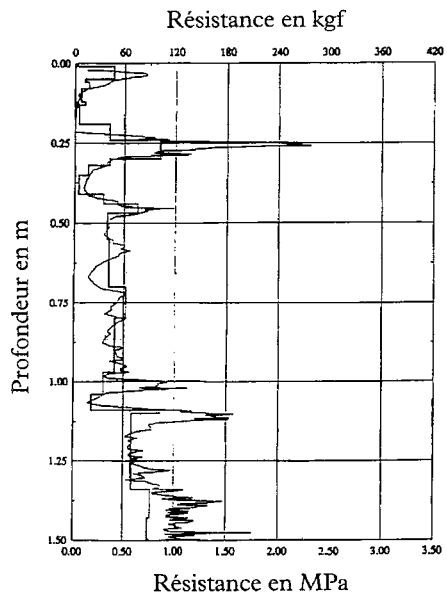
– *Manteau neigeux après un épisode venteux :*



➟ Figure 8. Profil réalisé dans la vallée de la Tarentaise par beau temps le 31 janvier à 14 heures à 2660 m d'altitude. Le manteau neigeux se scinde en deux parties bien distinctes séparées par une croûte de regel entre 72 et 78 cm. La base résulte des importantes chutes de neige qu'il y eut en décembre; elle a été largement humidifiée (grains ronds) par le redoux qui a suivi.
Dans sa partie supérieure, la couche de faces planes et gobelets doit résulter des chutes de neige du début janvier après lesquelles a régné une assez longue période de beau temps, froid et sec. Au-dessus, on à une couche épaisse de grains fins (50 cm) correspondant aux dernières précipitations : en effet, à la fin du mois, le temps s'est rapidement détérioré, avec des chutes de neige jusqu'en basse altitude (25 et 26/01) accompagnées de très violentes bourrasques. Le jeudi 26 a été une journée de transition, ensoleillée et sans vent. Ce dernier a soufflé de nouveau violemment le vendredi 28 jusqu'au samedi 29. Le temps était très beau. Une avalanche avec départ en plaque, concernant cette dernière partie (plan de glissement sur la croûte de regel) a été déclenchée, l'après-midi du 29, par le passage d'un groupe de skieurs. Il y a eu 7 personnes emportées; une seule a survécu. D'après [9].

1.2.5. Perspectives dans l'utilisation du battage : le pandalp

Depuis 1992, un nouveau système issu des techniques utilisées en reconnaissance des sols a été testé : il s'agit du Pandalp (pour *pénétromètre autonome numérique dynamique assisté par ordinateur*) qui permet d'automatiser l'acquisition des données et les procédures liées à la manipulation de la sonde. En revanche contrairement au sondage classique (il faut n coups pour que la sonde s'enfonce d'une distance d), le pandalp calcule une résistance dynamique à la pénétration en connaissant l'enfoncement et la vitesse d'enfoncement pour un coup donné (relation empirique donnée par la formule des Hollandais). Un tel système nécessite en outre un seul opérateur et si le temps de préparation du matériel est plus long par rapport à la méthode classique, l'exécution du profil est nettement plus rapide. En revanche son prix (environ 35 000 francs) et les précautions de manipulation du matériel sont actuellement les freins au développement du Pandalp. La finesse du résultat est considérablement augmentée; les strates minces sont plus facilement détectables [4]. La prévision du risque d'avalanche réalisée à partir de sondages par battage s'en trouve dès lors améliorée.



➡ Figure 9. Le graphique permet de confronter les résultats donnés par le Pandalp et le sondage classique. Le test a été effectué au col du Lac Blanc (Alpe-d'Huez) le 30 mars 1993. Il s'avère qu'il y a une bonne concordance générale des deux courbes même s'il existe des différences d'estimations pour certaines strates (celle à 25 cm de profondeur par exemple). On remarque aussi que le Pandalp détecte certaines couches ignorées par le battage classique (à 1,10 m de profondeur par exemple). D'après [4].

1.2.6. Les limites d'utilisation du sondage stratigraphique

Dans l'analyse précédente, l'étude de la stabilité et du risque d'avalanche n'a été qu'évoquée (voir chapitres 6 et 10 pour plus de détails). La prévision du risque à partir de ce type de sondages n'est pas toujours évidente : une interprétation fine est affaire de spécialistes. Par ailleurs, il faut signaler que :

• la résistance à la pénétration donne une idée de la cohésion au sein de la couche mais ne donne aucun ordre de grandeur de la résistance à la traction ou du frottement entre deux couches, alors qu'ils constituent les deux paramètres essentiels dans la détermination du risque ;

• une bonne cohésion n'est pas synonyme de stabilité, justement à cause de la possibilité de glissement possible entre deux couches, qui est indépendante de la cohésion de chacune des deux couches ;

• les sondages réalisés sur des zones plates ne sont pas toujours représentatifs d'une pente donnée (l'extrapolation est délicate). De plus le manteau étant un matériau stratifié anisotrope, la résistance à la pénétration varie selon la direction de la sonde : pour un manteau neigeux aux caractéristiques identiques (épaisseur, nature des grains...), le profil de battage aura une forme différente entre un sondage à plat et un sondage dans une pente à 30° ;

• de ce fait, deux profils stratigraphiques et de battage (PSB) peuvent se ressembler sans que le risque soit identique [5].

2. Les moyens sommaires d'investigation

Le sondage de battage et la mesure des paramètres physiques nécessitent un appareillage dont la grande masse des pratiquants ne dispose pas. Pour connaître le manteau neigeux, il existe d'autres méthodes plus sommaires, certes, mais assez utiles. Ces méthodes sont plus ou moins rapides à mettre en œuvre et peuvent donc être facilement utilisées sur le terrain, par exemple durant une sortie à skis lorsqu'on a des doutes sur la stabilité[1]. En outre, elles constituent à la fois un moyen ludique de se familiariser avec la neige et un bon outil pédagogique pour expliquer la constitution d'un manteau neigeux lors de cours sur le terrain.

2.1. Profil stratigraphique sommaire

L'idée est de reprendre le principe du sondage stratigraphique ; le sondage par battage est remplacé par un test manuel : après avoir creusé la tranchée vertica-

1. Ce chapitre n'aborde que les méthodes d'investigation du manteau neigeux : elles permettent de se faire une idée sur sa constitution et sur ses propriétés (dureté, cohésion, humidité...), mais ne déterminent pas directement une échelle d'instabilité ou du risque d'avalanches, (voir méthodes du coin suisse ou du bloc norvégien au ch. 6).

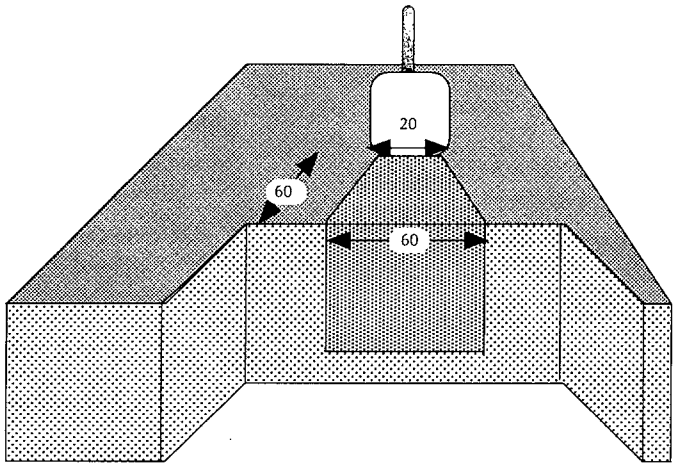
le sur une hauteur suffisante (au moins 1 m), on peut évaluer sommairement la dureté et l'humidité des couches par les tests précités au § 1.2. (enfoncement de la main et confection de boules) ; à l'œil nu, on peut discerner certains types de grains (les gobelets par exemple sont très facilement identifiables). Sur l'interprétation du risque d'avalanches, le lecteur peut se référer aux chapitres 6 et 10.

2.2. Test de la pelle

D'autres tests peuvent également fournir rapidement des données intéressantes, comme le test de la pelle. Il existe plusieurs variantes de ce test sous la même désignation.

2.2.1. Méthode de Faarlund

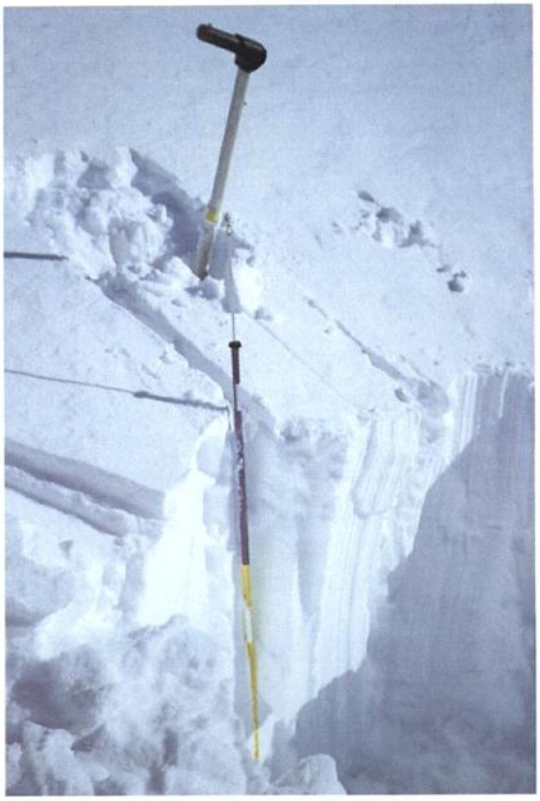
Cette méthode permet de détecter les plans préférentiels de glissement (et donc évaluer la quantité de neige mobilisable en cas de départ) et de se faire une idée très sommaire de la résistance au cisaillement. Après avoir creusé une tranchée (possibilité de faire un profil stratigraphique), on découpe à la pelle dans la première partie du manteau (jusqu'à trouver une couche fragile par exemple) un bloc de base trapézoïdale (hauteur et base de 60 cm, sommet de 20 cm). On dégage ses côtés en creusant une tranchée (d'une largeur de pelle) pour éviter les frottements lors du test ; par la suite, on tire vers soi le bloc : plus la résistance est grande, plus le glissement d'une plaque est improbable. Quoique normalisé par certains, ce test est très subjectif et demande de l'expérience pour un résultat rapide mais à la fiabilité moyenne. Par parenthèse, on peut signaler que c'est un test très apprécié par les nord-américains [6].



➟ Figure 10.
La méthode de Faarlund. Il existe de nombreuses variantes. Celle-ci est celle indiquée par l'IFENA en Suisse. Les nord-américains, qui l'utilisent beaucoup, optent pour un bloc de forme carrée de base 30 cm.
Voir [6] et chapitre 6.

2.2.2. Méthode de Munter

Cette méthode permet de se faire une idée de la cohésion de la neige fraîche, qui peut posséder plusieurs consistances. On place un bloc de neige sur une pelle que l'on secoue. La neige est "liée" si le bloc ne se désintègre pas en le soumettant à des vibrations ; il y a alors début de frittage (*prise de cohésion*). Dans le cas contraire, il s'agit de neige feutrée (cohésion de feutrage). La neige liée a une cohésion suffisante pour transmettre des contraintes lors d'un déclenchement (cas présumé lors d'avalanches de plaques friables). La notion de *qualité critique* de neige est liée au début de frittage d'une neige poudreuse.



Test de la pelle (méthode de Faarlund) accompagné d'un rapide stratigraphique. Cliché C. Ancey.

2.3. Le test du bâton

Un test courant et très simple consiste à estimer la cohésion des couches superficielles en enfonçant le bâton (poignée ou rondelle). Ce test grossier permet de sentir la présence de couches superficielles sans cohésion (qui laissent passer le bâton) ou d'une croûte de regel (qui arrête le bâton). C'est un test très décrié par les uns (trop sommaire et imprécis) et souvent mis en avant pour les autres (très simple et rapide).

3. États de surface de la neige

Observer et comprendre la neige sont deux qualités essentielles du bon skieur, car elles conditionnent en partie plaisir et sécurité du ski. Le plus souvent, le pratiquant n'a d'informations que les renseignements visuels qu'il parvient à tirer de l'observation de la surface sur laquelle il évolue. Il est important qu'il soit en mesure d'apprécier rapidement et correctement un état de surface du manteau par une simple observation. Il faut toutefois garder à l'esprit que l'estimation d'un risque local d'avalanches ne peut se faire uniquement par un examen de surface et que le pratiquant, par curiosité ou en cas de doute, peut être amené à sonder le manteau neigeux plus en profondeur (voir § 2. et chapitres 6 et 10).

3.1. Les neiges du skieur

Le skieur a adapté son vocabulaire pour décrire la surface de la neige. La première distinction se fait entre les "bonnes" et les "mauvaises" neiges selon la facilité à tourner et le plaisir de la descente, indépendamment de toute considération sur la stabilité et la sécurité. Son vocabulaire recoupe le vocabulaire scientifique, le détourne parfois (d'où parfois confusions et amalgames) ou se compose d'idiotismes imagés (cf. [7]).



La poudreuse est une neige recherchée (massif du Mont-Blanc). Cliché C. Ancey.



Une surface érodée est le signe d'une activité importante du vent avec transport de neige. Cliché C. Ancey.

3.1.1. Les bonnes neiges

La *poudreuse* est la neige idéale recherchée par le skieur : il s'agit d'une neige récente, peu ventée, pulvérulente (sèche et de faible masse volumique) et froide. On la qualifie de *neige profonde* dès que son épaisseur dépasse les 40 cm et qu'il n'y a plus de surface d'appui (neige dense ou dure) sous-jacente facilitant le virage. Rapidement, la poudreuse est soumise aux métamorphoses surtout en cas de redoux ou dans le cas d'un versant ensoleillé. La surface va alors se croûter et s'alourdir. L'action du vent est aussi très déterminante. Les accumulations dues au vent (dans les combes par exemple) peuvent dans certains cas garder un caractère poudreux. Il faut noter également que certaines neiges sans cohésion peuvent ressembler à de la poudreuse : d'importantes couches de gobelets ou de givre peuvent se former lors de conditions météorologiques favorables. Une neige poudreuse froide réchauffée en cours de journée par le soleil ou du vent peut devenir de la "neige collante" : il se forme alors des "sabots" de neige sous les peaux de phoque ou la semelle des skis ; on dit que les skis "bottent". La "vieille poudreuse" est une neige déjà tassée et métamorphosée, composée de particules reconnaissables et de grains fins peu frittés, et qui a gardé ses propriétés de neige sèche. C'est une neige qu'on rencontre souvent dans les couloirs ombragés dès le mois de mars assez longtemps après une chute de neige ; elle est idéale pour la pratique du ski de couloir.

La *neige fondante*, "neige transformée", la neige de printemps ou encore neige "gros sel" désignent des neiges bien métamorphosées (grains ronds) dont la surface se ramollit et fond sur quelques centimètres sous l'action du soleil tandis que le fond reste dur (croûte de regel). Au cours de la journée (2 ou 3 heures après le début de la fusion superficielle au début du printemps), le ramollissement gagne les couches inférieures ; on parle de "polenta" ou de "soupe". Si le réchauffement est important, tout le manteau neigeux est alors concerné ; on parle de "pourrissement" du manteau. La fonte dépend des conditions météorologiques (température de l'air, nébulosité, vent...) : un vent froid par exemple peut freiner ce processus malgré le rayonnement solaire. On retrouve ce type de neige tant que le cycle gel/dégel perdure.

3.1.2. Les mauvaises neiges

La *neige mouillée* est une neige gorgée d'eau, lourde, difficile à manier et glissant peu sous les skis. C'est le cas lors d'une chute de pluie survenant après une chute de neige ou lors d'un réchauffement important du manteau ("soupe"). Gelée, elle devient très dure et verglacée. La *neige soufflée* est une neige ayant subi sur place l'action du vent ou résultant d'un transport par le vent (dépôt dur, irrégulier et crissant sous les skis). Les carres des skis accrochent mal et les skis vibrent sur cette surface irrégulière et compacte (on parle aussi de "tôle ondulée"). Le vent peut transporter de la neige pulvérulente (froide et sèche) et la déposer plus loin : dans certains cas, on assiste à la formation d'accumulation de neige dure, qui prend un aspect granulaire, mat, terne et qui reste communément (plus ou moins à tort, cf. ch. 2) appelée "plaque à vent". Le vent a également une action sur la neige dure, qui se caractérise par un lustrage de la surface du manteau ; ce dernier prend alors un aspect lisse et brillant. La neige *croûtée* est une neige dont la surface comporte une croûte (de regel, de radiation, due au vent, de glace) qui se casse sous les skis et les bloque ou entrave leur mouvement. La "neige cartonnée" est une neige légèrement croûtée. La *neige trafollée* est une neige qui a été tracée les jours précédents par des skieurs. Leurs traces ont parfois durci et rendent alors la surface irrégulière et désagréable à skier.

3.2. Hétérogénéité de la surface

L'épaisseur du couvert neigeux est extrêmement variable sur un site. A une échelle plus réduite, le manteau présente également de nombreuses hétérogénéités : ainsi la surface du manteau présente des irrégularités de surface ou de dureté, dont nous présentons ici les principales caractéristiques.

3.2.1. Irrégularités de la surface

La surface de la neige est rarement homogène car elle subit l'action de plusieurs agents qui l'altèrent.

- La pluie humidifie dans un premier temps le manteau qui l'absorbe comme une éponge, mais au-delà d'une certaine quantité (liée à la percolation), l'eau ruisselle en surface, creuse des rigoles et des concavités qui donnent un aspect matelassé au manteau.
- Le soleil forme des "pénitents", ou dents de fusion, qui résultent de l'évaporation rapide de l'eau entourant les grains (film capillaire) dans des zones bien ensoleillées. Ces dents sont inclinées de 45° vers le sud et mesurent quelques centimètres sous nos latitudes.
- Le vent forme des rides et des formes sculptées appelées zastrugis qui indiquent une importante érosion de la zone. La neige se dépose plus loin en accumulations ou en plaques à vent. *Corniches, congères, rides, vagues zastrugis, barkhanes* sont les signes évidents d'une activité passée ou récente du vent.

3.2.2. Changements superficiels de dureté

Comme la surface du manteau au contact de l'air est le siège d'intenses transformations, une modification de la structure du manteau intervient sur les premiers centimètres de la couche superficielle et y entraîne une variation de la morphologie granulaire et des caractéristiques mécaniques : on assiste alors à la formation de croûtes ou de plaques dont l'origine est diverse. La distinction entre *croûte* et *plaque* réside dans leur épaisseur respective : on entend par croûte une couche superficielle durcie sur quelques centimètres (de 1 à 5 cm), dont la portance est faible, c'est-à-dire que la croûte casse sous le passage d'un skieur. La plaque désigne une couche durcie sur une épaisseur plus importante (plusieurs dizaines de centimètres) et donc généralement capable de supporter le poids d'un skieur. Les agents de formation sont le vent, le soleil, le gel et la pluie.

- L'action du vent dépend de sa vitesse et de la nature de la neige au sol. Lorsque sa vitesse est suffisante, il érode, transporte et dépose la neige reprise. Il agit d'autant plus facilement que la neige est pulvérulente, froide et sèche en surface.
- Le soleil provoque la fusion partielle des grains superficiels. Le gel nocturne donne naissance à une mince pellicule de glace qui donne un aspect vitrifié au manteau. Cette pellicule joue un rôle de serre : il semble en effet probable que sous la croûte de radiation, la neige fonde et qu'il se crée ainsi des espaces vides entre la pellicule et le reste du manteau.
- Le gel intervient dans plusieurs processus. De manière générale, la fonte de la neige en surface due au rayonnement ou à un redoux peut être suivie la nuit par le regel rapide de l'eau qui va souder les grains humidifiés. Si l'épaisseur concernée est faible, il se formera une croûte cassante et hétérogène. Le cas échéant, il se forme une plaque solide qui se ramollit la journée (cycle gel/dégel au printemps).
- Le gel, après la pluie, peut former des plaques de verglas ou de glace. La surface est dure et lisse.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] E. BRUN ET E. PAHAUT : *An efficient method for a delayed and accurate characterization of snow grains from natural snowpacks*, Journal of Glaciology 37 (1991) 420- 422.
[2] E. BRUN ET L. REY : *Bilan de la campagne de mesures mécaniques dans la neige effectuée sur le terrain durant l'hiver 1984-85*, Rapport interne n° 199 (1987, CEN, Grenoble).
[3] ANENA, CEN, CAF : *Éléments de nivologie* (1993, ANENA, Grenoble) 61 p.
[4] J.-P. NAVARRE, A. TAILLEFER, R. GOURVES, E. FLAVIGNY : *Le Panda neige*, Neige et Avalanches **66** (1994) 8-14.
[5] W. MUNTER : *Le risque d'avalanche* (1992, CAS, Berne) 200 p.
[6] T. DAFFERN : *Avalanche safety for skiers & climbers* (1992, Rocky mountain books, Calgary) 192 p.
[7] F. BURNIER ET D. POTARD : *Chamonix, mode d'emploi*, vertical, janvier 1994, 29-31.
[8] A. DUCLOS, communication personnelle.
[9] G. GUYOMARC'H, communication personnelle.
Une grande partie de ce chapitre a été réalisée à partir de documents du CEN, réunis entre autres sous la référence [3].

Chapitre 5
LES AVALANCHES*

DANS l'imagerie populaire, l'avalanche est intimement liée à la montagne ; elle est peinte par les uns comme un danger omniprésent, redoutable et destructeur et par les autres comme un phénomène spectaculaire et pittoresque. Au fil des siècles, l'avalanche a endeuillé et isolé des familles, a englouti des villages, a emporté d'imprudents voyageurs et actuellement encore, la "mort blanche" continue de tuer skieurs, randonneurs et alpinistes. Et même si pour l'ensemble de la société, elle est de loin le danger le moins meurtrier et le moins destructeur en comparaison avec les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques, elle hante l'imaginaire collectif. Mais au juste qu'est-ce qu'une avalanche ? Quelles en sont les causes ? Les effets ? L'objet de ce chapitre est de répondre à ces questions en décrivant le phénomène, les causes et les processus impliqués.

1. DÉFINITIONS

Il est difficile de prime abord de donner une définition simple et acceptée par tous du terme 'avalanche'. La plupart s'entendront néanmoins pour dire que c'est un phénomène naturel, complexe et varié, durant lequel une masse de neige dévale la pente d'une montagne. Si l'on fouillait un peu plus dans le détail et que l'on interrogeait toutes les catégories de personnes qui manient le terme 'avalanche', force serait de constater que bien des notions différentes se cachent plus ou moins implicitement derrière ce mot. L'avalanche peut être vue comme un événement donné, c'est-à-dire qu'un éventuel observateur peut le décrire, lui attribuer une durée et une date, et préciser quels lieux ont été concernés. Un esprit curieux ne manquera pas de faire remarquer qu'un événement similaire a eu lieu l'année dernière au même endroit ou dans une localité voisine. Ainsi, de fil en aiguille, on peut généraliser une série de données événementielles et définir l'avalanche comme phénomène physique pouvant prendre différentes formes selon la neige mobilisée, la nature du terrain... Ce faisant, on s'aperçoit également que la taille des avalanches sur un même site est très variable ; il en est un peu de même des crues d'un cours d'eau, pour lesquels on est amené à distinguer les crues annuelles, décennales, centennales, etc. Cette distinction est essentielle lorsqu'on doit prévoir un aménagement sur un site donné pour ne pas risquer la ruine de l'ouvrage et une fin prématurée de ses occupants. Pour éviter un sort si fâcheux, on fait appel dans le projet d'aménagement à un expert, dont le rôle est, entre autres, de concevoir un *scénario* d'avalanche exceptionnelle possible sur ce site. L'avalanche exceptionnelle dont parle l'expert, est une avalanche conceptuelle[1]. Ces quelques remarques illustrent bien la difficulté d'offrir une définition satisfaisante du terme 'avalanche'et on comprend que cette difficulté soit accentuée lorsqu'on s'attaquera à la terminologie relative aux avalanches. C'est pourquoi à l'heure actuelle encore, il n'y a pas de nomenclature ou de classification universellement reconnue pour les avalanches. Dès lors, il y a nécessairement dans cet ouvrage un parti-pris dans le choix de la présentation et du vocabulaire. Dans la mesure du possible, nous avons choisi de rester fidèles à l'atlas des avalanches présenté par l'UNESCO en 1981 [1], mais nous avons

* Ce chapitre a été écrit par C. ANCEY et C. CHARLIER en collaboration avec O. MARCO.

1. Elle est le pendant de la notion de *crue de projet* pour un aménagement hydraulique.

également apporté quelques modifications pour prendre en compte l'expérience acquise au Cemagref depuis plus de vingt ans, pour intégrer les conclusions des nombreuses discussions menées récemment au sein de l'ANENA et pour assurer à l'ouvrage une certaine unité.

1.1. L'avalanche

1.1.1. Une première définition

Dans un premier temps, on peut se contenter de l'acception scientifique du terme 'avalanche', un peu sèche certes, mais qui a l'avantage d'offrir une définition succincte sans trop entrer dans les détails : pour le scientifique, *une avalanche est un écoulement gravitaire rapide de neige.* Le terme 'rapide'présuppose qu'il existe par ailleurs un écoulement lent, que nous avons précédemment vu sous le nom de reptation; l'adjectif 'gravitaire'rappelle que la gravité est le moteur de ces écoulements. En comparaison avec un écoulement d'eau dans un canal ou d'air dans une soufflerie, l'avalanche est un écoulement bref, dont l'échelle de temps est la minute voire la seconde. L'étape suivante est la description du phénomène, ce qui passe par la proposition d'une classification basée sur la notion de *zones* et de *phases*. Comme dans toute classification, un certain nombre de problèmes taxinomiques ne manquent pas de surgir et il faut beaucoup de temps avant d'arriver à proposer un vocabulaire adéquat et universellement admis [2]. Les avalanches ne dérogent pas à ce constat. Un grand nombre de termes tels qu'*avalanches de plaques, de neige récente, de poudreuse, de fonte, de neige sans cohésion, de printemps, de neige mouillée* sont encore couramment usités... mais malheureusement, il y a parfois inadéquation voire confusion entre le terme et l'objet. Pour qui est déjà habitué à employer ce vocabulaire, les paragraphes § 1.1.2. et § 1.1.3. présentent une manière différente d'aborder le sujet. Pour le néophyte, la discussion suivante sur ces classifications ne sera que de peu d'intérêt et il pourra sereinement attaquer les paragraphes suivants (à partir de § 1.2.).

1.1.2. Les avalanches dans la tradition alpine

Ce sont les habitants (dès la période historique) des vallées alpines qui ont forgé les premiers termes relatifs aux avalanches (voir chapitre 1). La terminologie change d'une vallée à l'autre d'une part parce que l'activité avalancheuse a une ampleur, une fréquence, un degré de danger qui varient géographiquement entre les parties septentrionales et méridionales des Alpes et d'autre part parce que le cloisonnement et les spécificités idiomatiques des vallées alpines favorisent le foisonnement de termes descriptifs (et qui restent parfois difficilement traduisibles en français moderne) comme *cui, volante, pourbier, matésine, avalanche terrière, de poudre, de fond...* Une des étymologies du mot 'avalanche'semble venir du verbe latin *labi* (glisser). La toponymie locale fait souvent référence à cette racine : les Lanches, le Lavancher, Lauenen... En France, les premières études[2] sur le sujet sont dues aux forestiers (P. Mougin, V. Hulin...) dès la fin du XIXe siècle, puis aux géographes et aux glaciologues (E. Bénévent, F. Gex, A. Allix...) au début du XXe. Une contribution importante a été apportée par les skieurs et les alpinistes [3].

Le parcours de la montagne hivernale n'a en effet réellement commencé qu'avec l'avènement et le développement du ski. Les avalanches, dès lors, touchèrent non seulement les villages et les voies d'accès mais également des skieurs. Le développement de la montagne a amené l'introduction de termes qui traduisaient la vision des phénomènes par ses nouveaux pratiquants [3, 4]. Ainsi, à l'heure actuelle, on entend couramment parler d'avalanches de poudreuse, de plaque ou de neige humide selon la qualité de la neige mobilisée. Par ailleurs, on associe souvent la dynamique de l'avalanche à cette qualité de neige : respecti-

2. Il faut toutefois noter que des travaux antérieurs ont été réalisés par l'administration cadastrale et fiscale sarde, qui en particulier s'est beaucoup intéressée à l'estimation des parcelles forestières (jusqu'à ce que la Savoie devienne française en 1860).

vement dans chacun des cas, l'avalanche s'écoule sous forme d'une poudre, d'un solide friable ou d'une pâte [5]. D'autres personnes parlent principalement d'avalanches de fonte ou de neige récente [6] et d'autres qualificatifs existent pour décrire la configuration du terrain (avalanches de couloir, de versant...), la forme du départ...

Néanmoins, ce vocabulaire a induit un certain nombre de confusions dangereuses. Ainsi, que désigne réellement une avalanche de poudreuse ? Est-ce une avalanche composée de neige poudreuse ou une avalanche s'écoulant sous la forme d'un puissant aérosol (nuage de poussières de neige) ? Est-ce que cela sous-tend que toute avalanche en aérosol est composée de neige poudreuse ou que réciproquement la neige sèche ne forme que des avalanches sous forme d'aérosol ? De même, que signifie une avalanche de plaque ? Est-ce une avalanche composée de blocs (compacts) qui glissent le long d'une pente ou s'agit-il seulement d'un mode de départ ? Tout départ avec une cassure de forme linéaire est-il synonyme de décrochement de plaque (au sens donné pour un profil stratigraphique) ? A quoi renvoie exactement le terme "plaque" ? Est-ce une couche de neige dure et froide, compacte et dense ou un ensemble de couches possédant des caractéristiques mécaniques permettant de le différencier du reste du manteau ou bien encore le résultat d'une accumulation de neige ? Une avalanche de neige mouillée part-elle sous forme ponctuelle (forme en *poire*) par suite d'une perte locale de la cohésion, puis glisse-t-elle le long du sol ?

1.1.3. Un contre-exemple

Un exemple intéressant illustre bien la confusion engendrée quelquefois par ces termes. Dans le massif du Mont-Blanc, le 16 mai 1983, vers 14 heures, une avalanche est partie spontanément vers 2 500 mètres d'altitude dans la zone des glaciers à l'aval des escarpements de la face nord de l'aiguille du Midi [7, 8]. La masse mobilisée a été estimée à 800 000 m³ et a emprunté le couloir formé par le torrent des Favrands. Le dépôt s'est fait au niveau de l'entrée du tunnel du Mont-Blanc et une partie de la forêt (sur une largeur de 250 m) ainsi que le parking et les bâtiments de la STMB[3] ont été touchés par un important effet de souffle. L'activité avalancheuse a été particulièrement intense ce jour là puisque trois autres avalanches d'ampleur ont été signalées dans la vallée de Chamonix. Le décrochement à la rupture a concerné un ensemble de couches de neige humidifiées par les dernières chutes de pluie (19 mm) jusqu'à 2 500 mètres d'altitude. L'épaisseur de la plaque à la rupture variait de 1,5 à 2,5 mètres et s'étendait sur 1 000 mètres de long. L'avalanche s'est scindée en deux écoulements distincts comme le rapportaient les témoins et l'indiquait la nature des dégâts : un *aérosol* (de couleur terreuse) qui a rasé la forêt sur 250 mètres de large (et dont les témoins ont rapporté la très grande vitesse) et une *avalanche coulante* qui a suivi le thalweg en érodant fortement le sol et s'est arrêtée vers 1 200 m. Il faut signaler qu'une partie de cette dernière avalanche est passée par-dessus le mur déflecteur pour s'arrêter à l'entrée du tunnel du Mont-Blanc.

On a donc un exemple de neige lourde et humide qui est partie sous forme d'une plaque et a formé un aérosol. Quelle devrait être alors sa désignation ? Est-ce une avalanche de plaque, de neige mouillée, de "poudreuse" ? Le nuage de neige a paru tellement incongru compte tenu de la nature de la neige mobilisée que l'on a recherché la cause de ce phénomène, tant l'apparition d'un aérosol semblait être conditionnée par la présence de neige poudreuse ; plusieurs hypothèses ont été émises pour tenter de résoudre cette énigme. On a donc ici un exemple qui illustre comment un vocabulaire mal adapté peut fausser la vision des phénomènes : c'est l'erreur qui consiste à vouloir conformer le réel à son vocabulaire alors que la logique impose le contraire. Ceci amène deux commentaires :

• (i) l'existence d'un aérosol n'est pas dépendante de la nature de la neige (même s'il est vrai que de manière préférentielle les aérosols sont constitués de

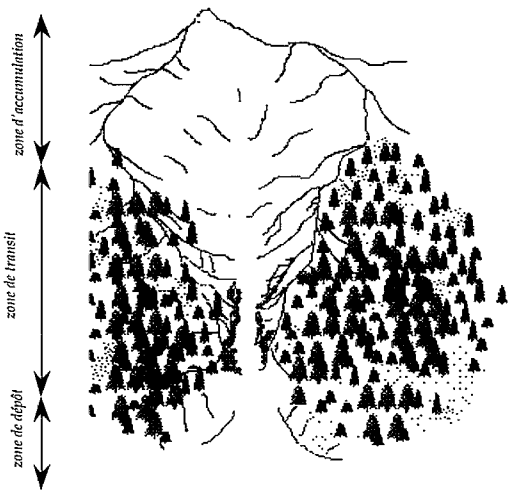
3. Société du Tunnel du Mont-Blanc

neige poudreuse). A cet égard, Evans rapportait qu'au Canada, au mont Cayley en Colombie britannique, un éboulement rocheux avait provoqué un aérosol (semblable à un nuage de neige) qui avait détruit une partie de la forêt par son effet de souffle [9] ! Cet exemple est riche en enseignement et il n'est pas l'unique exception à la règle ;

• (ii) une remarque plus générale et d'ordre taxinomique met en lumière les défauts de la classification usuelle[4]. L'erreur fondamentale est que la désignation courante fait appel à des critères hétérogènes et variables : critères de neige (avalanche de neige poudreuse, humide, pulvérulente, sans cohésion, récente...), de départ (en/de plaque), de saison (avalanches de printemps), d'écoulement (de fond, superficielle, de versant, de couloir...), génétiques (naturelles, de skieur, de fonte...) [2]. Pour corriger ceci, il s'avère nécessaire d'établir des critères homogènes et fixes : dans la suite, on se propose de classer les avalanches selon leur mode d'écoulement.

1.2. Site et zones

Pour rendre compte de tout l'éventail des phénomènes observés, on introduit des critères spatiaux et temporels : *zones* d'un site et *phases* d'une avalanche. Il faut bien garder en mémoire que les deux notions sont indépendantes, même si elles semblent parfois se recouper[5].



➡ Figure 1. - les trois zones du site. Dans ce cas-ci la troncature est aisée : le cirque constitue la zone d'accumulation, sa forme en entonnoir permet de canaliser l'écoulement dans la zone de transit ; les différentes crêtes découpent des panneaux d'exposition variée. La zone de transit est formée par le ravin d'érosion entre la forêt tandis que la zone de dépôt commence dès que la pente s'affaiblit.
Il faudrait préciser également qu'après la description zonale, le spécialiste est amené à introduire des points particuliers tels que des points de rupture de pente, des singularités (ressaut, plateforme, goulot, évasement, obstacle), des lieux remarquables. Mais cela devient une tout autre affaire !

Un *site avalancheux* est l'unité géographique la plus petite dans laquelle s'écoulent toutes les avalanches d'un secteur donné, quelle que soit leur taille. Un site est composé de sous-unités indépendantes que l'on nomme ici *zones*. Le zonage d'un site se fait, entre autres, à partir d'une "lecture du terrain", par exemple à partir d'une carte topographique détaillée ou de photographies aériennes (prises l'été). Il est important de noter que le zonage ne se fait pas à partir de quelques événements avalancheux particuliers mais doit intégrer l'ensemble des événements passés ou susceptibles de se produire sur le secteur. Ces événements avalancheux ont une taille variable : on appelle *avalanche majeure* une avalanche qui affecte toutes les zones du site ; dans le cas contraire, on parle, selon la taille, d'*avalanche* ou de *coulée*[6]. Un site se subdivise en trois zones :

– (i) *la zone d'accumulation* : c'est dans cette zone que la neige s'accumule. Généralement, elle est constituée d'un cirque, d'un bassin ou d'un large versant. L'avalanche (majeure) y mobilise l'essentiel de sa masse de neige. Par ailleurs, afin de détailler les particularités[7] orographiques et nivologiques de la zone, les spécialistes la tronquent en panneaux. Chaque panneau est supposé pouvoir se décrocher indépendamment ;

4. Parler d'une 'classification usuelle'est un peu abusif, puisque depuis que la nivologie existe, chaque ouvrage alimente le débat. Comme le souligne ANDRÉ ALLIX, "on a proposé déjà plusieurs classifications, ce qui tend à prouver qu'aucune est satisfaisante." [4].

5. Comme on l'a souligné en introduction, la prise en compte de toutes les facettes du terme 'avalanche'(l'avalanche comme événement, phénomène physique ou scénario) oblige à définir le plus clairement possible un certain nombre de notions, au risque de complexifier l'ensemble.

6. Il faut se méfier du terme 'coulée', dont l'emploi n'est jamais totalement innocent (voir plus loin).

7. Ainsi sur un cirque, certains panneaux sont soumis à l'activité du vent ou du soleil, ce qui diversifie les causes possibles de départ.

– (ii) *la zone de transit* : c'est le lieu par lequel transitent toutes les avalanches majeures du site. Généralement, cette zone est délimitée par le relief du site : la zone de transit peut être formée par un chenal, un couloir ou un versant. Sa géométrie est parfois plus complexe : existence de ressauts (barres rocheuses), de goulets d'étranglement... Dans le cas où tout le site se présente sous la forme d'un versant, la délimitation de la zone de transit est délicate[8] ;
– (iii) *la zone de dépôt* : c'est le lieu sur lequel s'arrêtent toutes les avalanches majeures du site en y déposant la neige transportée. Généralement, ce sont des critères de pente qui fixent la frontière entre la zone de transit et la zone de dépôt. La notion de dépôt est évidente dans le cas des avalanches coulantes mais devient floue dans le cas des aérosols où le dépôt correspond à une "sédimentation" du nuage de neige, s'étend sur des distances nettement plus importantes et ne correspond pas nécessairement à la limite des dégâts occasionnés (effet de souffle). Dans ce cas-là, on préfère une carte où la limite de la zone de dépôt est déterminée par une isobare[9].

1.3. Les phases d'une avalanche

Après le site, on décrit l'avalanche proprement dite. A cet effet, on utilisera des critères morphologiques, c'est-à-dire des *critères visuels basés sur la forme de l'écoulement.* Mais tout d'abord, il est important de découper la vie de l'avalanche en différents stades : on parle de *phases* de l'avalanches. Plus ou moins arbitrairement, on scinde le déroulement de l'avalanche en 3 phases, qui correspondent à la mise en mouvement de la neige, à son écoulement et à son arrêt[10]. Ainsi, on est amené à considérer :

– (i) *la phase de départ* : c'est le premier stade de mise en mouvement de la neige dans la zone d'accumulation. La surface concernée est appelée *aire de départ* [11]. Les causes sont diverses et font l'objet d'un prochain chapitre. La neige ainsi mobilisée commence à s'accélérer et à s'écouler le long de la pente ;
– (ii) *la phase d'écoulement* : durant ce stade le plus important, on peut parler d'écoulement. On admet couramment qu'il n'y a ni gain ni perte de masse[12] durant cette phase et qu'elle ne dépend pas de la phase initiale. Il s'agit là d'une hypothèse simplificatrice, même si elle semble souvent corroborée par l'expérience. Néanmoins, il n'est pas exclu que certains phénomènes échappent à cette règle, c'est notamment le cas pour des coulées ou certaines avalanches de versant pour lesquelles la longueur d'écoulement serait plus petite que leur largeur. En outre, on parle de *front*, de *corps* et de la *queue* d'une avalanche pour désigner les différentes parties ;
– (iii) *la phase d'arrêt* : c'est le troisième stade durant lequel la neige décélère puis s'arrête. La surface occupée par la masse de neige de l'avalanche est appelée *aire d'arrêt.* Dans le cas d'un aérosol, comme cette aire est difficile à délimiter, on peut parler d'*aire de sédimentation* ; cette aire est parfois délimitée par des isobares de surpression. On introduit aussi la *distance d'arrêt*, qui est la distance moyenne parcourue[13] par le front de l'avalanche depuis la fin de la phase d'écoulement jusqu'à son arrêt définitif.

8. Dans ce cas, pour parvenir à déterminer la zone de transit, d'aucuns ont tendance à considérer que les variations de masse sont nulles, c'est-à-dire que le gain ou la perte de masse de l'avalanche est nulle ; d'autres préfèrent opter pour des critères de pente.

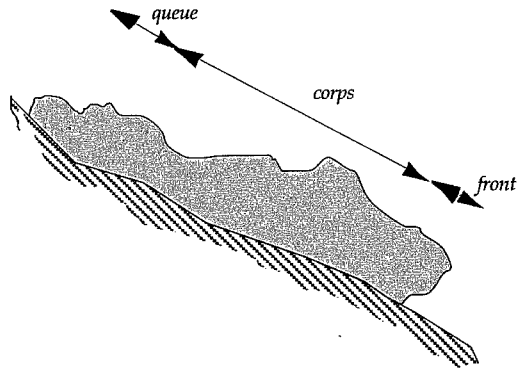
9. C'est une courbe le long de laquelle la surpression due à l'avalanche (ou son souffle) est constante.

10. Pour une avalanche majeure, cela correspond *grosso modo* à son passage dans chacune des 3 zones du sites.

11. Dans le cadre de ce chapitre, pour limiter d'éventuelles confusions entre termes, on emploie préférentiellement 'aire' et non 'zone' dans la description d'un événement avalancheux.

12. On parle de reprise de neige pour désigner le phénomène d'incorporation de neige au sein de l'avalanche au cours de son mouvement.

13. Pour les avalanches majeures, le point de référence pour l'estimation de la distance d'arrêt est fixé à la frontière amont de la zone de dépôt ; parfois, certains préfèrent le déterminer à l'aide d'un critère d'inclinaison de la pente (voir par exemple [10]).



➡ Figure 2.
L'avalanche est l'écoulement d'une masse de neige. On la scinde en trois parties : le front, le corps et la queue. Les phénomènes d'ampleur sont accompagnés d'un effet de souffle, semblable à un important coup de vent.

Lorsqu'il s'agit de coulées ou de petites avalanches, la détermination de ces trois phases est plus délicate voire impossible à faire. Dans ce cas, on assiste généralement à une seule phase réunissant sur une même zone départ, écoulement et arrêt. Il faut ouvrir ici une parenthèse sur ce qu'on entend par *coulée*. Contrairement à une avalanche qui est essentiellement l'écoulement d'un point à un autre, une coulée s'apparenterait plutôt à un glissement d'une quantité de neige, mobilisant une faible masse (en comparaison avec la quantité de neige en place aux alentours). Il y a donc surtout une notion de "faible ampleur" (relativement au site considéré) derrière le mot 'coulée'. D'un point de vue physique, la distinction entre avalanche (majeure) et *coulée* est motivée par le fait que chacune d'elles possède une dynamique qui lui est propre (du moins on le présume). D'un point de vue humain, l'utilité d'une telle différenciation dépend des personnes concernées et des circonstances. Ainsi, elle a son importance en justice lorsqu'on cherche les responsabilités : parler de coulée plutôt que d'avalanche, c'est vouloir minimiser la taille du phénomène.

1.4. Les modes d'écoulement d'une avalanche

Un critère de classification commode est de *regarder* comment s'écoulent les avalanches, car la forme de l'écoulement est le reflet du type de dynamique. Ainsi, on peut observer trois classes distinctes de comportement mécanique correspondant à trois modes d'écoulement. On distingue :

- *l'avalanche en aérosol* : c'est un écoulement très rapide (d'après certains, la vitesse peut dépasser 400 km/h) sous la forme d'un nuage résultant du mélange de l'air et des particules de neige, et composé de grandes bouffées turbulentes qui dévalent la pente (cf. § 5). L'écoulement n'est pas astreint à suivre le relief et il n'est pas rare de voir un aérosol remonter une pente. D'aucuns pensent que l'effet destructeur est lié au *souffle* provoqué par l'onde de pression (semblable à une explosion) précédant l'avalanche ; d'autres, au contraire, l'attribuent à l'aérosol lui-même. La puissance de l'aérosol est extrêmement variable : dans certains cas, on est en présence d'un écoulement d'une violence exceptionnelle, capable de raser une forêt entière, dans d'autre cas, l'aérosol (même d'apparence spectaculaire) ne cause aucun dégât. Les avalanches purement sous forme d'aérosol sont peu fréquentes sous nos latitudes mais ne sont pas des phénomènes rares (cf. § 5.2.) ;
- *l'avalanche coulante*[14] : c'est un écoulement de neige coulant le long du sol en suivant le relief (couloir ou versant). La vitesse est nettement moindre que dans le cas précédent et dépasse rarement les 100 km/h. La majeure partie des avalanches appartiennent à cette classe d'écoulement (cf. § 5.1.) ;
- *l'avalanche mixte* : il s'agit de la combinaison des deux modes précédents. En effet, dans certains cas, il peut arriver que l'écoulement se scinde en un aérosol et une avalanche coulante. Ces écoulements peuvent devenir autonomes

14. On emploie également 'avalanche dense', mais 'avalanche coulante'nous semble préférable.

(c'est-à-dire acquérir une vie propre) ou rester liés. On parlera alors d'*avalanche mixte*. L'avalanche du 16 mai 1983 à Chamonix en est un exemple. Il est à noter qu'une avalanche coulante développe fréquemment un petit panache de neige, surtout au niveau de son front, mais dont la contribution à la dynamique de l'ensemble reste négligeable. Inversement, un aérosol peut traîner de la neige au niveau du sol, sans que cet entraînement prenne réellement de l'importance (cf. 5.3.). L'avalanche mixte est un phénomène fréquent; de plus, les phénomènes d'ampleur sont souvent des écoulements mixtes.

2. Critères morphologiques et génétiques

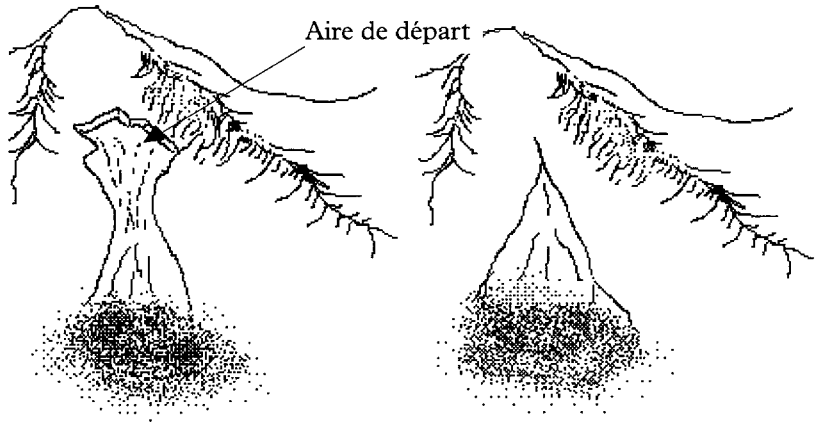
La description peut être génétique (c'est-à-dire qu'elle se fonde sur les facteurs ayant contribué au départ) ou bien morphologique (description des différentes phases) [1, 2].

2.1. Critères morphologiques : examen des phases

2.1.1. La phase de départ

Juste après que le départ de l'avalanche a eu lieu, on peut observer principalement deux formes de décrochement possibles :

- *départ en plaque* : il s'agit d'une *cassure linéaire* qui fracture le manteau neigeux sur une largeur et une épaisseur données et délimite l'aire de départ; on parle alors de départ en plaque ou de décrochement de plaques. La notion de plaque est parfois confuse et fera l'objet d'une explication ultérieure (cf. § 4.2.2.);
- *départ ponctuel* : il s'agit d'une *cassure en forme de poire* partant d'un point. Un tel mode est de manière générale caractéristique de neige de très faible cohésion (neige fraîche ou très humide).



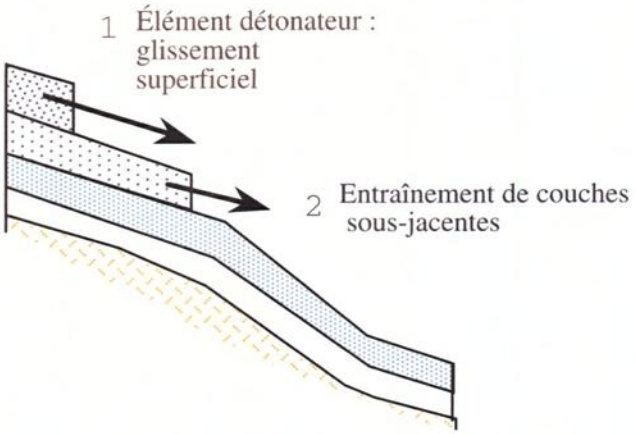
Départ en plaque : cassure linéaire Départ ponctuel

➡ Figure 3. Modes de départ : départ en plaque ou ponctuel. L'aire de départ dans le cas d'avalanches avec départ en plaque est assez facile à délimiter.

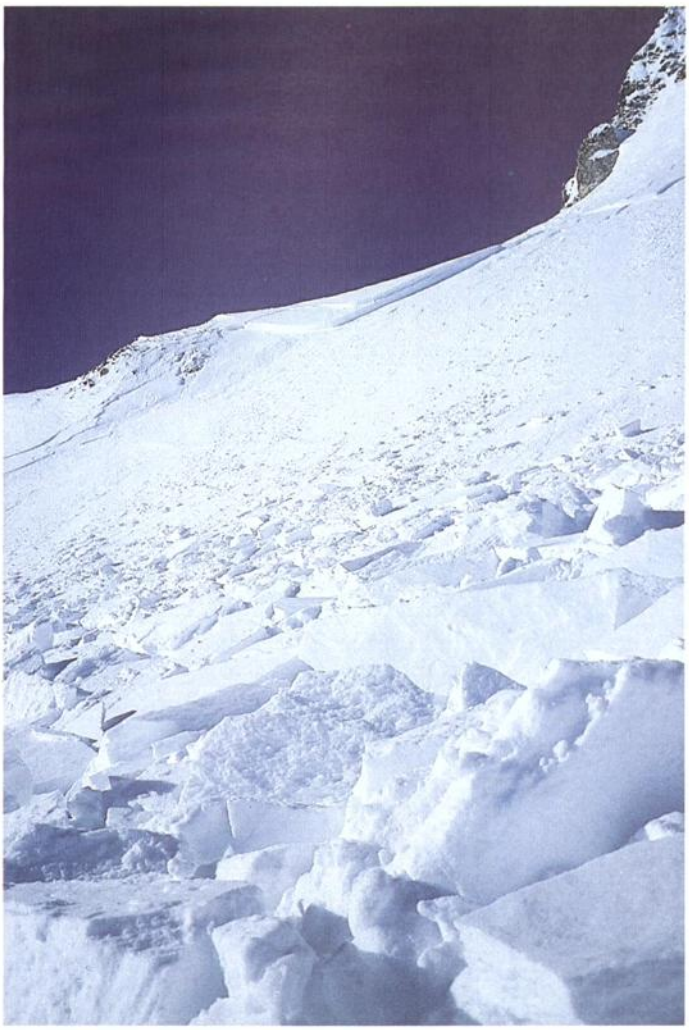
Une combinaison des deux est parfois observable (cf. Fig. 4) : un départ ponctuel a immédiatement provoqué une fissuration linéaire et un départ en plaque. Négligeant le départ ponctuel, on ne considère que le décrochement, sinon on parle de *départ mixte*. Il faut signaler que, dans une zone de reptation et dans un climat humide, des fissures du manteau neigeux peuvent se développer pendant de longues périodes (plusieurs jours) et être à l'origine d'avalanches (accident du Schmalzberg, Vorarlberg, le 31.12.1974 qui causa 12 morts) [11]. Ces *avalanches de glissement* sont des phénomènes rares dans les Alpes mais fréquents, par exemple, au Japon ou plus généralement dans les pays avec un climat océanique.

Avalanche en aérosol dans la face nord du K2. (Himalaya). Cliché P. Béghin.





➡ Figure 4. Départ en marche d'escalier. La caractérisation de la phase de départ peut être délicate notamment dans le cas de décrochement de plusieurs panneaux (de nature variée) ou si le plan de glissement est en *"marche d'escalier"* : la première strate entraîne dans son mouvement la (les) strate(s) inférieure(s). Dans ce cas-ci, l'élément "détonateur" est le glissement de la couche superficielle. On peut également concevoir d'autres types de détonateur aptes à provoquer un départ en plaque : passage d'un aérosol, coulée…



Départ en plaque (col du Palet, Tignes). La fracture est en marche d'escalier et on voit distinctement les deux surfaces de glissement. Cliché C. Ancey.

Départ ponctuel de neige très humide provoqué par le virage d'un skieur. Cliché C. Ancey.



On indique également parfois la position de la surface de glissement dans l'aire de départ. On parle de "cassure dans la neige fraîche" lorsque la plus grande partie de la neige mobilisée est constituée de *neige fraîche*, c'est-à-dire de neige accumulée dans les cinq jours qui précèdent la date de l'avalanche. A l'opposé, on parle de "cassure dans la vieille neige" lorsque le plan de glissement au niveau de la fracture se trouve à l'intérieur de couches de *vieille neige* (accumulée depuis plus de cinq jours environ). En dernier lieu, on peut indiquer si de l'eau liquide était présente ou non au sein des couches mobilisées. Si la TEL est nulle, on parle d'avalanche de neige sèche et dans le cas contraire, on dit qu'il s'agit d'une avalanche de neige humide.

2.1.2. La phase d'écoulement

Comme on l'a vu précédemment, on classe les avalanches selon leur mode d'écoulement : avalanches coulantes, en aérosol ou mixtes. Pour les avalanches majeures, on peut par ailleurs préciser la forme de l'écoulement imposée par la zone de transit : s'il est confiné, on parlera d'*avalanche de couloir*, et s'il a lieu sur une pente ouverte, on parlera d'*avalanche de versant*. Une telle désignation perd de l'intérêt avec les avalanches en aérosol car la trajectoire de celles-ci s'affranchit plus ou moins des contraintes imposées par le relief (écoulement aérien). Lors de l'écoulement, le manteau neigeux (de la zone de départ ou d'écoulement) peut être entraîné sur toute sa hauteur, c'est-à-dire que le plan de glissement est le sol lui-même : c'est l'*avalanche de fond* [15]. Dans le cas contraire, seule la surface du manteau neigeux est concernée et on parle d'*avalanche superficielle*.

2.1.3. La phase d'arrêt

A cause des frottements (internes, dus à l'air, au relief, au sol...), l'énergie cinétique de l'avalanche diminue jusqu'à devenir nulle. La nature du dépôt dépend du mode d'écoulement. Dans le cas d'avalanches en aérosol, le dépôt correspond à la sédimentation du nuage de neige. L'effet de souffle peut plaquer la neige contre les obstacles rencontrés. Dans le cas d'avalanches coulantes, le dépôt est consécutif à l'immobilisation de la masse de neige, qui dépend plus ou moins du relief : langues, doigts, cônes ou tas sont les formes couramment observées dans la zone de dépôt. Il est d'usage, toujours dans le cas des avalanches coulantes, de continuer la description du dépôt en caractérisant la neige le constituant.

- La surface du dépôt peut être encombrée de blocs anguleux, de boules arrondies ou simplement constituée de neige (pas de blocs de diamètre supérieure à 30 cm). Dans les deux premiers cas, on parlera de *dépôt grossier* tandis que le terme *dépôt fin* recouvre le dernier cas. La structure interne des dépôts est peu connue (existence d'une granulométrie, caractéristiques des boules...).
- La présence d'eau liquide est typique des dépôts grossiers : elle peut résulter de la mobilisation de neige humide ou de l'humidification de la neige durant son trajet. Ceci est particulièrement vrai pour des avalanches d'ampleur qui parcourent des dénivellations importantes : ainsi, l'avalanche du mont Cook (Nouvelle-Zélande), à la suite d'une énorme chute de séracs et de rochers, a parcouru 2 700 mètres de dénivelée et une dizaine de kilomètres en distance (cf. § 3.1) ; l'humidification progressive de la neige a rendu de plus en plus pâteux l'écoulement, qui est devenu boueux du fait de l'érosion. L'eau liquide présente dans les dépôts contribue à densifier considérablement les blocs de neige, qui deviennent très durs et ont des masses volumiques importantes (souvent comprises entre 500 et 650 kg/m^3) [12].
- Le dépôt peut être souillé par des éléments étrangers (rochers, arbres, débris d'ouvrages, terre...) car les grosses avalanches (denses) ont un grand pouvoir d'érosion. On qualifie le dépôt de *souillé*.

15. Il faut noter que dans certains ouvrages, cette définition ne s'applique que lorsque la cassure concerne le manteau neigeux jusqu'au sol, mais cela nous semble un peu trop restrictif.



Fissuration lente du manteau neigeux, souvent visible à la fin du printemps ou lors d'importants redoux (glacier des sources de l'Isère, Savoie). Cliché C. Ancey.

Aire	Critères	Critères distinctifs	
Aire de départ	A. Mode de départ	A1. partant d'un point (départ ponctuel) A2. partant d'une ligne (départ en plaque)	A3. partant d'un point puis cassure linéaire (départ mixte) A4. partant d'une cassure en forme de crevasse
	B. Position du plan de glissement	B1. à l'intérieur du manteau neigeux B2. cassure dans la neige fraîche	B3. cassure dans la vieille neige B4. jusqu'au sol
	C. Eau liquide dans la neige	C1. absente	C2. présente
Aire d'écoulement	D. Tracé du parcours	D1. parcours sur une pente ouverte (avalanche de versant)	D1. parcours dans un couloir ou une gorge (avalanche de couloir)
	E. Type de mouvement	E1. nuage de neige (avalanche en aérosol) E2. coulant le long du sol (avalanche coulante)	E3. critères E1 et E2 simultanément (avalanche mixte)
	F. Position de la surface de glissement	F1. écoulement sur un manteau neige (avalanche superficielle)	F2.écoulement sur le sol (avalanche de fond)
Aire d'arrêt	G. Rugosité de la surface du dépôt	G1. grossière (dépôt grossier) G2 blocs anguleux	G3. boules arrondies G4. fine (dépôt fin)
	H. Eau liquide	H1. absente (dépôt sec)	H2. présente (dépôt humide)
	I. Souillure du dépôt	I1. pas d'autres matériaux visibles (dépôt propre) I2. souillure visible (dépôt souillé)	I3. rochers, cailloux, sols I4. branches, arbres I5. débris d'ouvrages

Tableau synoptique de description d'un événement avalancheux (adapté de l'Atlas des Avalanches [1]).

2.2. Critères génétiques : examen général des causes

2.2.1. Les difficultés d'établir une classification génétique

S'il est assez facile d'établir des critères morphologiques pour décrire une avalanche, il s'avère beaucoup plus difficile de proposer une classification des facteurs d'avalanche car la cause du départ est rarement unique. Le plus souvent, il n'y a pas un simple processus de cause à effet dans le départ d'une avalanche, mais au contraire, c'est plutôt le résultat d'un concours de circonstances (histoire météorologique, qualité de neige, forme du relief, intervention extérieure...). Il est également assez difficile d'identifier tous les facteurs contribuant à ce faisceau de circonstances, même si on arrive à apprécier qualitativement l'influence de chaque facteur pris séparément. Enfin, une notion qui nous semble importante mais complexe est celle de "détonateur" (que nous avons introduite au § 2.1.1.) : dans certains cas, on peut attribuer à un élément donné (passage d'un skieur, chute d'un sérac...) le rôle d'élément perturbateur ayant entraîné la rupture d'équilibre du manteau neigeux.

2.2.2. Problématique générale liée à la stabilité du manteau neigeux

Le départ d'une avalanche est le résultat d'une instabilité ou d'un manque de *stabilité* du manteau neigeux, car comme n'importe quel matériau, la neige ne supporte pas indéfiniment toutes les contraintes imposées. Rechercher les causes d'une avalanche revient dès lors à s'interroger sur la stabilité d'un manteau neigeux. Cependant, la neige est très loin de constituer un matériau simple et homogène (cf. chapitre 2) et son étude expérimentale bute contre de nombreuses difficultés [13, 14]. Localement, le manteau neigeux est un ensemble stratifié de couches aux propriétés mécaniques distinctes ; globalement il est fortement hétérogène à cause des variations du relief ou des conditions météorologiques (panneaux plus ou moins exposés au vent et au soleil par exemple). De plus ses propriétés mécaniques sont en perpétuelle interaction (avec le milieu extérieur ou à la suite de changements internes) et sont susceptibles d'évoluer très rapidement. Ceci explique que la stabilité d'un manteau neigeux est un problème d'une extrême complexité du point de vue théorique, de telle sorte que l'on est à l'heure actuelle incapable de déterminer les critères d'instabilité.

La prochaine section donne un rapide panorama des facteurs influant sur la stabilité du manteau neigeux. Il faut rappeler, au risque de se répéter, que l'on examine chaque facteur comme s'il agissait séparément des autres, ce qui n'est sans doute qu'une vue simplifiée de la réalité. Comme les facteurs amenant au départ d'une avalanche sont multiples, on distingue, pour les ordonner, ceux liés au site (qui sont *fixes*) et ceux inhérents aux conditions nivo-météorologiques (*variables*). Il faudrait noter au passage que, dans les bulletins de prévision du risque d'avalanche (BRA, cf. ch. 7), il est d'usage de différencier les avalanches accidentelles des avalanches naturelles. Dans ce cadre-là, on nomme *avalanche accidentelle* une avalanche provoquée par une intervention extérieure (passage de skieur(s), d'animaux, chute de rochers, de sérac, explosion, détonation...) qui ébranle le manteau neigeux en limite de stabilité. On parle de *déclenchement* pour bien mettre en lumière le facteur extérieur intervenant dans la mise en mouvement de la neige [15]. Inversement, on parle d'*avalanche naturelle* si elle part d'elle-même. Il y a alors rupture due à une instabilité du manteau neigeux. Dans ce cas-ci, on parle de départ. Il faut prendre garde, lorsque l'on utilise ou rencontre cette terminologie, d'éviter certains amalgames. Ainsi, il ne faut pas confondre avalanche *accidentelle* (au sens précédemment donné) et avalanche *occasionnant un accident* (personnes entraînées, dégâts matériels...) ou bien avalanche *fortuite*. De même, lorsque la chute d'une corniche provoque une avalanche, certains

parlent d'avalanche accidentelle (car le déclenchement est dû à un facteur extérieur) tandis que d'autres parlent d'avalanche naturelle (puisque la cause du déclenchement est un phénomène naturel). Dans la suite du texte, afin de ne pas induire le lecteur dans l'erreur, on évitera dans la mesure du possible les termes précédents (hormis dans les sections consacrées au BRA) et on emploiera les termes suivants :

- une avalanche est *spontanée* lorsque la cause du départ est interne au manteau neigeux ;
- une avalanche est *déclenchée* lorsqu'un élément extérieur en est l'élément détonateur. Elle est *déclenchée artificiellement*, lorsqu'il y a volonté (humaine) de la faire partir (passage d'un skieur, explosif...).

2.3. Les facteurs fixes influant sur la stabilité du manteau

2.3.1. La topographie

La forme du relief, sa disposition, ses caractéristiques ont une influence sur la formation des avalanches ; une « lecture » du terrain (par exemple durant l'été) permet de déterminer les zones sensibles. Examinons maintenant comment chacune des caractéristiques constitue un facteur favorable ou non au départ des avalanches.

• L'altitude n'est pas à proprement parler un facteur déterminant car des avalanches se forment à toute altitude. En revanche, elle a une influence indirecte car elle conditionne les caractéristiques nivo-météorologiques (enneigement, température, métamorphoses du manteau...).

• La configuration du relief joue un rôle important quoique parfois mal appréhendé. On distingue ainsi :

- les *zones de crêtes* : une crête est la séparation de deux versants. En modifiant l'action du vent, les crêtes peuvent favoriser des accumulations de neige. La présence d'accumulations importantes augmente localement le danger dans le versant chargé ;
- les *bassins, cirques* et *versants* : ils constituent les zones d'accumulation des sites ; ce sont les zones privilégiées de départ d'avalanches majeures ou de coulées ;
- les *plateaux* : ce sont en général des zones d'érosion ou de dépôt de la neige. La pente est insuffisante à provoquer des départs d'ampleur et le danger vient des zones dominant le plateau ;
- *combes, couloirs, thalwegs* : ce sont les zones de transit empruntées par les avalanches coulantes. De plus, un danger local de coulées ou d'avalanches mineures est souvent présent car la neige peut s'y accumuler, entre autres à cause du vent.

2.3.2. La déclivité

L'inclinaison joue le rôle moteur, par l'intermédiaire de la gravité, dans un écoulement avalancheux, car c'est à cause de la gravité qu'il y a écoulement. Plus la pente est forte, plus l'aléa devient probable. Toutefois, on observe le plus souvent que les pentes supérieures à 45° (c'est un ordre de grandeur) se déchargent naturellement de leur neige lors des chutes de neige : on dit que les pentes se *purgent*. Inversement, les pentes faibles (inférieures à 20°) ont une activité avalancheuse faible (en terme de départ). Néanmoins, il faut garder à l'esprit que des aérosols peuvent parcourir des distances horizontales et même des contre-pentes, que des *avalanches pâteuses* (composées de neige très humide) peuvent également transiter par des zones de pente faible et qu'il ne faut jamais négliger un risque de coulée. De même, des écoulements d'un mélange d'eau et de neige[16] peuvent concerner des pentes de faible inclinaison.

La plage sensible de danger est donc composée des pentes comprises entre 25 et 45°, qui constituent aussi la majorité des pentes parcourues par les skieurs.

16. Les anglo-saxons appellent cela des *shlushflows* : ces phénomènes sont fréquents dans les pays nordiques au moment du dégel (influence océanique). Ce ne sont pas réellement des avalanches [16].

Le changement de pente est toujours à examiner avec attention car il est à l'origine de tensions de traction (ou de compression) assez importantes. En effet, le poids de la couche qui plonge dans la pente a tendance à "tendre" le manteau un peu comme un ressort. Une augmentation du poids (chute de neige, passage d'un skieur...) ou une diminution de la cohésion (qui va diminuer la résistance à la traction du manteau) peut entraîner la rupture. C'est pourquoi de nombreuses avalanches déclenchées sont provoquées par le passage de skieurs au voisinage d'un changement de pente.

2.3.3. Exposition

On entend par *exposition* l'orientation au soleil. C'est l'un des éléments essentiels qui influent sur l'évolution de la neige. Les versants à l'ombre (*ubac* ou encore envers) bénéficient moins de l'action du soleil que les versants exposés (*adret* ou *soulane*) ; la neige évolue différemment d'un versant à l'autre. De manière générale, versants chauds et froids connaissent une activité[17] avalancheuse, qui à l'échelle de la saison est similaire en nombre et intensité.

2.3.4. Végétation

La forêt est réputée avoir un rôle de protection contre les avalanches. Ce rôle de protection est à nuancer : il semble efficace lorsque la forêt est située sur la zone d'accumulation du site mais il est illusoire lorsque la forêt est plantée sur la zone de transit [12]. Ainsi, il n'est pas rare que des avalanches rasent des forêts ou s'écoulent à travers elles (comme l'avalanche de l'aiguillette du Lauzet en janvier 1984 ou l'avalanche de Saint-Étienne-de-Cuines qui à deux reprises, en février 1978 et janvier 1981, a entaillé une forêt plusieurs fois centenaire). On explique le rôle de protection de la forêt par sa capacité à "fixer" le manteau neigeux. Cette capacité de fixation est très liée à la nature des essences et des structures du peuplement. Seule une forêt dense d'arbres à aiguilles persistantes (épicéa, sapin) permet de fixer le manteau neigeux d'une part en retenant la neige lors de sa chute (fonction du houppier, qui accélère la métamorphose de la neige accumulée sur les branches) et d'autre part parce que la neige tombant en masse des branches agit sur le manteau neigeux comme un poinçon [12]. La micro-ambiance existant au sein d'une forêt dense implique une évolution tout différente du manteau neigeux par rapport à une zone à découvert : il est par exemple rare de trouver du givre de surface. Si la forêt est composée d'arbres à feuilles ou à aiguilles caduques (comme les mélèzes) ou si elle est clairsemée, le risque existe toujours même s'il demeure faible (il reste suffisant pour tuer des skieurs comme l'ont prouvé plusieurs accidents).

La végétation basse (vernes, arbustes...) dans une zone à découvert contribue d'un côté à augmenter la rugosité, de l'autre à faciliter "l'aération" du manteau neigeux (formation de neige sans cohésion près des arbustes). Il n'est dès lors pas toujours facile de cerner son action sur la neige. L'herbe non fauchée favorise la reptation et le départ des avalanches de fond.

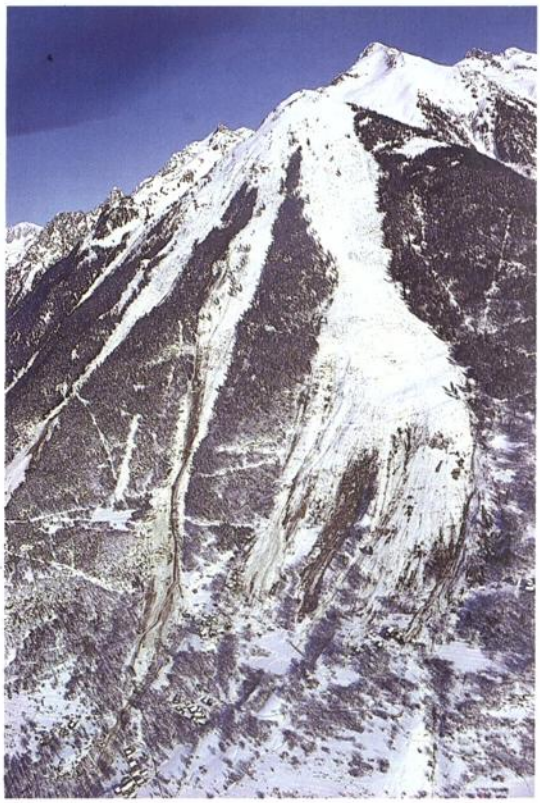
2.4. Les facteurs variables influant sur la stabilité du manteau

2.4.1. Chutes récentes de neige

L'activité avalancheuse augmente pendant et après des chutes de neige ; le plus souvent, c'est l'instabilité de la dernière couche qui en est à l'origine. Deux paramètres caractérisent une chute de neige :

- *la hauteur cumulée* : c'est un paramètre délicat à déterminer car la neige se tasse rapidement (environ 20 % de diminution de hauteur dans les premières heures) et l'action du vent provoque des variations importantes de hauteur. C'est pour cette raison qu'il faudrait lui préférer une hauteur d'eau équivalente ou bien encore un poids par unité de surface. Néanmoins, l'usage du cumul de neige en terme de hauteur est encore de nos jours le plus fréquent ;

17. On entend parfois que les versants nord sont plus dangereux que les versants ensoleillés : 70 % des accidents concernant des skieurs auraient lieu dans des versants nord [6] ; il est assez difficile de vérifier le bien-fondé d'une telle affirmation, car les pentes orientées au nord sont également les plus recherchées des skieurs, notamment lorsque la neige est poudreuse (le risque d'avalanche est alors souvent marqué).



Vue du site de Saint-Étienne-de-Cuines (Savoie) après l'avalanche de janvier 1981. Avant 1978, le versant était entièrement boisé jusque vers 2 000 m. Cliché C. Charlier.

Le départ d'avalanche en clairière ou à la sortie d'une forêt n'est pas à négliger (Gresse-en-Versors, Isère). Cliché C. Ancey.



– *l'intensité de la chute de neige* : c'est la quantité de neige tombée par unité de temps. 50 cm de neige tombée en 12 ou en 48 heures ne produisent pas le même résultat. En effet, plus l'intensité diminue, plus la métamorphose et le tassement du manteau (donc sa consolidation) ont le temps de se réaliser ; le risque s'en trouve alors diminué à terme plus ou moins long. Une chute de neige est supposée devenir critique lorsque l'intensité dépasse les 5 cm par heure (l'intensité maximale enregistrée est de l'ordre de 15 cm/h lors de violentes tempêtes). La signification de ce chiffre est à nuancer car

il faudrait également tenir compte des effets du vent et de la température de l'air. On peut néanmoins conclure que des hauteurs importantes de neige déposée rapidement sont généralement instables.

De très fortes chutes de neige sont des événements isolés mais ne sont pas rares. Quelques exemples fixent des ordres d'idée de chutes "record" : le cumul de neige[18] atteint 276 cm du 10 au 16 février 1990 à Tignes (2 100 m). Les zones de basses altitudes sont aussi concernées : il est tombé 110 cm de neige sur les Terres Froides du plateau de Chambaran du 12 au 13 décembre 1990 [17] ! Des chutes dépassant 30 cm entraînent un risque sensible d'avalanche, mais il ne faut pas oublier que même une très faible couche peut partir en coulée : 10 cm de neige fraîche partant sur une longueur de 50 mètres et une largeur de 10 mètres suffisent à tuer un skieur; cela représente quand même 50 m^3 (soit en moyenne 10 tonnes) ! De même, ce n'est pas seulement le volume de neige engagé qui rend une avalanche catastrophique, mais également une qualité de neige exceptionnelle pour le site (par exemple, neige très humide ou au contraire très froide...) ou un scénario météorologique inhabituel (voir à ce propos, le cas de l'accident du col du Brenner en Autriche en 1974 [18]). En conclusion, le danger d'avalanche n'est pas toujours proportionnel à la quantité de neige tombée.

Une grande partie des avalanches (spontanées et déclenchées) concernent la couche de surface. Ce n'est pas tellement la quantité cumulée qui est la cause principale d'avalanche, mais surtout les propriétés mécaniques du manteau neigeux et son évolution qui conditionnent l'activité avalancheuse. En revanche, la quantité de neige récente influe considérablement sur la taille des avalanches. Ainsi, c'est en général pendant d'importantes chutes de neige ou juste après, que sont à redouter des avalanches majeures (et donc les catastrophes) dans les sites concernés. A l'opposé, la corrélation entre importance du cumul de neige récente et déclenchement d'avalanches (par des skieurs par exemple) est moins évidente. Dans le cas de chutes moyennes (moins de 40 cm de neige), la stabilité dépend fortement de la structure mécanique du manteau neigeux.

2.4.2. La pluie

La pluie modifie le manteau, du moins les strates superficielles, en l'humidifiant : dans un premier temps, la présence d'eau liquide en faible quantité contribue à stabiliser le manteau neigeux en accélérant le tassement et en augmentant la cohésion (dans le cas de neige pulvérulente). Si elle devient trop importante, elle rend le manteau instable en diminuant sa cohésion; celui-ci a tendance à se "liquéfier". L'apport d'eau liquide a alors un triple effet : alourdissement, réchauffement, et changement de nature des liens entre grains. Lorsqu'une chute de pluie suit une chute de neige, on note le cycle suivant [19] :

- dès le début de la pluie (moins de 1 mm de pluie tombée), on observe quelques avalanches avec départ en plaque, le plus souvent de faible épaisseur (20 à 30 cm) et concernant la neige récente : on parle d'*avalanche immédiate*;
- au bout de quelques heures (de 10 à 15 heures), on observe des avalanches plus importantes, avec départ en plaque et pouvant concerner des couches de neige anciennes : on parle d'*avalanche retardée*. Le délai nécessaire entre avalanches immédiates et retardées est lié à la structure du manteau neigeux et surtout à la vitesse de percolation. Celle-ci est d'autant plus efficace et rapide qu'elle concerne de la neige fraîche peu ou pas humidifiée;
- au-delà de 40 mm de pluie, l'activité avalancheuse diminue pour devenir quasiment nulle.

Si la pluie intervient sans chute de neige, il semble que cela soit seulement la teneur en eau liquide (liée à la percolation et au drainage du manteau) qui conditionne l'activité avalancheuse. La *teneur en eau liquide* (TEL) est la mesure qui

18. Les chiffres suivants sont donnés en cm de neige, mais en toute rigueur, il faudrait employer l'équivalent en mm d'eau.

permet d'avoir une idée précise de l'humidité de la neige (voir chapitre 4). C'est donc un paramètre important caractérisant les strates du manteau. De manière générale, l'augmentation de la TEL de 0,5 % à 6 % n'entraîne pas de variation de la résistance au cisaillement. Néanmoins, entre 0 et 0,5 %, on observe qu'une neige humide, pour avoir la même résistance qu'une neige sèche, doit avoir une masse volumique plus importante [20]. Il s'ensuit que le passage d'une neige sèche à une neige humide induit une baisse importante de la résistance au cisaillement car ce passage se fait sans perte notable de densité, ce qui peut expliquer le départ des avalanches immédiates. Par la suite, l'augmentation de la TEL n'entraîne que peu d'évolution de la résistance. Une neige normalement drainée ne présente pas de valeur de TEL supérieure à 7 ou 8 %. On peut penser toutefois qu'une teneur en eau importante (TEL>8 %) favorise le départ d'avalanches de neige humide, dont les facteurs sont réunis quand :

- il y a présence d'une couche imperméable (croûte de regel) freinant la percolation et le drainage de l'eau en favorisant ainsi une forte saturation ;
- il y a forte saturation du sol (fonte au printemps) ;
- il y a des précipitations importantes dépassant la capacité de drainage du manteau. Cette neige gorgée d'eau peut être responsable d'avalanches exceptionnelles et catastrophiques, car ces dernières sont capables de parcourir de grandes distances du fait de leur fluidité (comme l'avalanche de Chamechaude en Chartreuse, en février 1979). Pour donner une image grossière de ce type de phénomènes, on parle parfois d'avalanches "yaourt" : lorsque l'on remue avec une cuillère un pot de yaourt, celui-ci se fluidifie et peut s'écouler.

La TEL importante est alors responsable de la disparition des ponts de glace reliant les grains et de la diminution des forces de capillarité (cohésion capillaire) [20]. Ce changement de texture par humidification accompagné d'un alourdissement de la neige peut expliquer l'apparition des avalanches retardées.

2.4.3. Le vent

Le vent a deux effets bien distincts sur la neige :

- il transporte la neige durant un épisode météorologique (neigeux) ou après. D'importantes accumulations de neige vont ainsi se former dans les zones soumises à une moindre influence du vent (voir ch. 2) ;
- il accélère ou retarde les phénomènes thermiques et la "respiration" du manteau neigeux (échange de vapeur d'eau air/manteau). Ainsi, le foehn peut accélérer le processus de fonte du manteau (voir ch. 3).

Dans l'évaluation (temporelle) du risque, notamment du risque accidentel, le vent est souvent cité comme un facteur favorisant l'instabilité superficielle du manteau neigeux (formation d'accumulation, influence sur le frittage, etc. voir également § 2.4.5.). Dans une analyse spatiale du risque, il est important de localiser et d'estimer les principaux dépôts de neige dus au vent dans la zone d'accumulation, car le volume de ces panneaux est à prendre en compte dans l'étude des phénomènes majeurs.

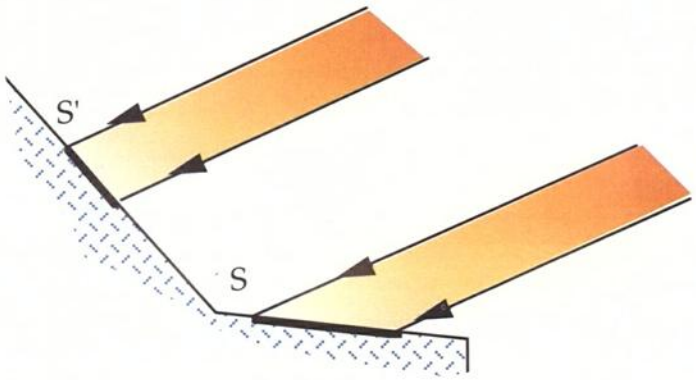
2.4.4. Les facteurs thermiques

La neige est généralement sensible à un changement de température en son sein ou à sa surface et des modifications importantes du comportement mécanique ont lieu, surtout lorsque sa température est proche de 0 °C. Un réchauffement peut être le résultat :

- d'une augmentation de la température (élévation de l'isotherme 0 °C, effet de serre dû à la nébulosité...) ; toutes les pentes sont alors concernées et l'intensité du réchauffement décroît en général avec l'altitude ;
- du rayonnement solaire ; seules les pentes exposées au soleil sont concernées. Sur ces versants, la déclivité accentue l'effet dû au rayonnement car le flux

pour une surface inclinée est plus important que pour une même surface horizontale (ceci explique que les routes restent plus longtemps enneigées que les pentes qui la dominent) ;

- du rayonnement thermique ; les échanges neige/atmosphère qui, normalement, sont importants la nuit peuvent être fortement influencés par la nébulosité (voir chapitre 3).



→ Figure 5.
Le flux est la quantité de chaleur reçue par unité de surface ; il dépend de l'orientation de la surface par rapport à la direction du rayonnement solaire : le flux est maximal lorsque la surface est perpendiculaire à cette direction.

L'effet d'un réchauffement dépend de son intensité, de sa soudaineté, de sa durée, et des événements météorologiques qui l'ont précédé. Il est admis qu'un faible réchauffement (réchauffement diurne accompagné d'un refroidissement nocturne) entraîne une augmentation de la stabilité en favorisant le tassement et les métamorphoses (changement de cohésion, déformation accrue du manteau qui rééquilibre les contraintes en son sein). En revanche, l'incidence sur le risque accidentel est plus difficile à estimer : la majorité des accidents ayant causé la mort de skieurs ont eu lieu l'après-midi (entre 12 h et 16 h) ; ceci semble être dû, entre autres, à une prise de cohésion dans le cas de neige dite poudreuse (que certains suspectent être à l'origine du déclenchement de plaques friables) ou bien à une diminution locale de la cohésion sur les pentes ensoleillées (c'est pour cela qu'il est à la fois fort désagréable et imprudent de skier dans de telles conditions au printemps l'après-midi).

Un fort réchauffement (*redoux*) ou réchauffement moyen mais prolongé provoque une instabilité marquée. L'activité avalancheuse spontanée est augmentée : les pentes raides (au-dessus de 25°) se purgent et des avalanches importantes sont à redouter ; le pourrissement du manteau neigeux (caractérisé par une grande TEL) est ainsi souvent la cause d'avalanches de fond. Au fil des jours même s'il y a persistance du redoux, le risque naturel faiblit en général mais un risque accidentel peut rester marqué. Si, de plus, le réchauffement est accompagné ou précédé de chutes de neige (c'est un cas fréquent au printemps), la neige tombée se consolide mal et l'activité avalancheuse devient maximale sur toutes les pentes (le 13 février 1991, neuf randonneurs trouvèrent ainsi la mort dans le Queyras au-dessus d'Aiguilles après de fortes chutes de neige suivies d'un important redoux).

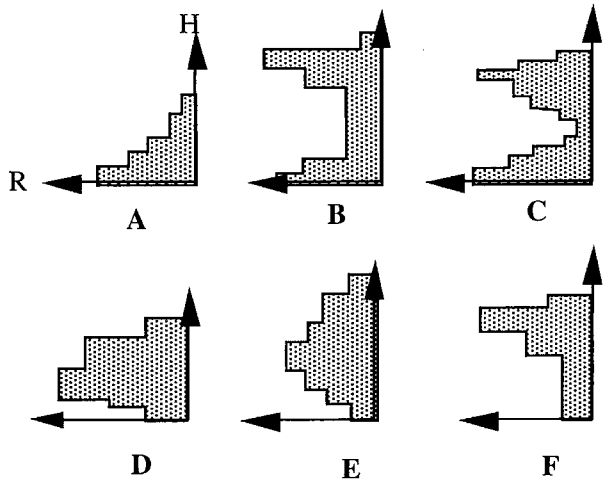
2.4.5. État du manteau neigeux

Le risque d'avalanche dépend, entre autres, de la structure du manteau neigeux : la résistance mécanique de chaque strate et la nature des interfaces (c'est-à-dire des liaisons entre couches) jouent un rôle prépondérant dans la stabilité du couvert neigeux, cela revient donc à dire que toute l'histoire du manteau neigeux influe sur sa stabilité à un moment donné.

Néanmoins si on se limite aux avalanches superficielles (qui constituent la majorité des avalanches impliquant des skieurs), seule la nature de la couche

supérieure et de son interface conditionne la stabilité de la neige. Il serait extrêmement difficile de donner toutes les configurations favorables au déclenchement et en outre, il serait osé de prétendre à un tableau exhaustif! Toutefois, une attention particulière doit être apportée lorsque l'interface est constituée d'une croûte dure ou lisse (grains fins ou grains ronds) ou d'une couche fragile favorisant le glissement (givre de surface, gobelets, faces planes, neige roulée...) surmontée d'une couche de neige fraîche (voir également chapitre 10).

La stratification du manteau intervient dans sa stabilité mais son influence est complexe. De manière schématique, la nature intrinsèque de chaque couche (cohésion, masse volumique, résistance mécanique...), le type d'interface et l'existence de couches fragiles sont les facteurs essentiels de la stabilité. Par exemple, si l'on ne tient pas compte de la position des plans de glissement potentiels et des conditions météorologiques, on déduit de l'observation (sur 50 années) du type du profil moyen de battage la tendance générale de l'activité avalancheuse (naturelle, accidentelle...) comme suit [21] :



→ Figure 6.
Les six familles d'histogramme de battage d'après [21].
Le tableau ci-dessus résume, selon le type de profil observé au 1er avril, la fréquence de la famille sur 50 ans (%), la résistance moyenne au battage au 1er janvier (R1), celle au 1er avril (R2), le nombre d'avalanches durant les cinq épisodes les plus importants de l'hiver (I, entre parenthèses la plage de valeurs) dans la région autour de Davos (Suisse), la cause prépondérante de déclenchement classée en 6 familles : chute de neige H>50 cm et vent de vitesse V>8 m/s (1), chute de neige H>50 cm (2), vent V>8 m/s (3), température à la fin de la période (température supérieure à 0 °C ou accroissement supérieur à 7 °C) (4), épisode de plus de cinq jours (5), divers (6).

Type	%	R1	R2	I	1	2	3	4	5	6
A	12	22,7	50,7	7,0 (6-8)	23	13	17	23	1	23
B	16	10,9	16,4	7,8 (6-10)	8	0	28	20	4	40
C	16	15,4	33,4	9,9 (7-13)	25	10	28	7	7	23
D	14	10,1	28,0	8.6 (7-10)	14	23	23	11	3	26
E	28	6,2	28,4	9,7 (7-18)	19	10	23	25	0	23
F	14	2,6	22,1	8,8 (6-18)	8	17	17	20	10	26

• Profil A : il est régulièrement croissant vers sa base. Il présente peu de discontinuités (profil régulier de la courbe de résistance au battage, peu de couches minces) et il indique un manteau globalement stable, où seules de petites avalanches de surface sont à craindre.

• Profil B : la partie centrale présente une faible résistance au battage, et en général les effets de givrage (métamorphose de moyen ou fort gradient) y sont prédominants. Cette couche épaisse peut parfois être entraînée par le déclenchement des couches superficielles (passage d'un skieur par exemple) et augmenter ainsi considérablement la masse mobilisée par l'avalanche.

• Profil C : il résulte de la superposition de deux profils de type A, séparés par une couche fragile et peu épaisse (moins de 20 cm). Cette couche intermédiaire fragilise le manteau et favorise une activité avalancheuse importante.

• Profil D : il a une forme de ventre. Près du sol, il y a le plus souvent une couche de gobelets. C'est un profil dont les caractéristiques évoluent souvent beaucoup entre un terrain plat et une pente. L'activité avalancheuse (en terme de départ) est en général modérée et limitée aux couches de surface.

• Profil E : de forme identique au précédent et plus fréquente. Néanmoins, l'épaisseur des couches fragiles près du sol augmente. On y rencontre essentiellement des grains à faces planes et des gobelets, ce qui semble accroître l'activité avalancheuse avec des phénomènes d'ampleur.

• Profil F : forme inversée du type D. Des surcharges importantes peuvent favoriser de grosses avalanches de fond.

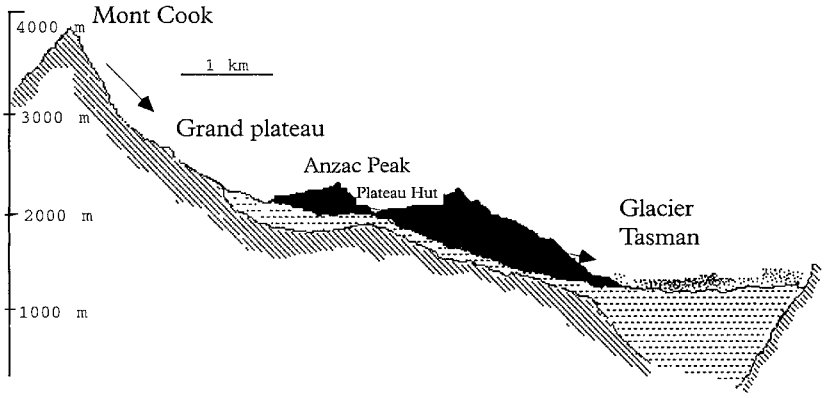
On ne peut pas néanmoins résumer l'importance d'une activité avalancheuse au seul examen du profil de battage ; il faut, entre autres, tenir compte des couches fragiles. Il faut noter qu'une couche fragile joue un double rôle : elle a une faible résistance mécanique (qui se répercute dans la distribution des contraintes) et elle facilite le glissement (comme un lubrifiant dans une machine). A ce titre, elle constitue une condition *nécessaire* (ou favorable) au déclenchement mais pas *suffisante*, tout comme un lubrifiant est nécessaire au fonctionnement d'une machine mais ne suffit pas tout seul à la faire fonctionner. C'est pour cela que l'existence de couches fragiles au sein d'un manteau n'est pas forcément synonyme d'un danger d'avalanche : ainsi, des couches de gobelets se trouvent fréquemment dans les sondages sans induire de dangers particuliers.

3. Quelques exemples d'avalanche

3.1. Avalanche catastrophique au mont Cook

3.1.1. Déroulement de l'accident

Le mont Cook (3 764 m), point culminant de la Nouvelle-Zélande, a été le théâtre le 14 décembre 1991 de l'une des plus gigantesques avalanches connues de mémoire d'homme. Une énorme masse de rocher et de glace (sérac sommital) se détache du sommet principal qui perd 20 m d'altitude d'un seul coup ! Comme la face est du mont Cook offre un versant raide (entre 50 et 57°) haut de plus de 700 m, l'écoulement du mélange de pierres, de glace et de neige accélère considérablement du fait de la pente : la vitesse du front a été estimée entre 400 et 600 km/h. Un aérosol se forme et dévale sur plus de 2 700 m. Durant la première phase, l'écoulement a un effet comparable à un tremblement de terre de magnitude 3 (d'après la signature sismique recueillie pendant une minute). On estime la masse ainsi mobilisée à 14 millions de m^3 de matériaux divers. A l'aval de la face est se trouve un vaste plateau glaciaire (de pente moyenne égale à 17°), où l'écoulement s'élargit sur environ 2 km et comporte une partie dense qui a complètement raboté la surface du glacier. Sa vitesse s'affaiblit nettement par la suite mais l'écoulement dure au moins deux heures et parcourt plusieurs kilomètres (environ 7 km) tandis que le souffle de l'aérosol se fait sentir encore plus loin. Le gros de l'écoulement s'arrête sur le glacier de Tasman sous la forme d'un dépôt de boue, de glace pilée et de pierre brisée (environ la moitié de la masse initiale a été réduite en poussières).



➡ Figure 7. Profil de terrain du mont Cook (3 764 m).

3.1.2. L'avalanche et ses causes présumées

On est ici en présence d'un phénomène complexe ; l'éboulement (ou la chute de sérac) du sommet du mont Cook a donné naissance à une avalanche mixte, dont la partie dense a fortement érodé le glacier de Tasman. Cette avalanche n'est pas l'unique exemple d'avalanches catastrophiques liées à d'autres phénomènes qui en accroissent l'ampleur : chutes de séracs, laves torrentielles, lahars, éboulements... Ainsi les catastrophes du Huascaran (Pérou) le 10 janvier 1962, de Mattmark le 30 août 1965, etc. causèrent des dégâts considérables et la mort de nombreuses personnes (près de 4 000 victimes pour le Huascaran).

3.2. Avalanche accidentelle au Moriond

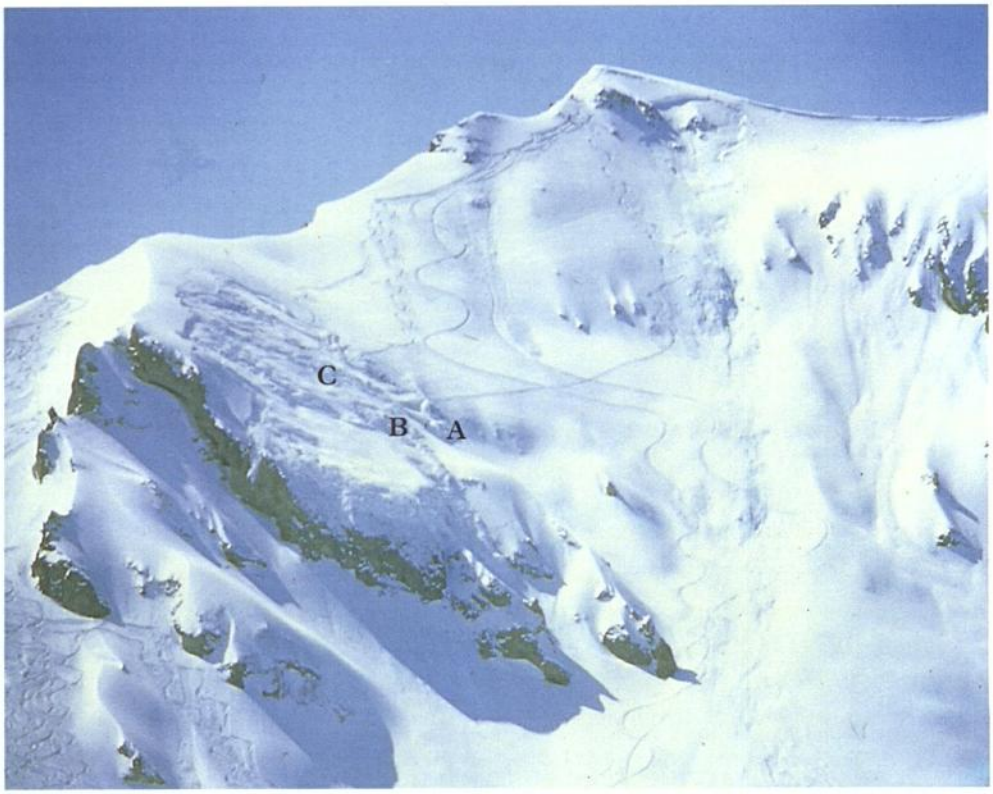
3.2.1. Déroulement de l'accident

Le dimanche 29 mars 1992, il fait grand beau sur les Alpes. En fin de matinée, trois skieurs anglais empruntent un itinéraire hors-piste du domaine de Courchevel, itinéraire régulièrement parcouru dans les escarpements nord du col de Chanrossa (2 544 m) et à proximité immédiate des remontées mécaniques. Ils s'engagent dans le petit cirque orienté au nord et dominant le plan Mugnier. La veille, deux surfeurs y sont passés et leur trace dans la poudreuse y est encore visible.

Un premier skieur (A) s'engage droit dans la pente ; sa godille est hésitante, sans doute à cause d'une neige irrégulière. Après avoir descendu une cinquantaine de mètres, il traverse vers sa droite. Un deuxième skieur (B) s'engage alors, traverse en longeant une ligne de crête située à moins d'une dizaine de mètres au-dessus de lui. Puis il s'élance dans la pente. Le troisième skieur (C) le suit à quelques mètres, mais sa faible technique le fait zigzaguer à travers tout l'épaulement. Après une nouvelle traversée sur sa droite, le skieur (B) attaque une nouvelle godille qui doit le conduire à la position du skieur (A). Au moment où il atteint son compagnon, une fracture se développe et remonte la pente sur plus de cinquante mètres, au-dessus du skieur (C). Il faut 80 centièmes de seconde pour que toute la plaque se mette en mouvement. Le skieur (B) en mouvement a le temps de s'échapper du piège qu'il vient de déclencher. Ses deux camarades sont emportés et sautent une petite barre rocheuse. 4"80 après le déclenchement de la première plaque, une deuxième part au niveau des traces sous l'arête. Par chance, les secours sont lancés immédiatement par le service des pistes et les deux skieurs seront dégagés indemnes.

3.2.2. L'avalanche et ses causes présumées

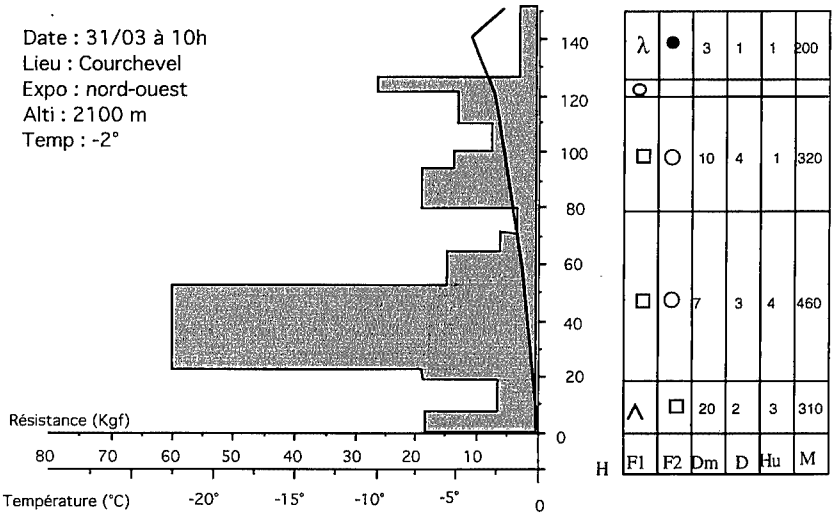
Les skieurs ont déclenché une avalanche coulante de neige poudreuse avec départ en plaque. Une deuxième avalanche est partie, probablement par ébranlement du manteau neigeux. Le mois de mars 1992 a vu la succession d'importantes chutes de neige et de périodes de beau temps. L'activité avalancheuse a été particulièrement marquée et de nombreux accidents ont eu lieu : on déplore 7 morts pour le mois de mars (entre le 14 et le 24).



L'avalanche du Moriond (29/03/92) environ 2 secondes après le départ. Le skieur B parvient à fuir devant le front et à rejoindre un petit éperon. Les deux autres skieurs sont emportés. Cliché C. Etchelecou.



L'avalanche environ 5 secondes après le début. Une seconde avalanche part au niveau des traces juste sous les crêtes. Cliché C. Etchelecou.

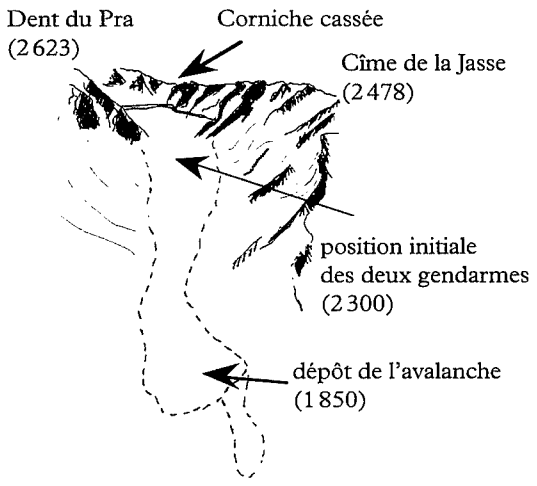


➟ Figure 8. Profil simplifié du battage d'après le poste d'observation nivo-météorologique de Biolley-Verdons (Courchevel) du 31 mars 1992. D'après document CEN.

3.3. Chute de corniche dans la combe du Pra

3.3.1. Déroulement de l'accident

Le matin du 17 avril 1987, deux gendarmes empruntent les remontées mécaniques de la station de Prapoutel (Isère) afin d'effectuer l'ascension de la cime de la Jasse (2478 m) à skis. Il fait très beau ; le BRA annonce un risque local modéré (sur la nouvelle échelle, cela correspondrait au degré 2). Ils atteignent le sommet par son versant ouest à 10h45 et redescendent en direction du col du Pra (2463 m). Une fois arrivés au col, ils continuent leur descente par le versant nord dominant la station du Pleynet, d'où ils comptent reprendre les remontées pour rejoindre Prapoutel. Au cours de cette descente, alors qu'ils sont vers 2300 m, 150 mètres au-dessous de la crête sommitale, les deux gendarmes entendent le bruit sourd d'une corniche qui est en train de s'effondrer : vers 11h00, un randonneur qui a réalisé la cime de la Jasse par son versant sud (itinéraire classique depuis Prabert) s'approchant imprudemment du bord de l'arête sommitale a en effet cassé un morceau de corniche. Aussitôt les deux gendarmes traversent vers leur gauche afin d'éviter la trajectoire de la masse de neige. Malheureusement, l'arrivée de cette coulée dans le versant supérieur de la combe du Pra déclenche une avalanche, dont la fracture au départ s'étend sur 350 mètres.



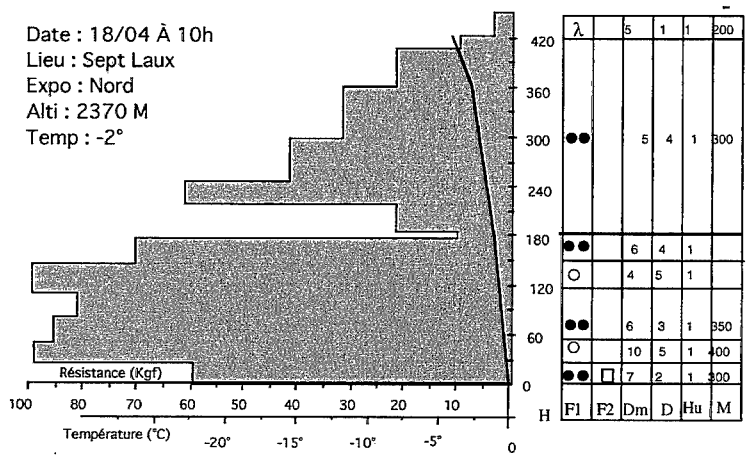
➟ Figure 9.
Vue schématique de la combe du Pra.

C'est une avalanche gigantesque qui prend naissance : l'épaisseur des couches déclenchées dépasse les deux mètres. Les deux skieurs sont alors happés par la neige en mouvement. Ils sont emportés sur plusieurs centaines de mètres. Par chance, l'un des deux skieurs, qui a juste eu le temps d'ôter les lanières de ses skis avant d'être fauché, se retrouve seulement à moitié enseveli. Après s'être rapidement dégagé, il alerte les secours par radio.

Malgré l'importance des moyens mis en œuvre (230 sauveteurs), le corps du deuxième gendarme sera trouvé sans vie sous plusieurs mètres de neige le lendemain. Il ne porte pas d'ARVA. Ses skis sont encore attachés à ses lanières [22].

3.3.2. L'avalanche et ses causes présumées

L'avalanche du Pra est une avalanche coulante exceptionnelle avec départ en plaque. La fracture est haute d'environ 2,80 mètres, s'étend sur 300 m à une altitude voisine de 2350 m. La pente moyenne de la zone d'accumulation est environ de 40°. Le plan de glissement (en trait noir gras dans le tableau) est constitué d'une couche mince de gobelets et de grains à faces planes située à 1,8 m du sol. L'avalanche a suivi le thalweg parcouru par le torrent du Pra et s'est immobilise sur un replat (appelé le Fond du Pra) vers une altitude de 1850 m. La hauteur du dépôt dépassait par endroit 12 mètres. La figure 10 montre le profil de battage du sondage réalisé le lendemain sur les lieux du décrochement. L'épaisseur de la couche mince y a été exagérée. Les couche de neige déclenchées, constituées essentiellement de grains fins, étaient bien consolidées. La strate superficielle (une trentaine de centimètres) résulte des chutes de neige du début du mois. A la lecture du sondage, on peut dire que le manteau neigeux, soumis au poids d'un ou plusieurs skieurs, est dans son ensemble stable; néanmoins, sollicité brusquement par une coulée due à la chute de corniche (plusieurs tonnes), il a cédé et s'est rompu selon sa couche de plus faible résistance (au battage). Cette couche résultant des faibles précipitations du début février a servi de "lubrifiant" (gobelets et faces planes). Ce tragique accident montre que la stabilité d'un manteau neigeux est indissociable de la charge qui le sollicite. C'est un fait, à notre avis, totalement imprévisible.



➞ Figure 10. Histogramme de résistance au battage et profil stratigraphique d'après un sondage du CEN réalisé le lendemain à l'endroit du décrochement.

4. La stabilité d'un manteau

4.1. Quelques définitions utiles

L'objet de ce chapitre est de donner quelques notions sur les mécanismes du départ. Étant donné la complexité du phénomène, il est hors de question de dresser un tableau exhaustif des causes physiques du déclenchement et on se contentera de donner quelques notions générales et des explications spéculatives d'un phénomène, qui reste dans son ensemble encore à l'heure actuelle peu compris.

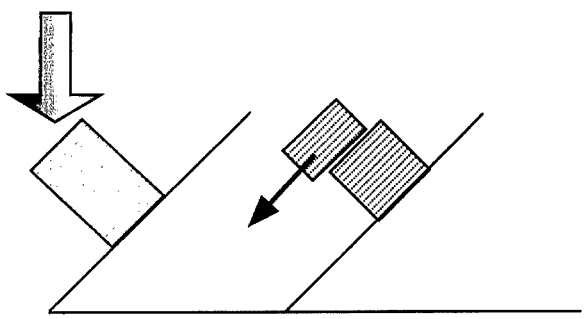
4.1.1. Définition de la stabilité

Une avalanche part quand le manteau neigeux ne parvient plus à maintenir son équilibre mécanique et/ou à l'ajuster en fonction de ses propres transformations

(métamorphose, reptation) ou des conditions extérieures qui lui sont imposées (surcharge, conditions météorologiques...). Après la rupture du manteau neigeux, l'écoulement ne peut prendre naissance que sous l'action de la gravité. C'est pour cela qu'une avalanche ne peut se déclencher que sur une pente suffisamment raide[19]. Une avalanche traduit donc une *rupture d'équilibre* d'une partie ou de l'ensemble du manteau neigeux sur une pente. Couramment, on parle d'instabilité du manteau neigeux. Pour étudier les causes mécaniques du déclenchement des avalanches, le scientifique est donc amené à s'interroger sur la stabilité d'un manteau neigeux. Il convient toutefois de noter que, de manière générale en mécanique, la *stabilité* est un concept associé à l'état (équilibre, écoulement...) d'un système. Par exemple, on dit qu'un corps est en équilibre lorsque les forces, auxquelles il est soumis, se contrebalancent; cet état est dit stable si toute légère perturbation du système est amortie, c'est-à-dire que le corps retrouve rapidement son état premier. En nivologie, par extension ou par dérive, la stabilité est synonyme d'état d'équilibre du manteau : un manteau neigeux est stable tant que l'équilibre en son sein est maintenu ou bien que toute rupture est immédiatement amortie. Par ailleurs, il faut noter que si l'analyse d'une stabilité intrinsèque du manteau est intéressante pour l'étude du déclenchement spontanée des avalanches, elle devient insuffisante dès lors que l'on s'intéresse à un manteau neigeux sollicité par un skieur, un engin mécanisé... Il est donc utile de définir la stabilité par rapport à la charge imposée [23]. Le domaine de stabilité est alors la plage des charges que peut supporter de manière certaine le manteau neigeux. En dernier lieu, il faut noter qu'en toute rigueur les critères de stabilité devraient se définir par rapport non seulement à la charge mais également à la vitesse de déformation, car on a vu que la résistance de la neige dépend fortement de sa vitesse de déformation (cf. chapitre 3).

4.1.2. Surface de glissement

La rupture d'un matériau peut se faire de différentes manières : fissures, dislocation, glissement... Dans le cas du manteau neigeux, qui se présente comme un matériau stratifié, le passage d'une couche à une autre présente une discontinuité dans le comportement mécanique : c'est ce clivage existant qui à la fois joue un très grand rôle dans la stabilité d'un manteau neigeux et constitue un lieu privilégié pour la rupture, contrairement à un matériau homogène. On constate en effet qu'une avalanche, dans son aire de départ, concerne le plus souvent un ensemble de couches en surface, qui glisse sur une autre strate (plus rarement sur le sol) : la surface de contact entre la couche déclenchée et la couche fixe s'appelle le *plan de glissement*. Le mécanisme de rupture est très grossièrement assimilable à la rupture d'une pile de livres posée sur un plan incliné.



➡ Figure 11.
Si l'on place une pile de livres sur un plan, il peut rester en équilibre si la pente n'est pas trop forte. Si l'on exerce une force verticale, on amène la pile à la rupture, qui se fera le long de la surface de contact de deux livres.

Pour comprendre le mécanisme de départ des couches superficielles, on considère le bilan des forces qui, juste avant la rupture, s'exercent sur la couche déclenchée. C'est l'objet du prochain paragraphe. Par parenthèse, il faut faire remarquer que la surface de glissement de l'avalanche, visible dans l'aire de

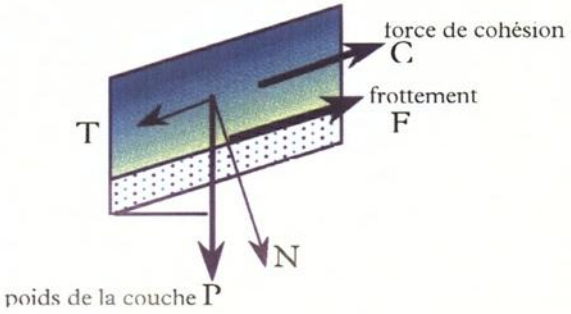
19. A noter par parenthèse que cela n'est pas vrai pour les avalanches dites sous-marines (turbidites) qui partent même sur terrain presque horizontal, car dans ce cas, c'est la poussée d'Archimède qui est l'élément moteur de l'écoulement.

départ, n'est pas nécessairement le lieu de la première rupture. Il se peut, dans certains cas, que seule la première couche superficielle soit instable, et que sa mise en mouvement puisse entraîner par frottement la rupture de la couche sous-jacente. Ceci est particulièrement visible dans le cas de départ en marche d'escalier. Dans ce cas-ci, l'instabilité a gagné instantanément des couches plus en profondeur. Quelquefois, la mise en mouvement provoque à son passage l'entraînement de nouvelles couches de neige en périphérie de l'écoulement ou au-dessous de la surface de glissement : on parle alors de *reprise*. L'analyse du mécanisme du départ n'en ressort que plus complexe.

4.2. Une première approximation

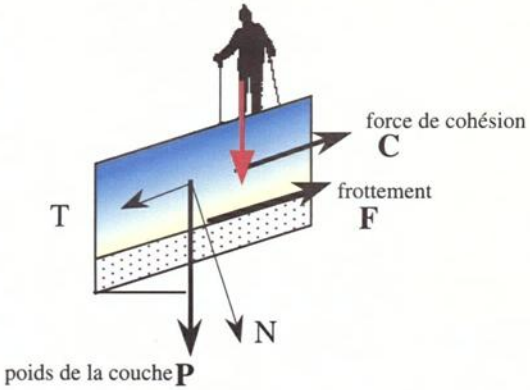
4.2.1. Bilan local

Afin de comprendre les mécanismes du déclenchement, envisageons en premier lieu un cas idéal : considérons un manteau reposant sur un plan incliné et constitué de plusieurs couches possédant des propriétés mécaniques propres.



→ Figure 12.
La strate supérieure est soumise à trois forces : le poids P, les forces de cohésion et le frottement F. Elle est en équilibre si le frottement F et la cohésion C contrebalancent la composante tangentielle T du poids.

Considérons une tranche de ce manteau et faisons un bilan des forces pour l'une de ces strates : par exemple, la couche supérieure est soumise à son propre poids P (effet de la gravité), aux frottements F exercés par la strate inférieure (ainsi qu'à une force de réaction non représentée ici) et à une force de cohésion C qui lie le bloc au reste du manteau neigeux. De manière grossière, on comprendra que si les frottements F entre strates et la cohésion C compensent la composante tangentielle du poids T, il y aura équilibre stable de cette strate : il faut que T<F+C. Le rôle de la résistance au cisaillement et de la cohésion ressort clairement de cette analyse. On s'aperçoit aussi que plus la pente est raide, plus la composante tangentielle T est grande et plus l'équilibre est compromis. De même si la cohésion diminue, l'équilibre peut être rompu. On peut renouveler ce bilan pour chacune des strates et vérifier s'il y a équilibre ou non. Examinons maintenant la conséquence du passage d'un skieur. Son poids S se rajoute à celui de la couche. La composante tangentielle T est donc plus importante, et si ce surcroît de charge est supérieur aux forces de maintien F+C, il y a rupture d'équilibre.

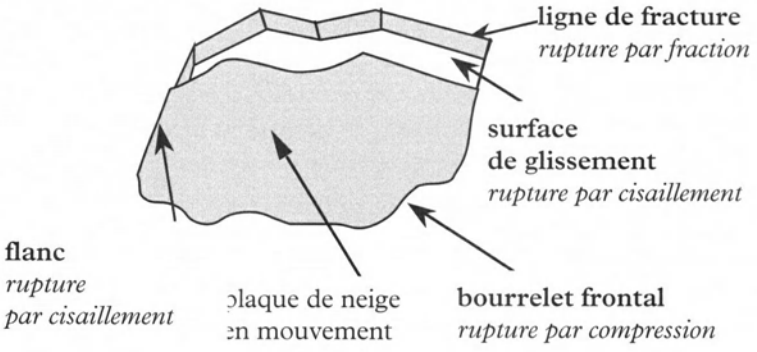


→ Figure 13.
Lors du passage d'un skieur, le frottement F et la cohésion C doivent compenser l'augmentation de la composante tangentielle du poids pour que l'équilibre persiste.

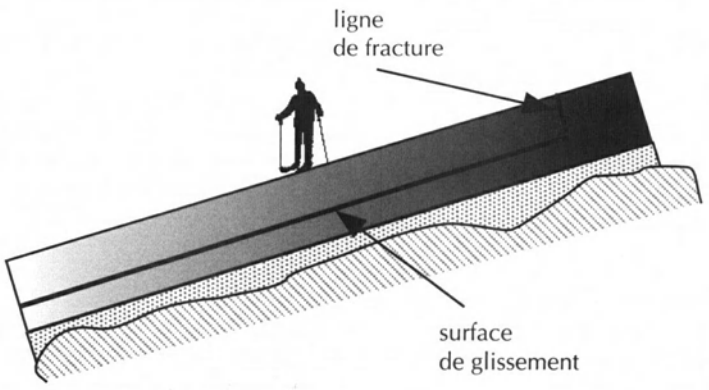
Si cette analyse permet de mettre en lumière le rôle du frottement entre strates et de la déclivité, elle reste très grossière et insuffisante à expliquer le départ d'une avalanche et doit être considérée avec précaution : elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité[20] du manteau neigeux, de la répartition des contraintes au sein du manteau neigeux, du déroulement et du mode de rupture(s), etc. [24]. En effet, la neige est un matériau aux propriétés mécaniques fortement variables (cf. chapitre 3) et hétérogènes d'une strate à l'autre. Entre autres, la distribution des contraintes dans la neige d'un côté rend l'analyse de la stabilité du manteau difficile à établir [11, 23, 25] et d'un autre côté pourrait expliquer certains phénomènes catastrophiques comme les départs en plaque, qui restent encore peu compris.

4.2.2. Étude globale : notion de plaque

Qu'il soit spontané ou artificiel, le départ d'une avalanche est le plus souvent en plaque. Le terme de *plaque* renvoie ici au fait qu'au moment du départ, la fracture découpe une superficie fermée, autrement dit, une plaque de neige qui se met en mouvement. Ainsi, il n'y a pas de lien direct avec une plaque (stratigraphique) définie dans un sondage comme étant un ensemble de couches individualisé du reste du manteau neigeux.



➡ Figure 14. Terminologie des ruptures. Les frontières de la plaque de neige sont définies par la rupture de la couche déclenchée, qui se fait en une succession d'étapes dont l'ordre dépend du mécanisme.



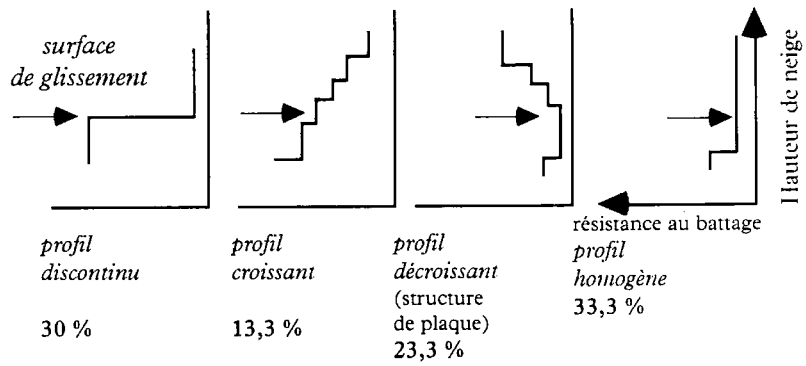
➡ Figure 15. La plaque est mise en mouvement après la rupture par traction le long de la ligne de fracture et par cisaillement sur la surface de glissement. La rupture initiale (primaire) peut être selon les mécanismes l'un ou l'autre de ces processus.

Un départ en plaque peut concerner n'importe quel type de couche ou de configuration stratigraphique du manteau comme le rapportent les figures 16

20. Il faut noter que pour certains matériaux, l'analyse ci-dessus est fausse : en effet, dans certains cas, ce ne sont pas les caractéristiques moyennes du matériau qui conditionnent la rupture mais la présence d'hétérogénéités (par exemple dislocations dans les métaux). Dans la suite, on donne deux exemples fondés sur une mécanique de la rupture différente : la théorie de la couche fragile met l'accent sur l'existence d'hétérogénéités susceptibles de se propager le long d'une couche fragile. Au contraire, la notion d'état critique émet l'hypothèse que c'est toute une couche qui est en moyenne le siège de la rupture. Notons au passage l'importance de cette question théorique, car sa résolution nous permet d'affirmer ou d'infirmer notre capacité à prévoir la rupture d'un manteau neigeux.

et 17. Deux éléments importants servent à caractériser un départ en plaque (voir fig. 16) :

- la *ligne de fracture*, en forme de V à l'envers, ou bien en fermeture-éclair, marque la frontière amont de la plaque. La fracture est perpendiculaire au plan des strates et est due à une rupture par traction au sein de la couche déclenchée ;
- le *plan de glissement*, est la surface sur laquelle glisse la plaque. Son état peut être altéré par l'écoulement de neige.

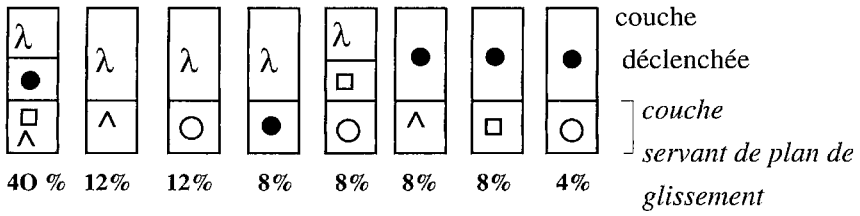


➟ Figure 16. On rapporte les configurations du manteau neigeux définies à partir d'un sondage par battage. La flèche indique la surface de glissement. On indique par ailleurs la fréquence de chaque famille estimée d'après un échantillon de 30 avalanches ayant causé un accident [60] entre 1987 et 1993. Voir aussi § 6.5.1 et ch. 5 § 2.

La nature du plan de glissement est variée comme l'indique le tableau suivant (on indique en % la fréquence observée sur le déclenchement en plaques pour les différentes catégories et sous-catégories d'après un échantillon de 30 accidents concernant des skieurs et survenus ces cinq dernières années [26]) :

Catégories d'interface	Types de surface	%	Total %
	Croûte de grains fins	10	
Surface dure	Croûte de regel	16,6	33,3
	Croûte de faces planes	6,6	
	Couche de givre	13,3	
Couche de glissement	Couche de faces planes	16,6	56,7
	Couche de gobelets	26,6	
Autre	Couche de grains fins	6,6	10
	Givre et croûte de regel	3,3	

Les caractéristiques nivologiques de la couche déclenchée et des surfaces de glissements sont également variées lors des déclenchements artificiels (passage de skieur) ; on note toutefois que la couche déclenchée concerne très souvent de la neige fraîche (particules reconnaissables) glissant sur une couche de faible cohésion (gobelets, faces planes, givre...). En ce qui concerne des avalanches spontanées, il faut rajouter également dans les diverses configurations les couches de neige humide (grains ronds). Il n'existe en revanche aucune étude pertinente sur les statistiques concernant les avalanches spontanées. Le départ en plaque nécessite la succession d'un certain nombre d'étapes : ruptures par traction, par cisaillement et par compression. L'ordre de ces étapes dépend du mécanisme de la rupture, et même si pour l'observateur la ligne de fracture est le premier signe visible d'un départ en plaque, cela ne signifie ni que la rupture ait eu lieu tout d'abord par traction précisément à cet endroit-là, ni que la surface de glissement soit la surface de rupture par cisaillement. Ce qui se passe n'est pas nécessairement ce que l'on voit.



➟ Figure 17. Les différents types de neige dans la couche déclenchée et la nature de la couche de glissement lors d'accidents concernant des skieurs (avalanches non spontanées). La configuration de loin la plus dangereuse semble être une couche de neige en cours de métamorphose (particules reconnaissables puis grains fins) sur une couche de gobelets ou de faces planes. Analyse réalisée sur un échantillon de 25 avalanches accidentelles [26].

La grande variabilité des configurations du manteau neigeux à l'endroit de la rupture suffit à montrer qu'il doit exister sans doute plusieurs mécanismes de formation des avalanches spontanées ou déclenchées. On propose par la suite trois mécanismes différents de rupture au sein du manteau neigeux. Il s'agit *d'analyses spéculatives* plausibles qui essayent d'expliquer le déroulement des événements précédant l'avalanche (spontanée ou déclenchée). On aborde ici uniquement des phénomènes observés couramment dans les Alpes. Dans d'autres régions, l'influence du climat (climat maritime prépondérant dans le cas de chaînes de montagne près de la côte comme au Japon, en Norvège...) ou les effets de l'altitude (en Himalaya...) donnent naissance à d'autres phénomènes comme les *avalanches de glissement*, dont le départ est causé par une lente fissuration d'un manteau neigeux très humidifié (la ligne de fracture est similaire à une crevasse).

4.3. Une surcharge

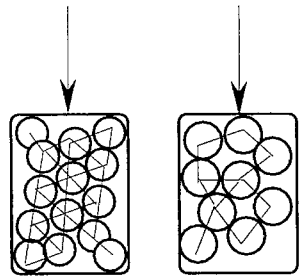
La surcharge (précipitation, passage d'un skieur, chute de corniche...) est l'une des principales causes de déclenchement car elle peut induire une importante augmentation (générale ou locale) des contraintes au sein des couches du manteau neigeux. Le mécanisme conduisant à la rupture au sein du manteau neigeux peut faire intervenir les mécanismes décrits juste après, et dans ce cas-là, la surcharge joue le rôle de détonateur, d'agent perturbateur ou amplificateur dans un processus latent d'instabilité. C'est le cas le plus fréquent dans les avalanches déclenchées par des skieurs. Mais ce mécanisme de rupture peut également être dû à la seule surcharge. L'avalanche de la combe du Pra (cf. § 3.3) donne un exemple d'accident dû à une chute de corniche malgré un manteau neigeux de très bonne constitution.

4.4. Une redistribution des contraintes

4.4.1. Cisaillement d'une mince couche fragile

L'examen du manteau neigeux dans le voisinage immédiat d'une aire de départ d'une avalanche en plaque montre souvent l'existence d'une *couche fragile mince* (gobelet, neige roulée, givre de surface enfoui, faces planes...) qui a servi de plan de glissement. D'aucuns pensent que, dans bien des cas, c'est cette couche de faible épaisseur qui est responsable de la rupture [27-30], de même que dans un métal les impuretés sont les sites initiaux de la rupture. En effet, lorsque la charge de la neige au-dessus de cette strate augmente (par exemple, à cause de chutes de neige récentes), cette couche fragile se déforme et les contraintes deviennent plus importantes en son sein. De plus comme elle est composée de neige de faible cohésion, elle subit une concentration des contraintes : en effet, le nombre de contacts entre grains est peu élevé et les ponts entre grains doivent alors transmettre des contraintes plus importantes [24].

En même temps, du fait de ce faible nombre de contacts, la résistance au cisaillement est moindre [31]. A partir d'un certain seuil de déformation, cette couche se fracture suffisamment doucement pour qu'il n'y ait pas rupture (fracture ductile), mais suffisamment vite pour qu'une réorganisation de la structure ne soit pas possible (le frittage n'a pas le temps de se réaliser). Cette première étape constitue la *fracture initiale*; elle est invisible car elle concerne uniquement une couche enfouie. Cette fracture se fait lentement (en plusieurs dizaines d'heures) selon des plans le long de la couche fragile. Les zones affectées sont dites *super-fragiles*. Leur existence au sein de la couche fragile va induire une concentration supplémentaire de contraintes (tension et cisaillement).



→ Figure 18. Si l'on applique la même force sur un échantillon de neige dense de bonne cohésion (grains fins par exemple) et un autre lâche et de faible cohésion (comme des gobelets), la distribution de contraintes n'est pas identique : dans le premier, les grains sont petits, rapprochés avec de nombreux contacts entre eux tandis que dans le second cas, les grains sont plus gros et ont moins de points de contact, donc les contraintes sont plus importantes car la surface de contact est bien moindre.

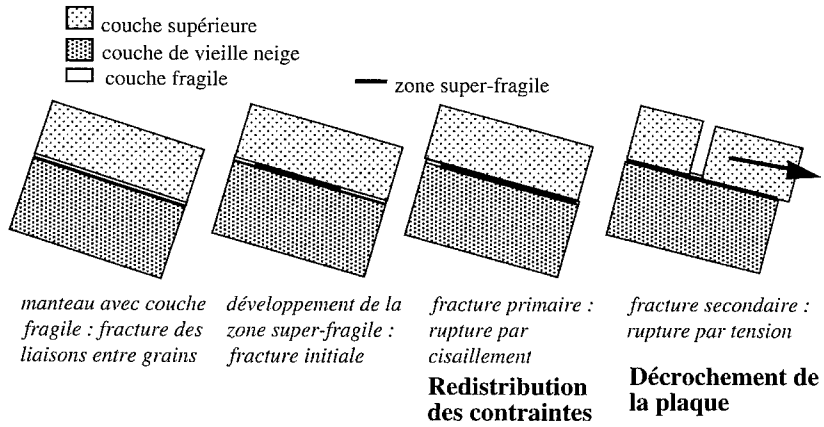
Une propagation de ces zones particulièrement fragiles est possible si la neige s'y prête, c'est-à-dire si les déformations et les contraintes sont suffisantes. Si l'étendue de la couche super-fragile est suffisante (la longueur doit dépasser une dizaine de fois l'épaisseur de la couche supérieure), il y a alors rupture de la couche fragile qui conduit la fracture sur une surface importante (*ondes de contrainte* et de *déformation*) : c'est la *rupture dite primaire*, qui peut, étant donné sa vitesse de déformation, concerner des zones initialement de plus grande stabilité, car la résistance décroît avec la vitesse de déformation (cf. ch. 3). A ce moment-là on peut considérer que la couche fragile n'exerce plus aucun frottement sur la couche supérieure. Dès lors pour compenser la disparition du frottement à la base de la couche, la tension doit augmenter en proportion. Plus l'épaisseur de la strate est petite, plus la tension est grande. Cette redistribution est brutale et s'étend rapidement sur une vaste superficie. Lorsque cette contrainte devient supérieure à la résistance, il y a fissuration du manteau neigeux. C'est justement parce que la rupture est due à une tension excessive que la fracture se développe toujours perpendiculairement à la pente et c'est seulement à ce moment-là que la rupture devient visible pour un observateur.

L'aire de départ est limitée par l'extension de la zone fragile. Plus la couche fragile est mince, plus le développement de zones fragiles est favorisé. Par ailleurs, les modélisations ont montré l'influence complexe de la température de surface et de la vitesse de métamorphose sur la probabilité de déclenchement en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure. Pour des couches supérieures rigides (neige dure), la longueur minimale de la zone super-fragile doit être bien plus importante.

En outre, ces zones super-fragiles peuvent fusionner. De même, des ondes peuvent se propager d'une zone à l'autre, ce qui peut expliquer des décrochements de plaques quasi simultanés sans contact des aires de départ (voir exemple § 3.2). La théorie des zones super-fragiles est séduisante et permet d'expliquer un certain nombre de départs spontanés en plaque, la rupture de l'équilibre, l'extension limitée de l'aire de départ même sur une pente uniforme *a priori* de stabilité homogène, le décalage observé entre la fin des précipitations et l'activité avalancheuse et des phénomènes de propagation[21]. Cependant, elle concerne

21. On entend ici des phénomènes pour lesquels le déclenchement semble consécutif au passage d'un skieur mais avec un décrochement bien loin du skieur. Voir par exemple les accidents du ruisseau d'Arrondaz (Valfréjus, Savoie) [32] ou bien de Purcell Mountains (Rocheuses, Canada) [33].

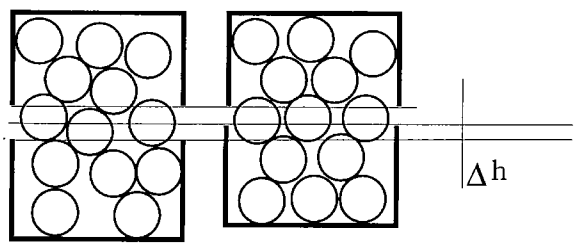
uniquement des couches de neige sèche (plus ou moins récentes) reposant sur une couche fragile, ce qui n'est pas la configuration stratigraphique la plus communément trouvée dans les départs en plaque. De plus, cette théorie accorde une place privilégiée aux couches fragiles minces (de l'ordre de quelques millimètres d'épaisseur), dont la détection dans les sondages stratigraphiques est difficile. A ce jour, rien ne permet de confirmer ou d'infirmer la validité ou la portée de la théorie des couches fragiles [33].



➡ Figure 19. Les différentes étapes d'une rupture amenant à un départ en plaque : la rupture de la surface de frottement au niveau de la couche fragile provoque une redistribution soudaine des contraintes.

4.4.2. Rupture par compression

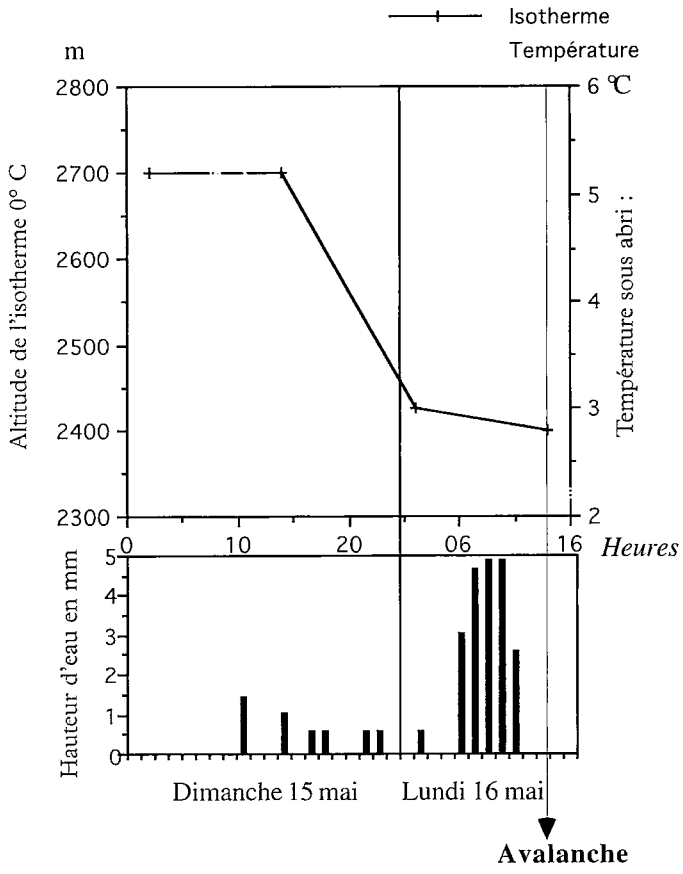
La compression (poids de la couche supérieure) d'une couche épaisse de neige de faible cohésion (gobelets, faces planes) peut entraîner une rupture par cisaillement à l'intérieur de cette couche fragile. La déformation de la strate est accompagnée d'une diminution de volume, car le cisaillement d'un assemblage lâche de grains provoque une réorganisation de la structure. Dès lors, sur une certaine surface, la couche supérieure n'est plus en contact avec la couche fragile. Le déficit des forces de frottement doit être alors compensé par un surcroît de tension. Cette redistribution de contraintes peut être suivie de la rupture par traction, comme on l'a vu dans le mécanisme précédent.



➡ Figure 20. Le cisaillement d'un échantillon granulaire lâche provoque une réorganisation des particules et donc une légère diminution de volume (mais pas un affaissement). Dans le cas de gobelets, cette diminution de volume peut être accrue par l'écrasement des cristaux.

Ce scénario peut expliquer l'instabilité liée à la présence de gobelets en grande quantité, surtout durant les hivers caractérisés par un faible enneigement (comme en 1987/88). Il faut par ailleurs noter que la couche de faible cohésion sert le plus souvent uniquement de plan de glissement mais n'est pas entraînée par l'avalanche malgré sa faible résistance, ce qui incite à penser que la distribution de contraintes au sein de cette couche est différente.

4.4.3. Choc thermique



➟ Figure 21. Résumé des conditions météorologiques précédant l'avalanche du tunnel du Mont-Blanc (cf. § 1.1.3.) : isotherme 0 °C (d'après radiosondages de Lyon et Payerne), température (station Nivose des Aiguilles-Rouges, 2 330 m), précipitations (recueillies à Chamonix). L'avalanche a eu lieu le 16 mai 1983 à 14 h 10.

Des variations de température peuvent être la cause d'avalanches superficielles dans des couches de neige sensible (neige fraîche...) [34]. Par exemple, des chutes de pluie succédant à des chutes de neige provoquent immédiatement des avalanches le plus souvent avec départ en plaque d'épaisseur voisine de 40 cm. La quantité de pluie (1 mm) ne cause pas une surcharge suffisante pour expliquer cette activité spontanée immédiate tandis que le faible délai entre le début de la pluie et les premières avalanches ne permet pas une humidification en profondeur. Les expériences ont même montré que seuls les 5-10 premiers centimètres étaient affectés [19]. L'hypothèse avancée est une redistribution des contraintes en surface : l'augmentation de température provoque une diminution importante de la résistance à la tension dans la partie supérieure et les contraintes (la reptation induit une tension au sein de la couche) se concentrent à la base de la couche ou bien alors le changement de cohésion (frittage remplacé par capillarité) induit localement une augmentation des tensions (contraction de surface) [19]. L'avalanche du 16 mai 1983 (voir § 1.1.3.) est peut-être un exemple d'*avalanche retardée*. Le choc thermique (couplé à la percolation ?) est une hypothèse plausible pour expliquer le phénomène : la ligne de fracture se situe juste à l'altitude de regel.

4.4.4. Effet de lubrification

L'eau liquide dans le manteau neigeux cause un certain nombre d'effets néfastes à la stabilité du manteau dès qu'elle est présente en quantité trop importante (TEL>8 %) :

– l'eau provoque une fonte des liaisons entre grains. Les ponts de glace restants sont à une température de 0 °C et sont de faible résistance mécanique ;
– des ondes de déformation dues à la percolation se propagent dans le manteau neigeux [19] ;
– la densité de la neige humidifiée augmente ;
– la percolation crée des chenaux verticaux, mais l'eau peut être déviée de ces canaux pour s'écouler le long de couches plus imperméables [19]. La texture à l'interface de cette couche change rapidement et le frottement à la base commence à diminuer, car la pellicule d'eau ne peut être mise sous pression du fait de la porosité de la neige : l'eau agit alors comme un lubrifiant en réduisant les frottements entre couche. La disparition des contraintes de cisaillement entraîne une redistribution des contraintes au sein du manteau. Comme précédemment, la rupture est alors possible.

4.5. Un état critique

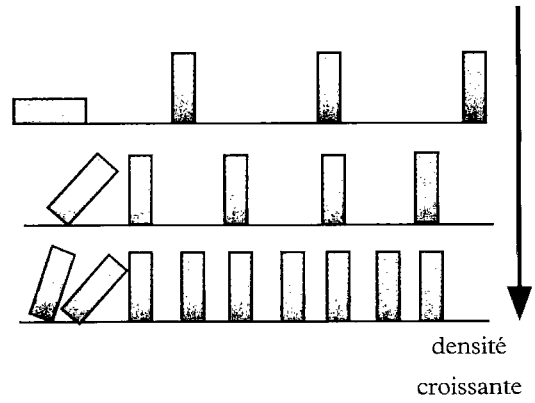
4.5.1. Apparition de la cohésion

Le départ d'avalanches en plaque, qu'elles soient spontanées ou déclenchées, semble assez limité dans le temps et dans l'espace : après un délai plus ou moins court à la suite d'une précipitation suffisante de neige ou d'une activité éolienne marquée, on observe des départs en plaque (et entre autres des accidents) pendant une certaine période et sur certaines pentes. Pour expliquer ces déclenchements dans certains cas (qui ne peuvent pas toujours être mis en rapport avec l'existence de couches fragiles), certains avancent l'idée d'une *qualité critique* de neige "poudreuse" en surface.

Pour fixer les idées, donnons un exemple souvent observé : une pente recouverte de neige poudreuse semble stable le matin, en ce sens que des skieurs l'ont parcourue sans incident, tandis que l'après-midi, elle peut devenir le lieu de départ (spontané ou non) en plaque. Le lendemain, le risque semble avoir nettement diminué. Que s'est-il passé ? Entre ces trois temps, un observateur attentif aura remarqué un changement de texture de la neige de surface, même si elle garde toujours un aspect de poudreuse (aux yeux des skieurs) [6, 35, 36] : le matin, la poudreuse est pulvérulente, tandis qu'elle commence à devenir liée durant l'après-midi. Des signes tels que le développement de petites fissures juste au devant des skis sont des signes de ce changement de qualité [35]. Par la suite, la consolidation due à la métamorphose se poursuivant, la neige devient progressivement plus frittée et l'instabilité diminue.

On peut tenter de généraliser cet exemple et d'expliquer un peu plus qualitativement ce qui se passe. Lorsque la neige fraîche est suffisamment poudreuse, seule une très faible cohésion de feutrage existe au sein de la nouvelle couche. Les contraintes y sont alors très dispersées car l'accumulation de neige est une structure granulaire très souple, les cristaux enchevêtrés entre eux présentent à leurs contacts de grandes surfaces de frottement (qui plus est, mobiles) qui "diffusent" considérablement les contraintes. Puis, la neige subit une métamorphose qui casse les branches des cristaux et crée des ponts de glace par frittage (cf. ch. 3). La structure se rigidifie progressivement et se transforme en réseau fragile de grains en contact avec des ponts de faibles dimensions. La neige acquiert une texture dite *liée* particulièrement propice à la propagation des contraintes (voir le test de la pelle de Munter au ch. 4). Enfin, à la fin de cette première étape de métamorphose, la neige s'est nettement consolidée ; les particules deviennent au fur et à mesure des grains fins. Pour illustrer cette capacité de propagation de la rupture dans la neige liée, on considère l'image suivante [37] : on aligne des morceaux de sucre à intervalles réguliers. Plus la métamorphose est à un stade avancé, plus la densité est élevée. On représente cela en diminuant la

distance entre les morceaux de sucre. Lorsque la densité est faible, si on fait tomber un morceau, rien ne se passe. Par la suite, si l'on augmente la densité, la chute d'un morceau entraîne toute la rangée : c'est la propagation catastrophique qui amène à la rupture d'équilibre de toute la colonne. Si la densité continue à croître, la chute d'un sucre provoque au pire la culbute de quelques morceaux, mais le mouvement est rapidement amorti et n'est pas transmis au reste de la colonne.



➟ Figure 22.
Possibilité de propagation de la rupture en fonction de la densité linéique de la rangée de morceaux de sucre : aux densités extrêmes, l'instabilité d'un bloc ne se transmet pas à la colonne, mais il existe une valeur critique de la densité à partir de laquelle, cette propagation est possible.

Des expériences *in situ* ont justement montré récemment que la masse volumique joue un rôle important pour ce type de neige : les mesures sur la neige de surface concernée par des déclenchements accidentels en plaque donnent des plages de masse volumique comprise entre 140 et 160 kg/m³. Ce n'est évidemment pas le seul paramètre à prendre en compte et il est certain que la température, la vitesse de métamorphose, la cohésion influent sur cette qualité de neige critique [38]. Le tableau suivant donne les mesures concernant la neige de surface prises entre le 2 et 3 avril 1993, date à laquelle le passage de l'opérateur à pied a déclenché une plaque de 40 cm d'épaisseur (à la fracture). Le plan de glissement était constitué par une croûte de regel. On remarque que la masse volumique et la résistance au cisaillement croissent au fil des heures, indiquant une évolution rapide de la neige, qui garde néanmoins une consistance poudreuse (faible résistance au battage).

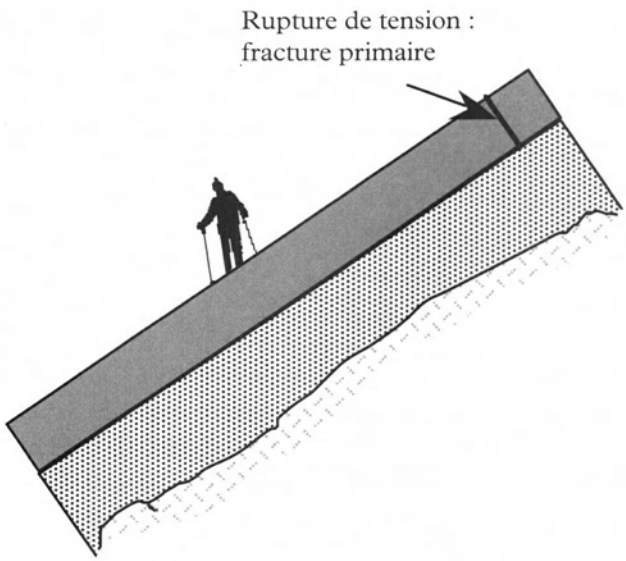
Date	Heure	Température	Résistance au cisaillement	Résistance au battage	Masse volumique
02/04/93	10h30	- 4,7 °C	0,2 kgf/dm²	0,4 kgf	120 kg/m³
02/04/93	14h30	- 3,2 °C	0,4 kgf/dm²	0,5 kgf	140 kg/m³
03/04/94	12h15	- 3,3 °C	0,6 kgf/dm²	0,45 kgf	160 kg/m³

Dans ce type de mécanisme, on s'attend à un rôle prépondérant de la température, car elle commande l'efficacité et la rapidité de la métamorphose : plus elle s'approche de 0 °C, plus la métamorphose est rapide. Beaucoup rapportent en effet des déclenchements de plaque l'après-midi ou inversement une activité avalancheuse moindre (pour les avalanches en plaque) par temps très froid (T<10 °C [25, 32, 34]). L'influence de la température extérieure sur le développement de couches fragiles est suffisamment lente pour qu'on écarte ce type de mécanisme au profit du processus d'état critique : en effet, une augmentation de la température de l'air favorise un frittage rapide donc l'apparition d'un état critique momentané. Inversement, une température basse retarde cette apparition. Cela expliquerait peut-être la croyance commune selon laquelle que le froid maintient longtemps la stabilité du manteau neigeux, alors qu'il ne fait que retar-

der ou bien prolonger l'instabilité en ralentissant la vitesse de métamorphose (dans ce cas-ci).

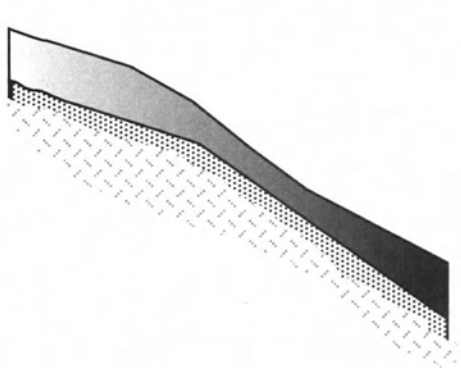
Dans le cas d'accumulations de neige transportée par le vent, le processus d'apparition de l'état critique diffère un peu : le vent a pour effet de casser les grains et de réduire leur taille. Les grains déposés sont très proches (le vent "compacte" les grains) et le frittage apparaît très rapidement. Dans les premières heures, le dépôt peut garder un aspect friable, mais rapidement la neige se consolide. On observe (voir ch. 10) que le risque accidentel est maximal juste après l'épisode venteux[22]. La température influe également beaucoup sur la persistance des instabilités.

La compréhension du mode de rupture est moins claire que dans le cas d'une rupture par cisaillement le long d'une couche fragile. Il est probable qu'il s'agisse en tout premier lieu d'une propagation des contraintes de tension avec rupture au sein du manteau, suivie ensuite d'une rupture par cisaillement à la base de la plaque. Si cette dernière étape est impossible, la plaque se fissure sur le pourtour mais ne se met pas en mouvement. Des témoins ont en effet rapporté de telles fissurations sans déclenchement [26].



➞ Figure 23.
Le passage d'un skieur (composante tangentielle du poids) provoque une augmentation des tensions au sein de la couche superficielle, qui se tend (un peu à la manière d'un ressort). Pour contrebalancer la force imposée, la tension doit se propager sur de grandes distances.

Dans le cas de départs spontanés, il semble que la reptation est suffisante pour mettre en tension la couche de neige critique. Dans le cas d'avalanche déclenchée, le passage d'un skieur est suffisant pour provoquer une tension qui se propage au travers du manteau neigeux : la couche superficielle est alors mise en tension comme un ressort. Si cette contrainte est localement trop grande, la strate se rompt à cet endroit. La fracture est perpendiculaire à la ligne de pente et peut être éloignée du skieur.



➞ Figure 24.
Un changement de pente implique une concentration de contraintes (tension) au sein de la couche superficielle ; préférentiellement ces zones sont des lieux de fracture. De plus associées à des dépôts de neige soufflée, elles sont souvent caractérisées par une variation de l'épaisseur des accumulations. La diminution d'épaisseur provoque également une augmentation locale de la tension. La concomitance de ces deux phénomènes explique le rôle important joué par les ruptures de pente dans les déclenchements d'avalanches.

22. En janvier 1994, après le passage d'une courte dépression entraînant peu de précipitations (mercredi 27) sur le nord des Alpes mais caractérisée par des vents tempétueux en Savoie, le beau temps revient le jeudi (28/01). Le vendredi 29, un vent de nord-ouest commence à se lever avec violence et continue à souffler toute la journée du samedi 30 ; il cesse dès le lendemain et laisse place à un beau temps. Le samedi et le dimanche, on signale un certain nombre d'accidents mortels (10 morts en Savoie). Aucune avalanche n'a été signalée par la suite.

4.5.2. Disparition de la cohésion

Une neige fraîche pulvérulente ou une neige détrempée (forte teneur en eau liquide) peuvent former des avalanches avec départ ponctuel. Le plus souvent, il s'agit de coulées de peu d'ampleur. Ainsi, dans les pentes soutenues, les skieurs déclenchent souvent de petites coulées superficielles sans importance. C'est la faiblesse de la cohésion qui limite l'extension de ces mouvements de neige. Sur une pente de déclivité suffisante (plus de 20°), une légère perturbation (chute d'une pierre, passage d'un skieur, pluie...) met en mouvement un peu de neige, qui à son tour en glissant entraîne la neige dans le voisinage. Il y a ensuite réaction en chaîne (ou "effet boule de neige"). Ce type de mécanisme est similaire aux avalanches sur les tas de sable [39]. La coulée peut par la suite déclencher durant son écoulement une avalanche avec départ en plaque à cause de la surcharge qu'elle impose.

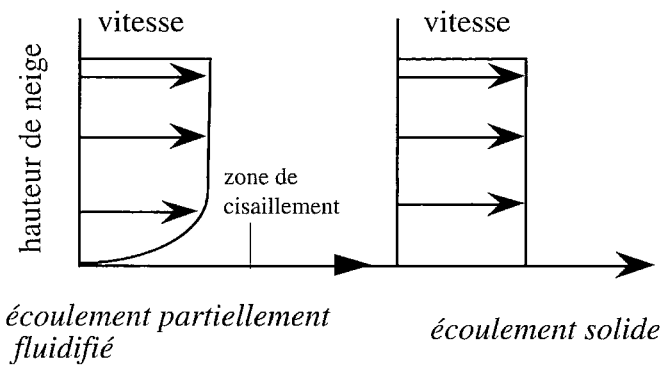
5. Dynamique de l'écoulement

On commence à parler d'écoulement dès que la phase de mise en mouvement de la neige s'achève. Cet écoulement peut prendre plusieurs formes : écoulement au sol (avalanche coulante), aérien (aérosol) ou un aérosol et une avalanche coulante (avalanche mixte). Les conditions de développement de l'une de ces formes résultent de l'interaction de plusieurs éléments :

- volume de neige mobilisée : l'ordre de grandeur varie de la centaine au million de m^3 ;
- nature de la neige : ce sont surtout la présence d'eau liquide et la température (air et neige) qui influent sur le comportement mécanique de la neige en mouvement ;
- configuration du terrain : forme, longueur de la zone de transit, nature de la surface de glissement (pour les avalanches de fond), déclivité sont les principaux facteurs à prendre en compte.

5.1. Avalanche coulante

Les qualités de neige rencontrées dans ce type d'écoulement sont très variables : neige sèche, neige légèrement humide ou très humidifiée... Ainsi, la neige en mouvement peut se présenter sous la forme de grains, de pâte, de boules ou de mottes de neige. De plus le type de neige peut évoluer, surtout si la zone de transit présente une grande dénivellation (plus de 1 000 m) ; une humidification de la neige en cours d'écoulement peut modifier son comportement.



➡ Figure 25.
Les deux familles d'écoulements denses classés selon leur profil de vitesse.

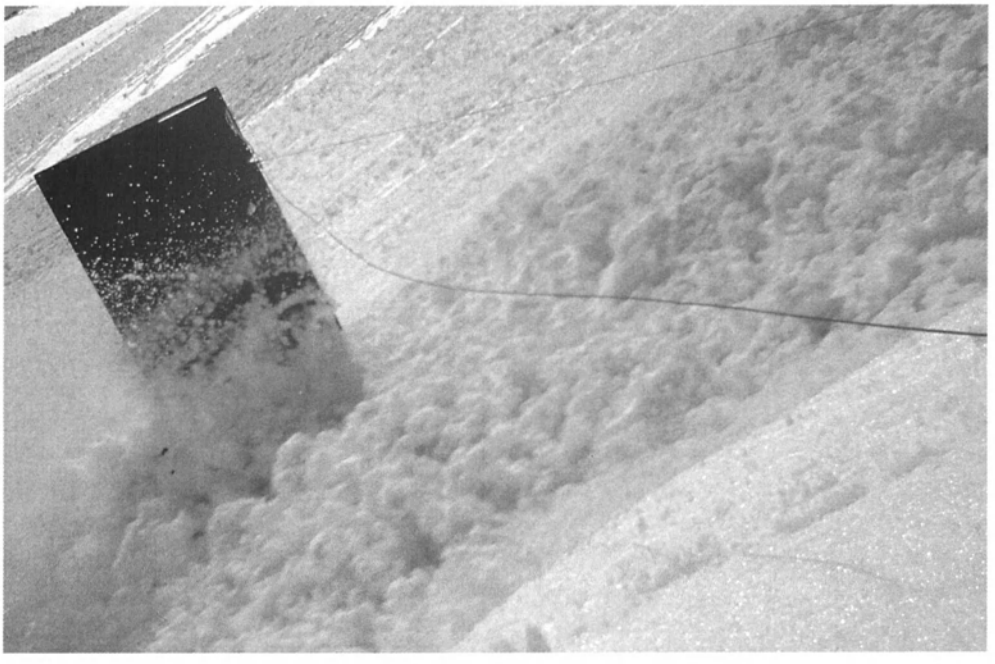
On observe deux familles d'écoulements denses [40] :

• *écoulement partiellement fluidifié* : si l'on analyse le profil de vitesse au sein de l'écoulement, on remarque près de la surface de glissement une zone de cisaille-

ment intense (au moins 10 cm d'épaisseur) où la vitesse augmente rapidement, puis au-dessus de laquelle la vitesse s'uniformise bien que l'on enregistre d'importantes fluctuations ;

• *écoulement "solide"* : l'écoulement ressemble au glissement d'un solide sur une pente ; le profil de vitesse est uniforme et sans trop de fluctuations.

De nombreux phénomènes, souvent encore mal compris, rendent particulièrement complexe l'étude mécanique de ce type d'avalanche : turbulence au sein de l'écoulement, transfert de neige entre le front, le corps et la queue de l'avalanche, transfert vertical (ségrégation entre grosses et petites particules), incorporation d'air dans le cas de neige sèche qui augmente la hauteur d'écoulement, etc. [40-42]. La hauteur et la vitesse maximales sont enregistrées au niveau du front, qui présente parfois un petit panache de neige en suspension. La vitesse dépasse rarement 30 m/s. La pression d'impact sur un obstacle dépend de la masse volumique et de la vitesse et on enregistre des pics de l'ordre de 1 000 kPa (soit près de 100 tonnes par m^2) [43, 44]. Elle atteint des valeurs encore plus fortes pour des phénomènes d'ampleur. L'arrêt de l'écoulement dense est surtout lié à la déclivité du terrain : au-dessous de 20°, l'écoulement ralentit considérablement et s'arrête. Il faut noter néanmoins que des écoulements pâteux (composés essentiellement de neige très humide dont la consistance rappelle celle du yaourt) peuvent parcourir des distances surprenantes. Si la masse de neige est insuffisante (coulée, petite avalanches), les frottements peuvent dissiper plus rapidement l'énergie cinétique et l'avalanche s'arrête rapidement même sur une pente soutenue (plus de 25°).



Ecoulement dense sur le site expérimental du col du Lautaret (Hautes Alpes). Cliché O. Marco.

5.2. Aérosol

Une avalanche en aérosol est un écoulement turbulent résultant de la suspension de particules de neige dans l'air, il ressemble à un gros nuage de neige se déplaçant à très grande vitesse [45]. Il est précédé d'environ une centaine de mètres par un écoulement d'air (sans entraînement de cristaux) appelé *vent* ou *souffle* de l'avalanche. La pression de ce souffle est faible, de l'ordre 5 kN/m^2, mais peut être suffisant pour provoquer des dégâts (arbres, toitures, etc.). L'aérosol

naît du brassage d'un écoulement dense, qui permet une mise en suspension des cristaux de glace. Dans le cas de neige poudreuse (particules reconnaissables), la plupart des auteurs pensent d'après leurs observations que l'avalanche doit atteindre une vitesse de 10 m/s pour que l'air puisse former un nuage de neige [42, 45]. D'autres estiment qu'un écoulement dense peut donner naissance à un aérosol, car sa surface libre peut être instable et parcourue par des trains d'ondes (roll waves) [42]. L'aérosol est composé de plusieurs structures tourbillonnaires turbulentes qui se déplacent très rapidement (vitesse entre 30 et 100 m/s, voire plus) et croissent en volume (hauteur de plusieurs dizaines de mètres). La densité de neige au sein de l'aérosol est très variable. Il semble maintenant établi que la densité est d'autant plus forte qu'on s'approche du sol [45] ; on parle alors de *partie dense* de l'aérosol. C'est cette partie qu'on cherche à freiner, à dévier ou à arrêter lorsqu'on construit une digue de protection [46].

Le nuage de neige descend la pente tout en continuant son expansion aérienne sans être astreint à suivre le relief. Il peut même parcourir des distances horizontales ou remonter des pentes opposées. L'effet destructeur est lié à la violence et à l'étendue de l'aérosol (pression de l'ordre de 100 kN/m^2). Le processus d'arrêt n'est pas encore bien compris. Les étapes semblent être : la pente vient à faiblir (diminution des effets de gravité), l'aérosol n'est plus alimenté en neige (diffusion de neige entre le nuage et l'air ambiant), les particules en suspension commencent à sédimenter. Ce processus de sédimentation est très lent (plusieurs dizaines de minutes) et les témoins rapportent une impression de brouillard. Dans la phase d'arrêt, malgré un aspect spectaculaire, l'effet destructeur est très faible.

5.3. Avalanche mixte

Il s'agit d'un écoulement composé d'une partie dense sur laquelle se développe un aérosol. C'est une forme fréquente dans des avalanches d'ampleur, où la vitesse de l'importante masse de neige mobilisée autorise la mise en suspension d'une partie de la neige en mouvement. Les effets peuvent être alors particulièrement destructeurs.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] M. R. DE QUERVAIN : *Avalanche Atlas* (1981, Unesco, Paris) 265 p.
[2] C. ANCEY et C. CHARLIER : *Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches*, Revue de Géographie Alpine 84 (1996) 9-21.
[3] A. LUNN : *Le ski en hiver, au printemps, sur les glaciers* (1924, Librairie Dardel, Chambéry).
[4] A. ALLIX : *Les avalanches*, Revue de Géographie Alpine 13 (1925) 359-419.
[5] F. VALLA : *Ski et Sécurité* (1991, Glénat, Grenoble) 128 p.
[6] W. MUNTER : *Le risque d'avalanche* (1992, Club Alpin Suisse, Bern) 200 p.
[7] C. ANCEY et M. NAAIM : *Modelisation of dense avalanches* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. BRUGNOT (1992, Cemagref) 173-182.
[8] P. COGOLUENHES : *L'avalanche des Favrands du 16 mai 1983*, Rapport interne (1983, Direction Départementale de l'Agriculture (Savoie), Services RTM, 282/PC/MM).
[9] S. G. EVANS : *The field documentation of highly mobile rock and debris avalanches in the Canadian Cordillera,* Comptes rendus 'international workshop on rapid gravitational mass movements', Grenoble, coordonné par L. BUISSON (1993, Cemagref) 73-76.
[10] B. SALM, A. BURKARD et H. GUBLER : *Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*, Rapport interne (1990, Eigdenössichen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Davos), n° 47).
[11] B. LACKINGER : *Stability and fracture of the snow pack for glide avalanches* Comptes rendus 'Avalanche formation, movement and effects', Davos (1987, IAHS) 229-241.
[12] F. BERGER : *Rôle de protection des forêts*, Thèse de doctorat ENGREF (1997).
[13] V. DE MONTMOLLIN : *Introduction à la rhéologie de la neige*, Thèse de doctorat Université Joseph Fourier (1978).
[14] B. SALM : *Mechanical properties of snow*, Review of Geophysics and Space Physics 20 (1982) 1-19.
[15] J. MARTZOLF et E. PAHAUT : *Attention... L'échelle de risque d'avalanche a changé*, Neige et Avalanche 64 (1993) 11-13.
[16] D. M. MC CLUNG et P. A. SCHAERER : *The avalanche handbook* (1993, The Montaineers, Seattle) 271 p.
[17] L. REY : *Les chutes de neige catastrophiques et leurs conséquences*, Neige et Avalanches 59 (1992) 10-16.
[18] C. CHARLIER : *Le risque en montagne, définir le risque : le risque négocié.* Comptes rendus 'Séminaire Futur Antérieur'du 21 avril 1994, Paris.
[19] H. CONWAY et C.F. RAYMOND : *Snow stability during rain*, Journal of Glaciology 39 (1993) 635-642.
[20] E. BRUN et L. REY : *bilan de la campagne de mesures mécaniques de la neige effectuée sur le terrain durant l'hiver 1984-85*, Rapport interne (1985, Centre d'Étude de la neige, n° 199).
[21] M. DE QUERVAIN et R. MEISTER : *50 years of snow profiles on the Weissfluhjoch et relations to the surrounding avalanche activity*,'Avalanche formation, movement and effects', Davos (1987, IAHS) 161-183.
[22] GENDARMERIE NATIONALE : Rapport interne (1987, PGHM de Grenoble, PV n° 17).
[23] P. M. B. FÖHN : *The stability index and various trigerring mechanisms.* Comptes rendus 'Avalanche formation, movement and effects', Davos, coordonné par (1987, IAHS) 195-206.
[24] K. F. VOITKOVSKIY : *Snow cover stability on slopes et avalanches dynamics.* Comptes rendus 'Avalanche formation, movement and effects', Davos (1987, IAHS) 337-351.
[25] J. B. JAMIESON et C. D. JOHNSTON : *Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting*, Annals of Glaciology 18 (1993) 268-273.
[26] IFENA : *Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen*, Rapport interne (1988-93, IFENA, n° 52-56).
[27] D. M. MC CLUNG : *Mechanics of snow slab failure from a geotechnical perspective.* Comptes rendus 'Avalanche formation, movement and effects', Davos (1987, IAHS) 475-507.
[28] H. GUBLER : *Measurements and modelling to improve our understanding of avalanche formation.* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 89-98.
[29] H. P. BADER et B. SALM : *On the mechanics of snow slab release*, Cold Regions Science and Technology 17 (1990) 287-300.
[30] B. LACKINGER : *Supporting forces and stability of snow-slab avalanches : a parameter study*, Annals of Glaciology 13 (1989) 140-145.
[31] H. GUBLER : *Determination of the mean number of bond per snow grain and of the dependence of the tensile strain of snow on stereological parameters*, Journal of Glaciology 20 (1978) 329-341.
[32] A. DUCLOS : Contribution à l'étude de la localisation des plaques de neige sur un domaine skiable : conception d'un protocole d'observations et exploitation des résultats sur la saison 1992-93, DEA Joseph Fourier (IGA) (1993).

[33] B. JAMIESON : *Avalanche prediction for persistent slabs*, Thèse de doctorat, Calgary (1995) Department of Civil Engineering.
[34] R. I. PERLA et M. MARTINELLI : *Avalanche Handbook* (1976, Department of Agriculture US, Fort Collins) 238 p.
[35] T. DAFFERN : *Avalanche Safety for Skiers & Climbers* (1992, Rocky Mountain Books, Calgary) 192 p.
[36] C. REY : *La prévision du risque et les plaques*, Neige et Avalanches **62** (1993) 24-27.
[37] C. ANCEY : *Avalanches : dangers réels et dangers perçus par le skieur*, Sommet 2 (1994) 29-35.
[38] A. DUCLOS : *Neige, vent et avalanches : quelques observations pour un meilleur diagnostic*, Neige et Avalanche **64** (1993) 21-27.
[39] P. EVESQUE et P. PORION : *Les avalanches*, Pour la Science, (1993) 54-61.
[40] H. GUBLER : *Dense-flow avalanches, a discussion of experimental results and basic processes.* Comptes rendus 'International Workshop on rapid gravitational mass movements', Grenoble, coordonné par L. Buisson (1993, Cemagref) 127-126.
[41] P. A. SCHAERER : *Friction coefficients and speed of flowing avalanches.* Comptes rendus 'Symposium Mécanique de la Neige', Grindelwald, (1974, IAHS) 425-432.
[42] E. J. HOPFINGER : *Snow avalanche motion and related phenomena*, Annual Review of Fluid Mechanics **15** (1983) 45-76.
[43] V. M. KOKLYAKOV, B. N. RZHEVSKII et V. A. SMOILOV : *The dynamics of avalanches in the Khibins*, Journal of Glaciology **19** (1977) 431-439.
[44] E. R. LA CHAPELLE : *Snow avalanches : a review of current research and applications*, Journal of Glaciology **19** (1977) 313-324.
[45] P. BEGHIN et X. OLAGNE : *Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches*, Cold Regions Science et Technology **19** (1991) 317-326.
[46] A. AUGE, F. OUSSET et O. MARCO : *Effet d'une digue sur l'écoulement d'un aérosol.* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 235-240.

Chapitre 6
GESTION ET PRÉVISION DU RISQUE D'AVALANCHES*

Skieurs, responsables de la sécurité des pistes, personnels de l'équipement, aménageurs, météorologistes, autorités locales, tous se sont vus un jour ou l'autre confrontés au problème de l'estimation du risque d'avalanches. Si le problème est *a priori* le même, les moyens de réponse dépendent de chaque cas particulier. Nous allons voir dans ce chapitre les principales procédures d'estimation du risque à travers les deux démarches complémentaires que sont la *gestion* et la *prévision*. La gestion du risque passe par la prévention et une analyse spatiale ; on y a recours dès lors qu'on souhaite protéger un équipement. La prévision du risque intègre uniquement la dimension temporelle du risque ; c'est le souci premier du skieur par exemple, qui doit traverser une pente à un moment donné.

1. L'ESTIMATION DU RISQUE D'AVALANCHES

1.1. Position générale du problème

L'objet de cette partie est d'ouvrir une parenthèse sur les notions de risque, de danger, d'aléa et d'estimation. La discussion présentée ici est une des approches possibles. Elle est simplifiée et pour plus de détails, on renvoie le lecteur à des revues spécialisées plus complètes (voir par exemple [1]).

❶ *Il n'existe pas d'estimation universelle du risque*, car celle-ci doit tenir compte du contexte dans lequel on l'utilise : s'interroger sur la sûreté d'une pente avant le passage d'un groupe de skieurs, se demander s'il est nécessaire de faire un tir préventif pour un secteur dominant une piste de ski, savoir si telle zone est constructible et hors de portée des avalanches, fermer ou non une route aux automobilistes durant une situation avalancheuse sont autant de questions appelant une bonne estimation du risque, mais nécessitant des moyens totalement différents. Le skieur ou le pisteur a de manière générale à répondre à la question fondamentale : « cette pente est-elle avalancheuse en ce moment et sous quelles conditions ? ». Il s'agit pour eux d'estimer un risque *temporel*. Les procédures d'estimation sont des *prévisions* du risque. Dans un projet de constructions, l'aménageur s'intéresse à connaître les zones dangereuses du site, c'est-à-dire celles susceptibles d'être touchées par des avalanches. Ce zonage est établi en fonction de la fréquence (période de retour) et de la gravité (dommage) du phénomène rencontré ou potentiel et doit répondre à la question : « A quel danger est soumis cet endroit et quel degré de sûreté peut-on lui attribuer ? ». On parle dans ce cas de *risque spatial*. Dans ce cas-ci, l'estimation se fait dans le cadre de la *gestion* et de la *prévention* du risque.

❷ *Le risque est une perception du danger.* On parle d'*évaluation du risque* et non de *mesure du danger* afin de bien rendre compte de l'aspect subjectif de l'appréciation. Cette estimation n'est jamais qu'une *opinion probable*, dont il n'est pas toujours possible de vérifier la pertinence. Ainsi, si un skieur suppose qu'il y a un risque pour une pente, il n'y passera pas et à moins de se soumettre à l'ordalie des montagnes, il ne saura pas s'il a tort ou raison. De même, l'expertise d'un site repose sur une analyse de la menace potentielle établie, entre autres, à par-

* Ce chapitre a été écrit par C. ANCEY et C. CHARLIER en collaboration avec O. MARCO.

tir de l'étude du site et de son histoire avalancheuse, dont la connaissance est forcément restreinte et floue. Cette analyse malheureusement lacunaire conduit parfois à mésestimer les effets d'avalanches exceptionnelles (avalanche au chalet de l'UCPA[1] à Val-d'Isère en février 1970 ou plus récemment l'avalanche d'Arinsal[2] en Andorre en février 1996). Dans ce cas, c'est la gravité du risque qui aura été mal évaluée.

❸ Après avoir montré la nuance entre danger et risque, il faut revenir sur la notion de danger. *Un phénomène constitue un danger dans la mesure où il constitue une menace (réelle ou imaginaire) pour des biens ou des personnes*, c'est-à-dire qu'il est susceptible de causer un *dommage*[3]. Le danger est donc la perception de l'aspect nuisible d'une chose ou d'un fait[4], qui existe indépendamment de tout observateur humain. Désignons ce fait sous le terme générique d'*aléa.*

❹ On a vu que le danger est la perception d'un aléa (comme potentialité de dommage) par un observateur; le risque est la perception du danger par ce même observateur. A chaque niveau de perception, on va introduire des erreurs, qui contribue à rendre subjective l'estimation finale.

1.2. Aspect subjectif de l'estimation : quelques exemples

Pour illustrer la subjectivité dans l'appréciation du risque d'avalanche, on met en relief, à travers une prévision faite par des skieurs, les nombreux problèmes intervenant dans les différentes étapes de cette procédure. L'analyse de la gestion spatiale du risque nécessiterait l'étude de la démarche intellectuelle suivie par l'expert, qui est encore plus complexe (voir [2]) ; nous n'en parlerons pas ici.

1.2.1. Élaboration du jugement

Par quels moyens procède-t-on exactement à l'évaluation du risque d'avalanches sur le terrain? Comme toute activité mentale, cette détermination se construit à différents niveaux à partir d'un raisonnement, de la perception, de l'intuition, etc. Chacun d'eux nécessite individuellement la mise en jeu d'autres activités mentales :

- *mémoire* : l'expérience alpine accumulée au fil des courses (*connaissance par expérience directe*) permet de retenir un grand nombre de faits, d'événements, de situations qui sont autant d'exemples qui servent à établir (*à induire*) une estimation du risque; un tel processus sous-tend également des capacités intellectuelles. Ce n'est donc pas une simple remémoration;
- *connaissances* : la connaissance théorique est la description d'objets ou de vérités qu'elle présuppose. On forge son opinion par *référence* à ses connaissances en nivologie, en météorologie, etc.;
- *raisonnement* : l'organisation des données (connues par expérience ou par description) nécessite un certain nombre de qualités intellectuelles qui permettent d'inférer le jugement final : sens de l'observation, du terrain, sens critique, capacité de rationalisation, esprit de décision, etc.;
- *intuition* : on entend par là le pressentiment d'un danger plus ou moins fondé et le sentiment ou la présomption inférée sur la base de données lacunaires voire contradictoires. L'intuition se développerait avec les connaissances;
- *dialogue* : dans le cas d'un groupe, la décision peut être le fruit d'un dialogue entre les membres. Les vertus relationnelles (sens du commandement, communication...) favorisent l'efficacité du dialogue.

1.2.2. Erreurs dans le jugement

L'évaluation du risque est une *opinion probable* déduite ou induite à partir des processus énumérés ci-dessus. L'erreur de jugement est toujours possible et est

1. Le 10 février 1970, une avalanche exceptionnelle s'abattit sur le chalet de l'UCPA à Val-d'Isère causant la mort de 39 personnes. 6 jours après, 72 personnes trouvèrent la mort dans un sanatorium au pied du plateau d'Assy; l'accident a été provoqué par une coulée de boue mêlée à de la neige.

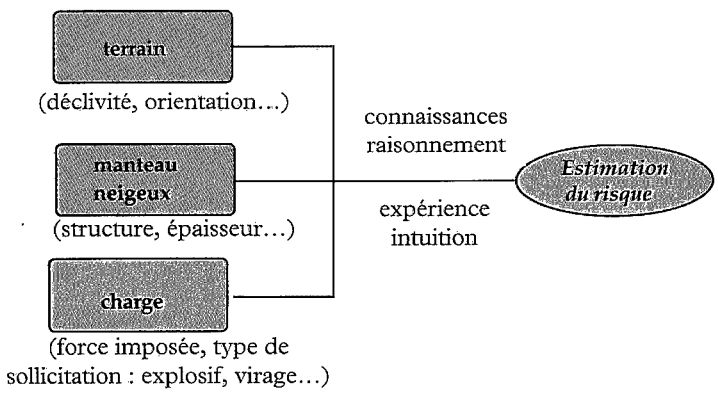
2. L'avalanche d'Arinsal a causé d'importants matériels, mais par une chance extraordinaire aucune victime; la station avait été évacuée à ce moment-là.

3. Voir aussi [1] sur les aspects socio-économiques et les différentes acceptions de *risque.*

4. Les philosophes parlent de *chose-en-soi.*

soumise aux influences diverses liées à la nature même de la neige ou à la psychologie de l'individu. Ainsi pour un skieur :

- les données ne sont pas toujours faciles à interpréter car la nivologie, qui explore les relations causales et résultantes entre des données concernant le manteau neigeux, n'est pas encore un système complet. Pour le skieur, les données se résument le plus souvent aux renseignements concernant la couche superficielle du manteau neigeux. Elles présentent une très grande variabilité temporelle et spatiale, et l'extrapolation d'une analyse locale même fine (par sondage) peut être ardue ;
- l'évaluation du risque nécessite du temps pour être réalisée, ce qui n'est pas toujours compatible avec la conduite de la course (lorsque l'on est pressé par le temps ou dans la griserie de la descente par exemple) ou ce qui impliquerait un nombre excessif d'examens du manteau pour établir un jugement global pertinent ;
- la charge imposée au manteau est difficile à prendre en compte : les actions d'un skieur isolé, d'un groupe de skieurs émérites ou débutants, le choix de la trace (directe, tournante), la manière de solliciter la neige (type de virages, cadence...), etc. sont des facteurs dont l'influence est prépondérante mais peu facile à évaluer ;
- le jugement peut être altéré par la fatigue et l'altitude, qui diminuent l'acuité sensorielle et l'aptitude intellectuelle. En outre, le comportement et la perception du risque dépendent de notre disposition intérieure, de notre appartenance socioculturelle [3] : en schématisant, le surfeur enclin au « fun » aura plus tendance à négliger le danger que le skieur de randonnée amoureux de montagnes ; de manière plus ou moins consciente, il accepte d'encourir des dangers (connus ou non) en échange du plaisir de la descente. De même, un skieur téméraire aura une perception tout autre qu'un individu prudent ou de nature inquiète ;
- l'information sur le terrain est surtout accessible visuellement, or la perception de "signes" dans un décor uniforme et blanc est non seulement malaisée (car l'information y est faible et diffuse) mais aussi trompeuse dans le sens où elle reste superficielle (en se limitant à la surface du manteau) et tend à extrapoler une situation globalement stationnaire [3] ;
- la persistance dans l'erreur est une forme aggravée d'erreur, qui a conduit à de graves accidents et qui consiste à nier une représentation correcte du risque. La volonté de dépassement, la peur de décevoir peuvent être à l'origine de cet entêtement mais aussi une propension fâcheuse chez certains à vouloir conformer le réel à leurs convictions. R. Mathieu donne ainsi l'exemple du randonneur se fourvoyant dans son itinéraire et qui continue à se fabriquer des preuves pour faire coller son opinion à la réalité [3].



➡ Figure 1.
L'appréciation du risque est la réponse à la question : la pente est-elle avalancheuse, à quel moment et pour quelle charge ? Elle est le résultat d'un processus cognitif et déductif complexe élaboré à partir de données plus ou moins lacunaires concernant à la fois le terrain, l'état du couvert neigeux et la sollicitation imposée.

1.3. La prévention et gestion du risque (spatial) d'avalanches sur un site

Lorsqu'un aménagement ou un équipement (station de ski, remontée mécanique, barrage hydroélectrique, pylône, route, etc.) est envisagé dans un massif ou sur un site avalancheux, une réflexion est entreprise dans le cadre des études préalables de faisabilité du projet pour estimer les risques auxquels il sera soumis, déterminer s'ils sont acceptables, et proposer un choix des meilleures solutions de protection. Un tel travail est une affaire de spécialistes et il est confié à un expert, qui va méthodiquement élaborer son diagnostic et ses conseils selon une démarche dont les principes et les étapes résultent, entre autres, d'une longue expérience et de ce que l'on nomme communément le "bon sens" du terrain, de la montagne et des dangers qu'elle présente pour les hommes qui la fréquentent (pour une introduction plus générale sur l'expertise dans le domaine des risques naturels, le lecteur peut consulter [4-6]).

1.3.1. Principes généraux de l'expertise

L'expérience a montré qu'il était facile, utile et même nécessaire de distinguer cinq grandes étapes dans cette démarche.

① ***Une étude locale du site :***

Trois analyses sont engagées simultanément à ce premier stade de l'expertise :

• (i) l'étude des critères physiques du site avalancheux : il s'agit de relever les éléments de nature physique dont l'influence peut être déterminante sur la formation et le déroulement du phénomène, d'en apprécier l'importance relative, et d'attribuer une valeur à leur implication dans le "fonctionnement" avalancheux du site étudié ;

• (ii) l'étude de ses conditions climatiques hivernales : le rôle et l'efficacité de ces différents paramètres sont ensuite étudiés par rapport au facteur le plus déterminant des avalanches : la nivologie locale. Car il faut tout de même de la neige pour produire des avalanches ! Les valeurs de force et direction du vent, la distribution et l'importance des précipitations neigeuses, les variations des différents paramètres de température doivent permettre, à condition de les étudier ensemble, de déterminer les critères nivo-météorologiques propices aux conditions avalancheuses critiques, c'est-à-dire, l'évolution des différentes causes d'instabilité du manteau neigeux en place, et/ou en cours de constitution. Le spécialiste des risques d'avalanches doit en particulier s'attacher à former le bon diagnostic sur les conditions nivologiques extrêmes qu'il faut envisager, et à fixer ainsi une limite supérieure à la grandeur des phénomènes qu'il faudra prendre en compte dans la suite de l'expertise ;

• (iii) enfin, l'études des avalanches historiques : en matière d'avalanche, et contrairement à la plupart des autres risques naturels, l'étude des événements anciens constitue l'une des principales sources d'information. C'est pourquoi la recherche des indices laissés sur le site étudié par les avalanches du passé reste une opération capitale. Ces indices sont marqués sur le terrain (dans la végétation principalement), mais aussi, sur la morphologie des cônes de déjection, par une ségrégation particulière des éboulis, par des traces repérables d'érosion ou de dégradation sur des équipements, etc. Ils sont constitués également par des témoignages des habitants de la région et des renseignements recueillis dans toutes sortes d'archives. Ce sont alors des énumérations de dégâts, des recherches d'explications, parfois des tentatives de descriptions du phénomène. Certaines sont quelquefois anciennes de plusieurs siècles et ne mentionnent même pas la notion d'avalanche...

L'analyse critique de ces indices (un travail de "détective" en quelque sorte) est intéressante à plusieurs titres :

- (i) une partie de cette recherche peut être effectuée indépendamment du projet d'aménagement initial : elle peut donc être systématisée ;
- (ii) portant sur des critères géographiques et topographiques, les renseignements collectés sont facilement cartographiables : cf. les cartes de localisation probables des avalanches (cf. § 1.3.2.) ;
- (iii) les avalanches dont on a gardé le souvenir avaient frappé leurs observateurs : elles étaient exceptionnelles. Ce sont justement celles contre lesquelles on cherche à se protéger ;
- (iv) par une extrapolation simple (non mathématique !), il est parfois possible de fixer un ordre de grandeur de la durée de retour de ces avalanches exceptionnelles ;
- (v) ces dernières constituent quelquefois une image du phénomène maximum à prendre en compte ("le petit âge glaciaire" dans les Alpes européennes) ;
- (vi) l'étude des avalanches exceptionnelles anciennes donne souvent la possibilité de mieux se représenter et de comprendre leur fonctionnement et leur dynamique dans le site.

Ces trois enquêtes consistent à rassembler les données de bases nécessaires à l'étape suivante, mais constituent déjà des expertises en elles-mêmes. Il y a intérêt à les mener conjointement car elles reposent évidemment en grande partie sur le résultat des observations de terrain à effectuer sur le site. Mais surtout les déductions, mêmes hypothétiques, obtenues de l'une, enrichissent les réflexions conduites sur les autres, et inversement. Si bien que chacune gagne à progresser en même temps que les deux autres.

② *La description de scénarios d'avalanches majeures :*

Connaissant le site et les conditions nivo-météorologiques hivernales extrêmes susceptibles de s'y produire, on "imagine" ensuite les avalanches capables de s'y déclencher. C'est l'étude des phénomènes avalancheux concevables dans le site : les causes et le déroulement de leur déclenchement, les types d'écoulement, leur dynamique, les modalités de l'étalement et de l'arrêt, etc. Il s'agit ici de déterminer *des scénarios d'avalanches majeures* du site. Concevoir des scénarios d'avalanche consiste concrètement à prévoir et à décrire la forme, la nature et les dimensions des avalanches potentielles, en se fixant des hypothèses sur l'emplacement de la ligne de rupture du manteau neigeux, sur les épaisseurs de neige mobilisée, sur les qualités de neige considérées, sur les surfaces concernées, etc. Cet effort de conception de scénarios d'avalanche est à conduire – compte tenu des éléments de connaissance dégagés, en première étape, sur l'ensemble des paramètres spécifiques du site déterminant la dynamique des phénomènes – simultanément sur les trois phases caractéristiques de l'écoulement d'avalanche, et à partir des trois points de vue portant sur :

- la localisation (les trajectoires, les emprises) ;
- la puissance (la nature et les caractéristiques des efforts développés) ;
- la probabilité d'occurrence (la période de retour).

Le résultat de cette réflexion se traduit sous la forme de plusieurs scénarios d'avalanche. Des conditions nivo-météorologiques locales, issues de régimes climatologiques totalement différents, expliquent souvent le nombre des scénarios.

③ *La détermination de l'avalanche majeure de référence :*

Jusqu'ici, l'étude n'a porté que sur le site et les avalanches pouvant s'y produire, sans prendre en compte la nature de l'aménagement ou de l'équipement à protéger. L'expert a mené "une étude d'avalanches" ; il s'agit maintenant d'entre-

prendre l'étude du danger d'avalanche, car la notion de danger ne possède de sens que par rapport à un objet menacé : une avalanche parcourant le fond d'une vallée déserte n'est pas dangereuse ! Inversement, pour un équipement déterminé, situé à un endroit défini d'une zone avalancheuse, on ne considérera pas systématiquement toutes les avalanches susceptibles de se produire dans la zone, mais seulement celles dont l'extension ou un comportement "inhabituel" peut représenter un danger pour sa pérennité ou sa sécurité. Enfin, il est évident que face à une même avalanche, on n'entreprendra pas les mêmes ouvrages de protection si l'équipement à protéger est un hôpital ou un pylône électrique, une route internationale très fréquentée ou une piste de ski. Il faudra sans doute empêcher l'avalanche de partir ou d'atteindre l'hôpital, tandis que pour le pylône on pourra se contenter, selon la durée de retour, de ne rien faire et de prendre le risque d'avoir à le réparer. De même, la sécurité de la route nationale sera sans doute assurée par une galerie, alors que celle de la piste se fera soit par sa fermeture en période critique, soit par un déclenchement artificiel préventif. On voit ainsi se dessiner le type de réflexions et d'interrogations que l'expert doit résoudre à cette étape de son travail. Là réside sans doute un véritable travail d'expert : conseiller clairement le décideur pour fixer définitivement le scénario (ou exceptionnellement les deux scénarios) de l'avalanche majeure qui lui servira de référence dans toute la suite de son raisonnement. Et là se trouve en fait, le plus souvent, l'explication d'une bonne ou d'une mauvaise expertise. Cette étape constitue la partie fondamentale de l'expertise en génie paravalanche. A ce stade de la démarche, il est absolument indispensable de lever, entre tous les acteurs de la décision finale, toutes les ambiguïtés du problème posé, d'épuiser en particulier le débat sur les notions fondamentales d'avalanche de référence, de risque acceptable et de responsabilité, et d'obtenir un consensus général avant de passer à la recherche d'une méthode de protection [7].

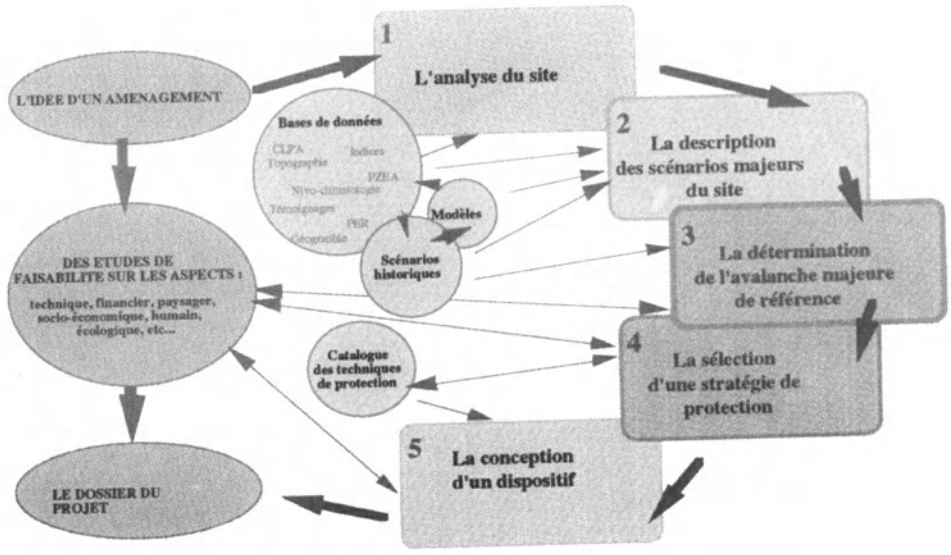
④ ***La sélection d'une stratégie paravalanche :***

L'avalanche de référence retenue, et compte tenu de la nature et de la vulnérabilité de l'équipement à protéger, le spécialiste propose ensuite une stratégie paravalanche. La réponse au problème posé peut être recherchée selon des philosophies différentes : on pourra soit tenter de supprimer l'avalanche définitivement, soit la laisser se produire naturellement mais déplacer les équipements en dehors de son emprise, ou les adapter de manière qu'ils résistent aux poussées de l'avalanche sans dégâts pour eux et sans danger pour leurs utilisateurs, soit encore chercher à modifier l'ampleur de l'avalanche, sa trajectoire, sa limite d'arrêt, sa fréquence, etc., ou la provoquer à titre préventif. Ce choix de stratégie de protection s'effectue par tâtonnements et par des allers et retours entre les différents acteurs de la réalisation du projet. En effet, il arrive souvent qu'à l'étape suivante, ne trouvant pas une solution technique satisfaisant l'ensemble des responsables, on soit obligé de changer de stratégie.

⑤ ***La conception du dispositif technique de protection :***

Le mode de lutte étant arrêté, il faut sélectionner dans le catalogue des techniques de protection disponibles, celle, ou plus souvent, l'assortiment de celles qui, compatibles et cohérentes avec tous les autres critères de faisabilité du projet, vont constituer la solution de protection préconisée par l'expert (voir chapitre 8).

Dans sa démarche, outre son expérience, l'expert dispose d'un certain nombre de données et d'outils qui peuvent l'aider dans son diagnostic : diverses cartographies, des outils de modélisation, mais également des fichiers de données d'enquête (enquête permanente des avalanches : EPA, observation permanente sur les avalanches : OPA), études climatologiques, recherches historiques (archives des registres cadastraux, paroissiaux, administratifs...).



➡ Figure 2. Schéma de synthèse : principe d'une expertise sur le risque d'avalanche. Lors des analyses de la faisabilité d'un projet d'aménagement, l'étude sécuritaire vise entre autres à examiner la possibilité d'un accident dû aux avalanches. Ce travail est confié à un expert qui dispose d'une panoplie de méthodes et d'outils pour établir son diagnostic et proposer des solutions.

1.3.2. Utilisation des données

On retrouve les données relatives aux avalanches sous différents types de support.

• Cartographie : Il en existe différents types : la *carte de localisation probable des avalanches* (CLPA)[5] en est le plus connu. Cette série de cartes est un moyen de représentation efficace pour saisir rapidement l'ensemble des secteurs exposés aux avalanches d'une région. C'est à la suite de la catastrophe de Val-d'Isère qu'une commission interministérielle a recommandé l'établissement d'un tel document [8]. La réalisation de la CLPA fut ainsi mise en œuvre par la division Nivologie du Cemagref en liaison avec l'IGN[6] et avec les services RTM[7] [9]. En 1998, le programme de mise à jour de ce document[8] est réalisé presque entièrement. Ces documents sont disponibles à la consultation dans les services départementaux, les mairies, les services de pistes et chez certains professionnels. Ils ne sont pas en vente dans le commerce. La CLPA représente sur un fond de carte les secteurs concernés par une activité avalancheuse probable (enveloppe de l'emprise extrême des avalanches passées). Elle donne donc un renseignement brut sans tenir compte de l'occurrence et du degré de gravité du phénomène. Les données sont obtenues à partir d'une photo-interprétation de photographies aériennes d'été (recherche d'indices et de traces de dégâts) et d'une enquête de terrain (témoignages oraux et archives). La CLPA permet aussi de recenser les ouvrages de protection déjà construits. C'est un document technique lié à l'aménagement, réservés à l'usage des professionnels, et qui n'est donc pas adapté aux besoins des skieurs.

• Fichier : l'*enquête permanente sur les avalanches* (EPA) et l'*observation permanente des avalanches* (OPA) sont des fichiers informatisés d'information sur les avalanches. Depuis près d'un siècle, l'EPA recueille sur environ 5 000 sites en France les principales données (météorologie, dimensions…) concernant les avalanches. Depuis 1972, l'OPA est une procédure visant à collecter toutes les informations avalancheuses concernant une zone sensible, où en général un projet d'aménagement est en cours. Ce dernier fichier n'est plus enrichi aujourd'hui.

5. Il faut également signaler qu'il existe d'autres types de cartes qui sont utilisées lorsqu'une étude plus complète est nécessaire : ce sont entre autres les *plans des zones exposées aux avalanches* (PZEA), les *plans d'exposition aux risques* (PER), et les *plans de prévention des risques* (PPR) qui sont établis à partir d'une analyse d'expertise en tenant compte de la fréquence et de l'intensité des phénomènes. Ils sont accompagnés de livrets explicatifs du zonage et des prescriptions pour améliorer la sécurité des secteurs aménagés. L'échelle de ces plans de zonage des risques est au 1/1 000 ou 1/5 000. Voir le chapitre 8.

6. IGN : Institut Géographique National

7. RTM : Restauration des Terrains en Montagne

8. Il couvrait plus de 700 000 hectares des zones montagneuses françaises en 82 cartes dressées à une échelle du 1/20 000 ou du 1/25 000 pour les plus récentes.

• Archives : de nombreux renseignements sur des avalanches catastrophiques survenues dans le passé, dont l'analyse reste primordiale pour les études de risques, existent entre autres dans les archives (nationales, départementales, paroissiales, fiscales...) et les monographies régionales et locales.

1.3.3. Utilisation de modèles

Les modèles sont des outils d'analyse permettant de rendre compte des phénomènes naturels. Pour caractériser quantitativement un écoulement, il existe plusieurs procédés :

• les *modèles numériques* sont des outils puissants, qui simulent l'écoulement avalancheux. Ce sont en général des logiciels basés sur la résolution d'équations du mouvement à partir d'une loi de comportement de la neige, d'un *modèle numérique de terrain* (MNT ou carte numérisée) et des conditions nivologiques : ils sont donc capables d'estimer les vitesses et les hauteurs d'écoulement ainsi que l'emprise d'une avalanche. Le modèle le plus célèbre et parmi les plus anciens est dû à Vœllmy au début des années cinquante, il est encore couramment utilisé en génie paravalanche (sous des formes dérivées mais basées sur le même principe). Des modélisations plus sophistiquées d'avalanches coulantes ou en aérosol sont en cours de validation [10-14]. Les recherches actuelles butent essentiellement sur la détermination de la (les) loi(s) de comportement de la neige en mouvement [10] ;

• les *modèles statistiques* sont des méthodes de prédiction des distance d'arrêt des avalanches, qui sont fondées sur des règles statistiques [15-17] ;

• les *systèmes symboliques* sont des logiciels qui proposent une évaluation du risque en adoptant le raisonnement déductif d'un expert. Ils sont construits à partir d'une base de connaissances et de règles de raisonnement (moteur d'inférence) qui gèrent cette base en fonction des informations transmises par l'utilisateur [18-20] ;

• les *modèles réduits* sont des simulations d'écoulement sur des maquettes (en général en laboratoire). On distingue les modèles analogiques des modèles en similitude physique. Un *modèle analogique* consiste à simuler un phénomène en créant des écoulements qui ressemblent aux écoulements naturels. Par exemple, on peut simuler une avalanche en aérosol par l'écoulement d'une quantité de matière solide (comme de l'argile) dans une cuve d'eau [21] : un nuage de poussière se développe et progresse en rappelant fortement un aérosol. Un modèle est dit en *similitude physique* avec un écoulement naturel, lorsqu'on peut garantir que, malgré la réduction d'échelle, le comportement mécanique est identique. Il existe encore de nombreux problèmes théoriques pour faire le lien entre avalanches naturelles et celles simulées en laboratoire.

➠ Tous ces modèles sont limités dans la qualité (vraisemblance, étendue et type des résultats) et la précision de leurs résultats. Récemment, des modèles hybrides ont été développés pour pallier les insuffisances des premiers logiciels. Ainsi, NX-LOG développé à l'IFENA (Institut fédéral d'Étude de la Neige et des Avalanches) couple à la fois un modèle à base de connaissances (déductif) et un modèle par analogie [22], tandis qu'ELSA, élaboré au Cemagref, est un système à base de connaissances reliable à des modèles numériques. Le but visé par chacun des deux prototypes est sensiblement différent puisque le premier donne un diagnostic du risque sur un site (comme une station de ski) pour un contexte météorologique donné, alors que le second est plus particulièrement axé sur la modélisation de la mise en mouvement de la neige dans la zone d'accumulation et de l'écoulement (pour un scénario donné). Certains modèles fonctionnent aussi bien pour l'analyse spatiale du risque d'avalanches que pour la prévision.

1.4. La prévision du risque (temporel) d'avalanches sur un massif*

En France[9], la prévision du risque d'avalanches se fait à plusieurs niveaux :

• à l'échelle nationale, les services de Météo-France en sont responsables et ils proposent au public un *bulletin d'estimation du risque d'avalanches* (BRA) de la mi-décembre au début du mois de mai. Son principe est précisé dans le chapitre suivant;

• à un niveau local, certains services (comme dans les stations de ski) ont besoin de prévoir de manière plus fine et quotidiennement le risque d'avalanches sur leur domaine : par exemple, c'est le travail réalisé par le réseau "Prévision locale du risque d'avalanche" (PRELA) entre les 4 grandes stations de Tarentaise (Tignes, Val-d'Isère, les Arcs, La Plagne) et le CEN [24, 25]. On peut également citer le développement de modèles statistiques à base de connaissance, qui permettent d'établir un diagnostic à partir de la connaissances des événements nivo-météorologiques passés sur un site donné. Citons notamment : Avalog et NX-LOG [18, 22, 26-28] ainsi qu'Astral [29] (voir chapitre 7);

• au niveau individuel, on peut procéder à une estimation à partir des connaissances nivo-météorologiques; certaines méthodes peuvent également aider au diagnostic (voir § 2 et ch. 10).

1.4.1. Principe de réalisation du BRA

Ce bulletin donne des indications sur l'état du manteau neigeux en fonction de l'altitude, de l'exposition, du relief et propose une estimation du risque d'avalanche à l'échelle d'un même massif montagneux (cf. aussi chapitre 8). Pour chaque massif, il est élaboré par le centre départemental de Météo-France en liaison avec le Centre d'Études de la Neige et les "point focaux" de Saint-Martin-d'Hères (pour les Alpes et la Corse) et de Tarbes (pour les Pyrénées) [30-32].

➠ La réalisation d'un BRA tient compte de l'observation biquotidienne des 140 postes d'observation nivo-météorologique (en 1994) et des données complémentaires fournies par des stations automatiques. Hebdomadairement sont réalisés des sondages par battage par chaque poste. Les informations sont ensuite transmises à chacun des centres départementaux concernés (Chamonix, Bourg-Saint-Maurice, Saint-Martin-d'Hères, Briançon, Nice, Perpignan, Toulouse, Tarbes, Ajaccio). Le CEN centralise toutes ces données pour constituer une base de données nivo-météorologiques et coordonne la prévision du risque d'avalanche (PRA); les deux points focaux (Grenoble et Tarbes) sont, entre autres, les intermédiaires privilégiés avec les média lors des périodes de crise. Parallèlement à cette structure se sont développés localement des centres de prévision du risque d'avalanche dépendant du service des pistes de certaines stations de ski (comme La Plagne, Tignes, Val-d'Isère, l'Alpe-d'Huez...) qui permettent d'adapter et de diffuser une information plus précise de l'état du couvert neigeux en dehors des pistes balisées de leur domaine [30, 31].

1.4.2. Informations du BRA

Le bulletin Avalanche donne une information synthétique valable à l'échelle d'un massif en indiquant les conditions météorologiques, la structure du manteau neigeux et son évolution probable. Afin de résumer la situation, une échelle du risque est proposée; elle comporte cinq niveaux ordonnés suivant l'importance du risque : faible (1), limité (2), marqué (3), fort (4), très fort (5). Cette échelle est depuis l'hiver 1993/94 utilisée sur l'ensemble du continent européen et remplace en France l'ancienne échelle comportant huit niveaux.

1.4.3. Perpectives dans l'élaboration du BRA

Après l'informatisation des moyens d'acquisition, de traitement et de diffusion de l'information, Météo-France a commencé à développer des outils per-

* Cette section est reprise en détail dans le chapitre suivant.

9. Pour la Suisse, voir [23].

formants de modélisation numérique du manteau neigeux pour la prévision du risque d'avalanches. A l'heure actuelle, les modèles comme *Safran, Crocus et Mepra* sont en cours de validation et constitueront dans un avenir proche une aide précieuse pour le prévisionniste [34].

1.5. Les moyens d'investigation sur le terrain

Il existe un certain nombre de techniques pour mesurer *in situ* les propriétés d'un manteau neigeux et les intégrer dans une estimation d'un risque d'avalanche. Ces techniques nécessitent le plus souvent des mesures et une interprétation des données ; elles ne se prêtent donc guère à une utilisation pratique par les skieurs, exception faite des essais de glissement (le prochain paragraphe traitera plus particulièrement cette question). Dans ce paragraphe, seront abordées les techniques fondées sur :

- les profils de battage ;
- les mesures de cisaillement ;
- les essais de glissement (coin suisse, bloc norvégien) ;
- les tests (emploi d'explosifs).

1.5.1. Sondages stratigraphique et par battage

Au chapitre 4, nous avons vu comment l'analyse du sondage par battage permet de se faire une idée du manteau neigeux ; leur interprétation peut, en outre, servir à évaluer la stabilité du manteau neigeux par exemple dans le cadre du BRA. Cette analyse repose sur la recherche des couches particulières (couche de faible cohésion, croûte de regel...) et l'examen des grains de neige. Sur le terrain, une analyse stratigraphique est un moyen pratique d'examen de la structure du couvert neigeux en individualisant les différentes strates (dureté, type de grain, humidité). Si dans bien des cas ce sondage aide à établir un diagnostic, son analyse peut se révéler subjective dans les cas critiques (chutes de neige récentes, détection des couches fragiles minces par exemple) et dans tous les cas nécessite une solide expérience.

1.5.2. Le cadre de cisaillement ; scissomètre ; indice de stabilité

La mesure de la résistance au cisaillement se fait à l'aide d'instruments spécifiques : le *cadre de cisaillement* et le *scissomètre.* Le scissomètre est le plus utilisé en France (voir chapitre 4) : il consiste à mesurer le couple exercé par la neige sur une tige munie de quatre ailettes (en général). D'emploi rapide et simple, il est particulièrement adapté à la mesure de la résistance au cisaillement au sein d'une couche homogène d'épaisseur suffisante (plusieurs centimètres) [26, 35, 36]. Lorsque l'épaisseur de la couche est faible (de l'ordre du cm ou du mm), il est nécessaire d'utiliser un cadre de cisaillement : cet appareil est généralement composé d'un cadre rigide muni de peignes [37-43]. De plus contrairement au scissomètre, une surcharge normale peut être appliquée (manuellement). Pour les deux appareils, on mesure la force ou le couple provoquant la rupture de l'échantillon et on en déduit la contrainte maximale, appelée *résistance au cisaillement.*

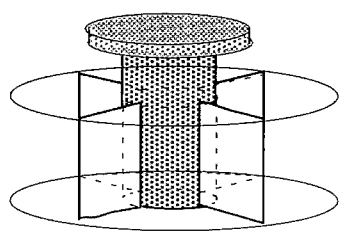


Figure 3 : scissomètre.
La rotation des pales de l'arbre crée une surface de cisaillement de forme cylindrique. On mesure le couple de frottement exercé par l'échantillon à la rupture pour déduire la résistance au cisaillement.

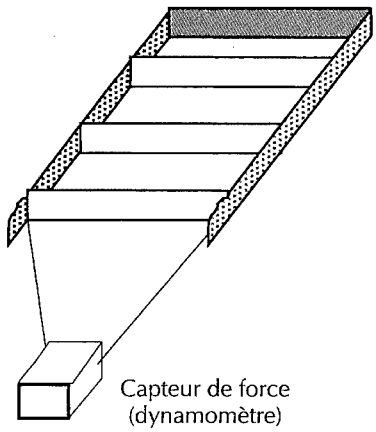


Figure 4 : le cadre de cisaillement est composé d'un cadre rigide maintenant des peignes. On tire, tout en mesurant la force nécessaire à l'aide d'un dynamomètre, sur le cadre placé le long de la couche dont on souhaite étudier les propriétés. On peut mesurer la force de rupture pour différente charge normale ; pour cela il suffit de placer différentes charges de neige dans les espaces entre les peignes. La surface de cisaillement est généralement comprise entre 100 et 500 cm².

On peut à partir de la valeur de la résistance au cisaillement calculer un indice de stabilité, dont la définition varie selon les auteurs [37-42]. Généralement, on définit cet indice comme le rapport de la charge normale (exercée sur la couche) sur sa résistance au cisaillement. Lorsque l'indice dépasse une valeur critique (qui dépend des auteurs, voir pour une synthèse [42]), on peut suspecter l'instabilité de la couche.

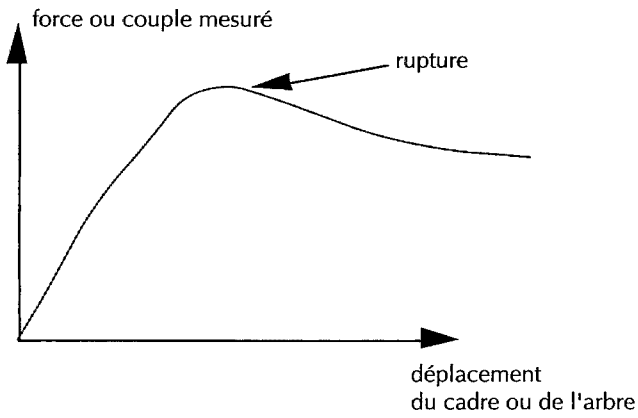


Figure 5 : la détermination de la résistance au cisaillement se fait en mesurant la force (ou le couple) à la rupture. Généralement, la rupture se traduit dans un diagramme force-déplacement (ou couple-rotation) du cadre par l'existence d'un maximum. Le passage de la valeur de la force maximale à la valeur de la résistance fait généralement appel à des facteurs de correction, qui varient selon les auteurs.

1.5.3. Les essais de glissement : coin suisse et bloc norvégien

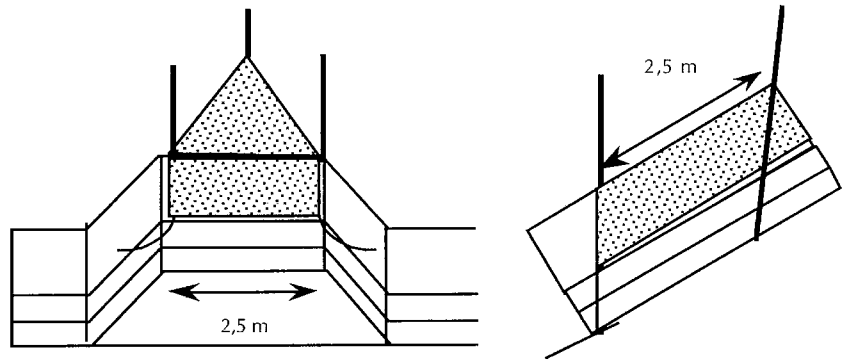
Les essais de glissement sont des méthodes qui, à partir d'un essai de glissement d'un bloc de neige prédécoupé puis mis sous charge, permettent d'arriver à estimer un degré de risque. En France, selon un usage d'origine obscure, il est devenu habituel de distinguer, selon la forme du bloc, le coin suisse et le bloc norvégien :

- le *coin suisse* est une méthode d'évaluation du risque testée par l'armée suisse, puis popularisée entre autres par le guide W. Munter qui l'a largement éprouvée [44-47]. Le bloc prédécoupé a la forme d'un triangle équilatéral de surface 3 m² ;
- le *bloc norvégien* est une variante de la méthode précédente. La seule différence réside dans la réalisation d'un bloc au lieu d'un prisme. La surface de base est toujours de 3 m².

La première étape consiste à choisir le lieu du test, qui doit être représentatif de la pente que l'on souhaite traverser, c'est-à-dire qu'il faut respecter l'orientation et l'altitude. Il est toujours possible d'extrapoler le résultat si les inclinaisons ne sont pas identiques ; cependant, il est vivement recommandé d'effectuer l'essai sur des pentes de déclivité supérieure à 30°. En outre, pour des raisons évidentes de sécurité, il faut faire le test dans un endroit non exposé : lieu isolé ou protégé, haut de pente... La seconde étape est classique et identique pour les

deux méthodes énoncées : on creuse une tranchée verticalement jusqu'au sol sur environ 3 mètres de long ; si l'on est pressé par le temps, on se limitera à une hauteur approximativement égale à 1,50 m. A partir de là, on peut effectuer un profil stratigraphique. Dans un troisième temps, si l'on souhaite faire un coin suisse, on délimite un triangle isocèle de base et de hauteur égales (toutes deux) à 2,5 m de telle sorte que sa surface soit égale à 3 m^2. Dans le cas d'un bloc norvégien, la surface à découper est de forme rectangulaire ou légèrement trapézoïdale ; l'aire est toujours de 3 m^2 (voir Fig. 7). Ces mesures doivent être *scrupuleusement* respectées car l'essai est normalisé pour que l'on puisse comparer les tests entre eux.

Pour un coin suisse, au niveau de la tranchée, on plante deux sondes à avalanche le plus profondément possible en les espaçant de 2,5 m : ces deux piquets forment la base du coin. On la divise en deux parties égales et on enfonce une troisième sonde 2,5 m plus haut qui sera le sommet du coin. On prendra soin de la pencher vers l'amont pour faciliter la pénétration de la corde dans le manteau. D'autres types de découpe sont possibles et plus rapides. Pour le bloc norvégien, l'étape de découpe est bien plus courte et ne nécessite qu'un seul opérateur (voir 2.1.2.).



➟ Figure 6. Dimensions d'un coin suisse. D'après [45].

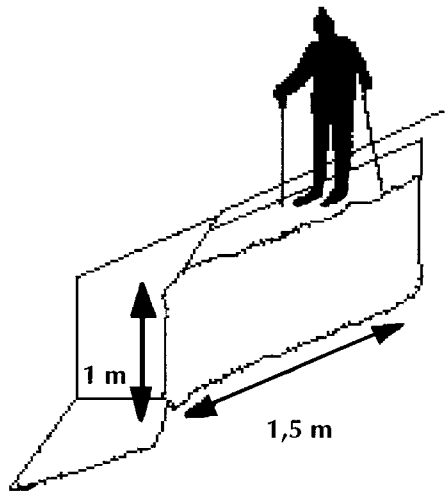


Figure 7.
Bloc norvégien.
D'après [48].

Ensuite, on isole le coin ou le bloc du reste du manteau en sciant à l'aide d'une cordelette (10 m de long, 3 mm de diamètre suffisent). Il faut bien prendre garde à élargir progressivement la base du coin afin d'éviter tout coincement du prisme sur ses flancs. A la fin de l'opération, le coin n'est plus relié au manteau que par sa surface inférieure et il ne tient en équilibre que grâce aux frottements entre couches. La dernière étape consiste à charger le coin. Un opérateur remonte, skis aux pieds, en prenant soin de ne pas effleurer le prisme, pénètre délicatement :

– pour le coin suisse, à hauteur du centre de gravité, c'est-à-dire à environ 80 cm de la base ;
– pour le bloc norvégien aux 2/3 de la hauteur, c'est-à-dire à environ 1 m de la base.

Si les skis dépassent de part et d'autre du coin (ou du bloc), cela n'a pas d'importance pour la suite des opérations. Le skieur charge progressivement le prisme en effectuant des flexions puis des sauts (4 fois de suite). On a alors une évaluation de la probabilité de déclenchement comportant sept indices.

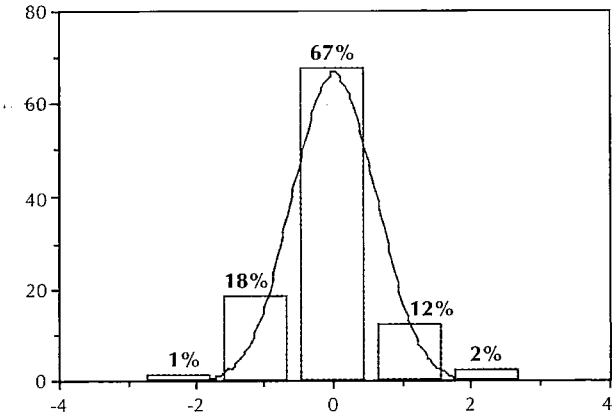
Degré de charge	Déclenchement	Conclusion
a : spontané	lors du sciage	ne pas traverser
b : charge partielle	lors de la mise en place du skieur	ne pas traverser
c : charge totale	lorsque le skieur est en place	ne pas traverser
d : flexion	lors de flexions énergiques	à éviter
e : saut	lors de petits sauts	prendre des précautions
f : saut depuis le haut	lors de sauts (à pied) depuis le haut	solide
g : pas de rupture	rien ne se passe	très sûr

➠ Pour les risques moyens et forts (d et e), une subdivision peut être employée pour une évaluation plus fine (mais dans la majorité des cas, l'incertitude liée à la mesure du risque rend illusoire une telle précision) : par exemple un risque indexé d.2 indique qu'il a fallu 2 flexions pour aboutir à la rupture du coin glissant.

Les trois premiers niveaux correspondent à un manteau instable qu'il ne faut pas traverser. Les indices *d* et *e* correspondent à une situation critique : pour le niveau *d*, le parcours d'une pente ne doit se faire que s'il n'existe pas d'autres échappatoires possibles et moyennant d'importantes mesures de sécurité ; le niveau *e* est représentatif d'un manteau suspect et nécessite des précautions (choix de l'itinéraire, distance de délestage...) car le risque accidentel est encore élevé. Le niveau *f* et *g* indiquent un manteau stable à très stable dont le parcours ne doit *a priori* présenter que très peu de risque.

Précisions et limites des essais de glissement

Les essais de glissement sont des tests dynamiques qui permettent de proposer un indice de stabilité du manteau neigeux soumis à une charge et de déceler les surfaces de glissement potentielles. L'opérateur, durant la mise en charge du coin ou du bloc, joue à la fois sur l'intensité de la sollicitation transmise au manteau neigeux et sur la vitesse de déformation imposée, car la résistance est plus vite atteinte pour des charges et des vitesses de déformations importantes. A cet égard, comparé à une flexion, un saut à skis provoque à la fois une charge plus élevée mais surtout une déformation brusque du manteau. Étant donné la variabilité des caractéristiques du manteau neigeux sur une même pente, on peut se demander si un seul test est suffisant à estimer le degré de stabilité sur une pente. Pour y répondre, les canadiens Jamieson et Johnston ont réalisé 6 séries d'expériences (267 tests en tout) sur des pentes uniformes et ont recherché la distribution des indices obtenus autour de la valeur médiane de chaque série. Comme l'indique la figure 8, il y a 67 % de chances que l'indice d'un test coïncide avec la valeur médiane de la série et 97 % de chances qu'il soit compris dans un intervalle [-1,+1] autour de cette valeur médiane. De tels chiffres cautionnent la pertinence de la méthode pour le randonneur, mais soulignent également l'utilité de méthodes annexes d'analyse, en tout cas d'une réflexion poussée.



➡ Figure 8.
Distribution moyenne des déviations observées des indices d'une série autour de la valeur moyenne. L'histogramme indique les valeurs expérimentales et la courbe en trait continu la loi de Gauss associée.

Pour être fiable, cette relation ne doit pas s'appuyer sur un seul test mais au moins sur une dizaine d'essais distribués sur toutes les expositions (pour une altitude et une déclivité sensiblement égales pour chacun d'eux). Par ailleurs, l'utilisation de l'échelle subdivisée permettrait de peaufiner encore cette évaluation de l'activité avalancheuse probable lors de risques accidentels :

Degré du coin	Désignation abrégée	Situation avalancheuse
3-4 sauts sur place	**d.3, d.4**	pente de stabilité suffisante
1-2 sauts sur place	**d.1, d.2**	pente de stabilité moyenne
3-4 flexions sur place	**e.3, e.4**	pente de faible stabilité
1-2 flexions sur place	**e.1, e.2**	pente à la limite de stabilité

Les essais de glissement ne permettent pas déceler de manière systématique un risque d'avalanche, entre autres car :

- son efficacité est moindre pour des neiges humides, pour lesquelles le glissement entre strates n'est pas nécessairement le mécanisme prépondérant de déclenchement;
- si les skis de l'opérateur s'approchent trop de la surface potentielle de rupture (moins de 5 cm) durant la mise en charge du bloc, le test n'est pas concluant;
- les surfaces de rupture sous-jacentes à des couches de faible charge (moins de 0,4 kPa) ne peuvent être testées de manière fiable par un essai de bloc glissant. Il faut donc une épaisseur minimale (e) de déclenchement pour que l'essai soit pertinent : on doit avoir $\rho e \geq 40$ kg/m^2 avec ρ masse volumique de la couche déclenchée; soit avec une masse volumique de 100 kg/m^3, il faut que $e \geq 40$ cm tandis que pour une neige de 200 kg/m^3, il faut que $e \geq 20$ cm ;
- les essais de bloc glissant font la part belle au glissement[10] (donc à la résistance au cisaillement entre strates) comme mécanisme du déclenchement des avalanches, ce n'est pas une règle générale (voir ch. 5).
- la procédure de mise en charge du 6° degré (saut à pied) n'est pas adaptée, car dans le cas de neige pulvérulente, les chaussures pénètrent trop profondément. Jamieson propose de se placer skis aux pieds à 35 cm du bord amont du bloc et de sauter sur place pour causer un incrément de charge suffisant par rapport au degré 5 [46].

Un autre problème est de savoir s'il est possible d'extrapoler à d'autres déclivités les résultats d'un essai de glissement effectué pour une pente donnée. Une telle extrapolation doit être conduite avec prudence : l'influence d'un changement d'exposition, d'altitude, de déclivité ou encore de configuration de terrain n'est pas facile à déterminer. Néanmoins, il est admis que l'indice de risque diminue d'un degré par tranche de 5° (selon [45]) à 10° (selon [46]) supplémentaire de

10. Comme les méthodes de glissement donnent en principe accès à la mesure d'une résistance au cisaillement, un parallèle peut être tracé avec les essais de cisaillement. Voir Jamieson ([42], p 107) pour une comparaison entre indice de stabilité, essai de glissement et sondage stratigraphique (test manuel).

déclivité. Ainsi, un risque évalué à e.2 pour une pente de 30° passe à d.2 pour une pente de 35° (ou 40°) et f pour une pente de 25° (ou 20°).

1.5.4. L'emploi d'explosifs

Les explosifs (comme le sofranex) sont de manière générale utilisés pour des applications bien spécifiques et réglementées (sécurité des pistes, PIDA[11]...) et surtout à titre de prévention [49-51]. Néanmoins, ils peuvent constituer un moyen d'estimer à distance la stabilité d'une pente : par exemple, l'explosion de 5 kg de sofranex (située à 2 m au-dessus de la neige) provoquant une surpression d'au moins 25 mB pour un rayon d'action d'environ 30 m ébranle fortement le manteau neigeux. Si un tir positif témoigne *a posteriori* du danger existant, un tir négatif n'écarte en revanche pas l'existence d'un risque, soit parce que le tir a contribué à déstabiliser le manteau sans pourtant avoir réussi à l'amener à la rupture, soit parce que la charge a été insuffisante ou de peu d'efficacité (trop près de la surface neigeuse, faible zone d'action) soit encore parce que la neige est trop humide (l'explosif n'a alors quasiment aucun effet).

2. Diagnostic du risque : aide à la décision sur le terrain

Il est agréable pour le skieur ou le randonneur de disposer de méthodes d'évaluation du risque local d'avalanches, qui soient faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent pas d'instrumentation particulière ni d'interprétation trop complexe (pas de calculs !). Le gain en simplicité et en souplesse se traduit, en contrepartie, par une diminution de la qualité de l'information et surtout nécessite une certaine pratique de la part de l'utilisateur. On renvoie également le lecteur au chapitre 10.

2.1. L'examen du manteau : principes

2.1.1. Les moyens

Le skieur a trois méthodes différentes à sa disposition pour évaluer le risque d'avalanches sur le terrain.

- Le profil stratigraphique permet d'appréhender la structure du manteau neigeux (cf. ch. 4). Le temps de réalisation d'une fosse varie selon la neige rencontrée ; une dizaine de minutes pour effectuer un profil est une valeur indicative. Cette méthode est très simple et ne nécessite qu'un seul opérateur, mais outre le fait qu'elle est statique (elle ne permet pas de quantifier la charge supportable par le manteau neigeux), elle réclame de l'expérience lors de l'interprétation du profil en termes de stabilité. Néanmoins quelques configurations doivent retenir l'attention du skieur lors de ces essais et on les examine dans les sections suivantes.
- L'essai de glissement (coin suisse ou bloc norvégien) permet de répondre quantitativement : « Sous quelle charge le manteau neigeux est-il stable ? ». Il s'agit d'un test dynamique. Le temps de réalisation varie, selon les types de neige rencontrés, entre 10 et 30 minutes avec deux opérateurs, ce qui peut sembler rédhibitoire à la plupart des pratiquants. Des variantes ont été proposées pour pallier cet inconvénient.
- Le *test de la pelle* permet de déterminer la surface de glissement potentiel au sein du manteau neigeux (voir chapitre 4, § 4.2.7.). C'est un moyen rapide mais sommaire, très en vogue en Amérique du Nord. Il en existe plusieurs variantes.

2.1.2. Variantes des blocs de glissement

Les canadiens Jamieson et Johnston ont recherché et testé des variantes des essais de glissement pour les rendre plus pratiques et faciles à réaliser [42-46]. La première étape, commune à toutes ces variantes consiste à creuser à la pelle

11. Plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches : c'est un document officiel établissant les procédures à respecter lors d'un déclenchement artificiel. Y sont indiquées les zones d'extension des avalanches, la mise en œuvre des explosifs (charge, lieu, acheminement, consignes de tir) et les personnes impliquées dans sa réalisation. Voir aussi chapitre 8.

une tranchée d'environ 1,5 m de profondeur et de 2,5 mètres de long. L'étape suivante consiste à découper le bloc à l'aide de skis, d'une pelle (1,3 m de long, 3 mm d'épaisseur), d'une scie ou d'une cordelette (8 mètres, diamètre en 4 et 6 mm, nouée tous les 30 cm). L'utilisation de la corde nécessite deux opérateurs. La forme du bloc doit être légèrement trapézoïdale afin de faciliter le glissement (sinon de la neige peut tomber dans les interstices latéraux et freiner le mouvement du bloc) : base aval de 2,1 m de longueur, base amont de 1,9 m de longueur, hauteur du trapèze égale à 1,5 m. La dernière étape consiste à charger graduellement le bloc, comme il est indiqué au § 1.5.3. Attention, pour être efficace, le skieur doit se positionner tout en haut du bloc lors de la mise en charge (voir Fig. 7). Pour la dernière étape, il peut être avantageux de remplacer le saut à pied par un saut à skis (le skieur est à 35 cm de l'arête amont du bloc).

C'est la deuxième étape qui est prépondérante dans le temps de réalisation comme l'indique le tableau suivant (temps indicatif de réalisation d'un essai complet avec deux opérateurs entraînés) [42-46] :

Outils utilisés pour :			Temps
Mur aval	Côtés	Mur amont	Moyen requis (mn)
pelle	pelle	corde/ski	10
pelle	corde	corde	9
pelle	ski	ski	5
pelle	scie	scie	5

La scie donne les meilleurs temps, mais son emploi impose de transporter un outil lourd (au moins 1,2 kg) et encombrant. L'utilisation du talon des skis offre un bon compromis, mais la profondeur du bloc est limitée par les fixations dès que la neige présente une certaine cohésion (une soixantaine de centimètres).

2.2. Les questions que vous vous posez

• *Quelle confiance accorder à l'indice donné par un seul essai ?*

Une étude statistique montre que même sur une pente à peu près uniforme, le résultat du bloc glissant est variable, toutefois cette variation est limitée autour d'une valeur médiane : ainsi, il y a 67 % de chances que le test indique cette valeur moyenne, et 97 % que l'indice de risque trouvé soit compris dans un intervalle de plus ou moins 1 autour de la valeur médiane [42-46] (voir § 1.5.3.). En effectuant un seul essai, on a donc 97 % de chances de tomber sur l'indice moyen du risque d'avalanche pour une pente donnée en se contentant d'un intervalle de confiance de ± 1. Cette marge de sécurité assez large a en revanche le défaut de rendre assez floue la conclusion autour des indices d et e, et ne facilite guère la décision. De manière grossière, on peut résumer cette prise de décision à trois choix (en allant dans le sens de la sécurité) :

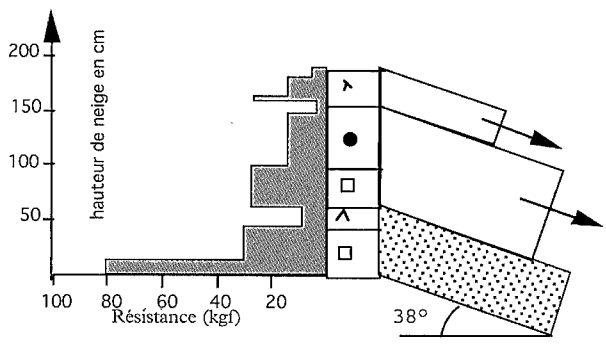
Indice donné par un test	Déclenchement	Conclusion
a-d	lors de la mise en place du coin ou par simple surcharge	renoncer
e-f	lors de sauts à skis ou à pied	passage possible, prendre des précautions si besoin est
g	rien ne se passe	"sûr"

• *Quand doit-on pratiquer le test ?*

Étant donné le temps nécessaire à la réalisation d'un test (au moins dix minutes pour deux skieurs expérimentés), on ne peut ponctuer d'essais tout l'itinéraire. On réalise un tel test lorsque les conditions sont incertaines ou lorsqu'on a des doutes. Elle présente son intérêt lorsque tout un groupe est amené à skier dans un versant raide (plus de 30°). Pour des pentes de plus faible ampleur, il est plus avantageux de progresser un par un dans la pente. Certaines personnes concluent, à partir d'un seul coin suisse ou d'un bloc norvégien, quant à la stabilité du manteau neigeux sur un massif ou sur plusieurs jours, ce qui conduit à un dangereux excès de confiance, et parfois à des accidents.

• *Peut-on se contenter d'un test de surface ?*

Il est certain que l'on gagne du temps en se contentant d'une profondeur d'une cinquantaine de centimètres (au lieu de 1,5 m) lors de la réalisation d'un bloc glissant. De plus, un grand nombre de plaques déclenchées accidentellement par des skieurs ont des épaisseurs inférieures à 60 cm. Ce raisonnement est vrai dans bien des cas, mais peut conduire à de graves erreurs d'appréciation : une stabilité moyenne des couches superficielles peut cacher une instabilité marquée des couches en profondeur.



➟ Figure 9.
Profil simplifié de l'accident de la face nord du Staldenhorn du 6 février 1990 (voir récit ch. 9, § 3.2.7). Le premier décrochement a affecté les 30 premiers centimètres (neige fraîche soufflée) ; la surface de glissement est constitué par la surface supérieure de l'épaisse couche de grains fins sous-jacente. Le décrochement secondaire a affecté cette couche de grains fins (50 cm d'épaisseur) et une couche de faces planes (environ 40 cm) ; le glissement s'est effectué à la limite des couches faces planes/gobelets. Un essai de coin suisse indique que la première rupture a lieu après deux sauts (indice de risque e.2) et la deuxième après un troisième saut (indice e.3). Un test de surface ne permet de détecter que la première instabilité [52].

• *Toutes les variantes sont-elles équivalentes ?*

Elles le sont en principe à condition de bien respecter le protocole de mise en charge et les dimensions du coin ou du bloc (surface de 3 m²) [42-46].

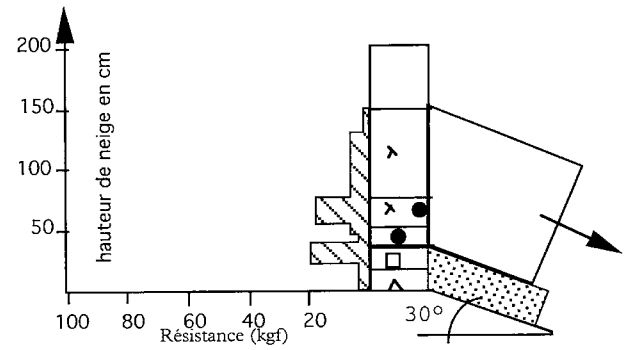
• *Existe-t-il des conditions de neige limitant l'utilisation du bloc glissant ?*

L'indice de risque peut être erroné si les skis traversent ou s'approchent trop (moins de 5 cm) de la surface de glissement. Par ailleurs si la couche déclenchée a une épaisseur trop faible, la conclusion doit être regardée avec suspicion : il faut que l'épaisseur de la couche (mesurée perpendiculairement à la pente) soit suffisante [42-46]. Ainsi, pour de la neige fraîche à 100 kg/m³, il faut une épaisseur déclenchée supérieure à 40 cm. Sur le terrain, le skieur ne peut qu'apprécier la masse volumique et si l'essai provoque le glissement d'une couche d'épaisseur moyenne (moins de 20 cm), le skieur doit se poser des questions sur la validité du test. Dans le cas de neige humide, le test n'est pas valable.

• *Le choix du lieu de test a-t-il beaucoup d'influence sur le résultat ?*

Oui, il doit être représentatif de la pente où l'on compte progresser tout en n'exposant pas les opérateurs aux avalanches (voir récit chapitre 10, § 3.2.6). Il doit être loin (au moins dix mètres) de tout obstacle (rocher, arbre, dépres-

sion...) ou trace de ski. Une pente est rarement un plan uniforme, elle présente souvent des dépressions (combe, thalweg...) et des dos (croupe, arête large).



➟ Figure 10. Profil simplifié du manteau neigeux à la fracture près du Tschingellochtighorn (2658 m, Adelboden, Suisse). Le 5 mars 89, le BRA annonce un risque local fort. Un couple entreprend une course dans un versant ouest, comme le bulletin le recommande. A la montée, il suit sans problème une croupe jusqu'au sommet. A la descente, il attaque sur la croupe prise à la montée, puis apercevant un skieur seul dans la combe voisine, visiblement en poudreuse, il s'engage dans cette combe vers 2550 m. Une avalanche se déclenche aussitôt et l'emporte (1 mort). Un essai de coin glissant *in situ* (réalisé le lendemain à l'endroit de la rupture) donne un indice de risque c. Dans la combe la neige transportée par le vent (du sud) s'était accumulée les jours précédents. Le manteau résiste au passage d'un skieur, mais pas de deux. Sans doute, s'ils étaient redescendus par l'itinéraire de montée sur la croupe (plus dégarnie), rien ne se serait passé [52].

• ***Un essai positif (degré f ou g) est-il suffisant pour écarter tout risque d'avalanches ?***

Un essai de bloc glissant permet de déduire le(s) plan(s) de glissement potentiel d'une avalanche. On déduit la stabilité à partir du glissement de couche(s) de neige soumise(s) à une charge donnée. Cette méthode est efficace pour la majorité des avalanches concernant des skieurs (c'est-à-dire déclenchées par eux) et mobilisant de la neige sèche; elle n'est pas absolument fiable, même lorsque l'on peut conclure à une bonne stabilité car les mécanismes du déclenchement ne se résument pas uniquement au glissement de strates; ce n'est pas la seule raison qui explique l'imperfection de la méthode, voir les exemples de déclenchement à distance (par des skieurs) donnés au ch. 5 et 10.

• ***Doit-on réaliser des essais uniquement sur des pentes de déclivité supérieure à 30° ?***

Non, on peut réaliser des essais pour des déclivités supérieures à 20°; néanmoins, pour des pentes comprises entre 20° et 30°, la rupture est rapidement amortie par le frottement et le glissement est à peine perceptible. Il faut donc qu'un opérateur observe la tranche aval du bloc pour déceler un déplacement éventuel (de l'ordre du cm) [42-46].

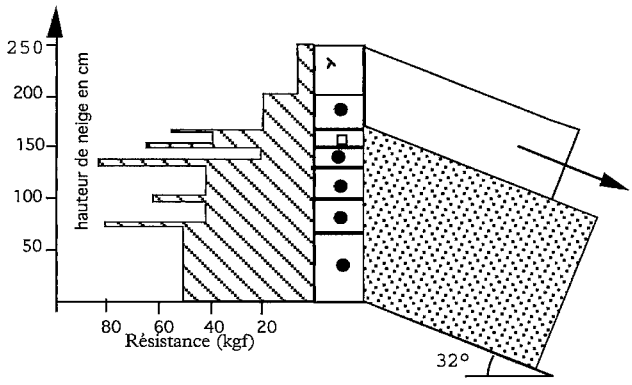
• ***Comment extrapoler le résultat concernant une pente à une autre ?***

On considère qu'une augmentation de 10° de la pente (5° chez Munter, mais cela semble exagéré) provoque une diminution d'un degré de l'indice de risque. La pente doit conserver les mêmes caractéristiques (se méfier entre autres des changements de pente, des zones de suraccumulation...).

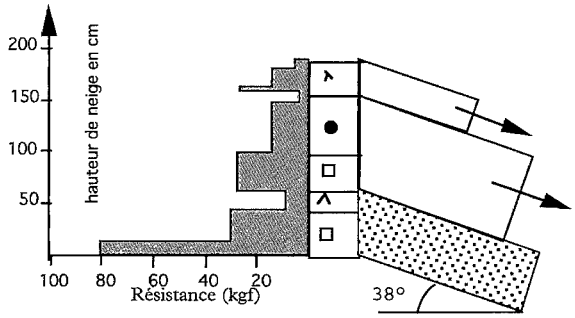
• ***Peut-on à partir d'un profil stratigraphique (avec un essai manuel de dureté) déterminer les surfaces de glissement ?***

Il existe des cas d'école, comme une couche de neige fraîche glissant sur une croûte de regel. Mais la surface de glissement potentiel n'est pas toujours décelable à partir d'un sondage par battage ou d'un profil stratigraphique, car elle peut

se constituer soit sur une couche mince peu perceptible, soit à l'intérieur d'une couche (de dureté hétérogène)... Quelquefois, la surface indiquée par le bloc glissant n'est pas celle de l'avalanche.



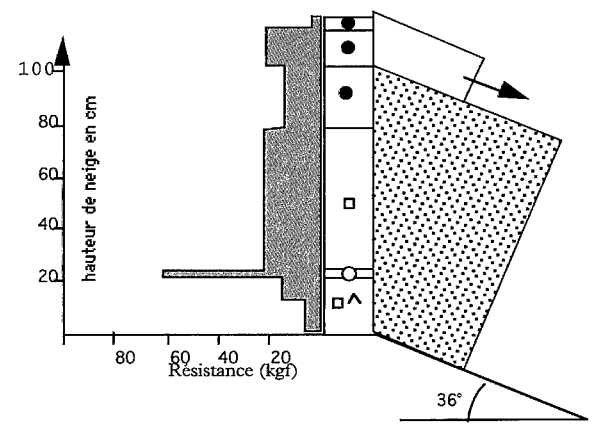
➟ Figure 11.
Profil simplifié du manteau neigeux à la fracture d'une avalanche accidentelle (provoquée par des skieurs à la descente) dans le versant sud-est du Las Set Rosas (2 985 m) dans la région de Samedan (Suisse). Les croûtes de regel dans le sondage stratigraphique sont indiquées en trait gras. Le plan de glissement est constitué par la dernière croûte de regel. Un essai de coin suisse a donné un indice d (réalisé le lendemain de l'accident, vers 2 780 m) [52].



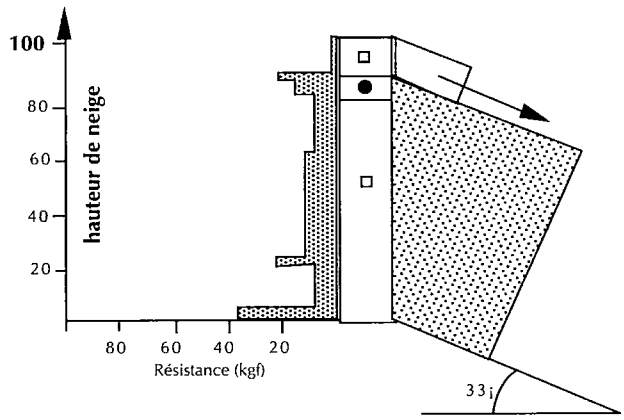
➟ Figure 12.
Profil simplifié du manteau neigeux lors de l'accident du Piz Ucello, région de San Bernadino (Suisse) le 5 février 1990 (voir récit § 3.3.2). Le coin suisse donne un indice de risque d et la surface de glissement est l'interface entre la couche de neige fraîche et la première couche de grains fins. La surface de glissement de l'avalanche est une dizaine de centimètres au-dessous (interface gobelets/grains fins) [52].

• ***Peut-on à partir d'un test manuel de dureté déduire le degré de risque ?***

Non, la dureté ou une bonne cohésion n'est pas nécessairement synonyme de stabilité du manteau. Pour preuve examinons les deux profils suivants : le premier, de bonne allure générale, a pourtant cédé lors d'un essai de coin suisse par simple flexion du skieur (degré d) tandis que le second, d'allure plus fragile et constitué essentiellement de grains à faces planes, ne s'est rompu que sous des sauts à pied (degré g).



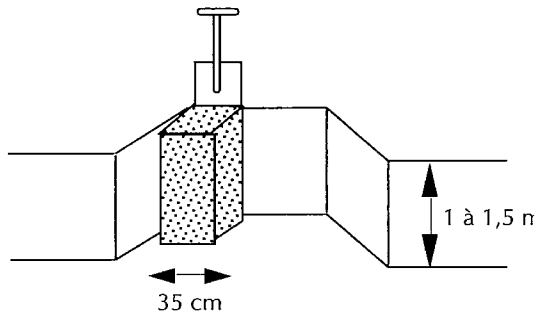
➟ Figure 13.
Profil simplifié et essai de coin suisse (degré d) le 28.11.92 au Radüner Rothorn (Suisse) à 2 880 m d'altitude [52].



➟ Figure 14.
Profil simplifié et essai de coin suisse (degré g) le 07.01.1993 au-dessus de Parsenn (Suisse) à 2 560 m [52].

2.3. Le test de la pelle et variantes

Le test de la pelle consiste à isoler une tranche du manteau neigeux de base carrée (la largeur est celle de la pelle, soit une trentaine de centimètres en moyenne), puis à la tirer vers soi ou à la charger pour détecter la présence de plan(s) de glissement potentiel(s). Ce n'est donc pas à proprement parler un test de stabilité.



➟ Figure 15.
Dimensions du test de la pelle selon les normes américaines (voir aussi méthode de Faarlund, chapitre 4, § 2.2.1.).

On creuse tout d'abord une tranchée verticale large d'environ 1 mètre et profonde de 1 à 1,5 m. On en profite pour faire un sondage stratigraphique (grains, test de dureté, d'humidité). On forme ensuite une cheminée de base carrée en dégageant ses côtés latéraux. Le côté amont est découpé à l'aide d'une scie ou du talon d'un ski sur environ soixante-dix centimètres. On introduit avec précaution la pelle dans l'interstice ainsi créé et on tire vers soi avec les deux mains le manche de la pelle. S'il y a un glissement significatif d'une couche le long d'une surface plane, on examine la surface et le type de grains. La plus ou moins grande résistance en tirant la pelle permet d'évaluer qualitativement la résistance au cisaillement, sans toutefois prétendre répondre à la question « jusqu'à quelle charge le manteau est-il stable ? ». Une alternative consiste à placer la pelle sur le sommet de la cheminée, puis à appuyer dessus. La force nécessaire à la rupture est une indication de la résistance au cisaillement et de la charge supportable par le manteau neigeux [51].

☞ *En conclusion, on considère pour les deux tests que le manteau neigeux considéré comme stable si la neige est relativement dense et s'il n'y a pas de surface de rupture sur une profondeur de 70 cm.*

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] O. PESNEL et O. MARCO (coord.) : *Aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels* (1992, Cemagref (Dicova), Antony) 151 p.

[2] C. CHARLIER : *Le risque en montagne, définir le risque : le risque négocié,* Comptes rendus 'Séminaire Futur Antérieur'du 21 avril 1994, Paris.

[3] R. MATHIEU : *La trace inachevée,* Neige et Avalanches **51** (1990) 8-12.

[4] I. BERNARD, P.-P. DANNA, J. HERMANN, G. J. MARTIN, A. RAINAUD, R. ROMI, E. VALETTE et G. ZALMA : *La prévention des risques naturels, échec ou réussite des plans d'exposition aux risques?* (1993, Société Française pour le Droit de l'Environnement et UNSA, Sophia Antipolis) 207 p.

[5] C. DOURLENS, J. P. GALLAND, J. THEYS et P. A. VIDAL-NAQUET : *Conquête de la sécurité, gestion des risques* (1991, L'Harmattan, Paris) 300 p.

[6] C. RESTIER-MELLERAY : *Experts et expertise scientifique, le cas de la France,* Revue Française de Science Politique **40** (1990) 546-585.

[7] G. DECROP et C. CHARLIER : *De l'expertise scientifique au risque négocié : vers des scènes locales de risque?,* Rapport interne (1995, Cemagref, Grenoble).

[8] J. SAUNIER : *Mission interministérielle d'étude sur la sécurité des stations de montagne,* Rapport 1970.

[9] G. BORREL : *La carte de localisation probable des avalanches,* Rapport interne (1993, Cemagref, Grenoble)

[10] C. ANCEY : *Modélisation des avalanches denses. Approches théorique et expérimentale,* La Houille Blanche **4/5** (1994) 25-39.

[11] O. MARCO : *Instrumentation d'un site avalancheux,* Thèse de doctorat Université Joseph Fourier (1994) publiée par (Cemagref, Paris, 1995) 220 p.

[12] O. MARCO : *Snow avalanches : classification and modelisation,* Comptes rendus 'Workshop on Rapid Gravitational Mass Movements', Grenoble, coordonnés par L. Buisson (1993, Cemagref) 221-227.

[13] F. RAPIN : *The French theory for snow avalanches with aerosol,* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonnés par G. Brugnot (1992, Cemagref) 353-362.

[14] P. GAUER : *A model of powder snow avalanche,* Comptes rendus Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche, Chamonix, coordonnés par F. Sivardière (1995, Cemagref) 55-61.

[15] A. GHALI : *Estimation de la distance maximale d'arrêt des avalanches,* Neige et Avalanches **68** (1994) 19-22.

[16] H. NOREM et S. BAKKEOI : *Estimating run-out distances for extreme snow avalanche,* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonnés par G. Brugnot (1992, Cemagref) 183-191.

[17] K. LIED et BAKKEHOI : *Empirical calculations of snow avalanche run-out distances based on topographic parameters,* Journal of Glaciology **26** (1980) 165-177.

[18] R. BOLOGNÈSI : *Avalog : un environnement d'aide à la décision en matière de prévision locale des risques d'avalanche* comptes rendus Symposium ANENA, Chamonix, coordonnés par ANENA (1991, ANENA, Grenoble) 154-166.

[19] L. BUISSON et C. CHARLIER : *Avalanche modelling and integration of expert knowledge in the Elsa system,* Comptes rendus International workshop on rapide gravitational mass movements, Grenoble, coordonnés par L. Buisson (1993, Cemagref) 49-58.

[20] L. BUISSON et C. CHARLIER : *Analyse de sites avalancheux : le système ELSA,* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 333-342.

[21] P. BEGHIN, E. J. HOPFINGER et R. E. BRITTER : *Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries,* Journal of Fluid Mechanics **107** (1981) 407-422.

[22] R. BOLOGNÈSI : *Premiers développements d'un modèle hybride pour le diagnostic spatial des risques d'avalanches,* La Houille Blanche 8 (1993) 551-553.

[23] W. J. AMMANN : *Concept suisse pour la prévision du danger d'avalanches,* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonnés par F. Sivardière (1995, Cemagref) 129-132.

[24] C. SCHNEIDER, L. NAVILLOD et L. JULLIOT : *Prévision locale du risque d'avalanche, application quotidienne de 3 grandes stations des Alpes,* Comptes rendus Symposium, Chamonix, coordonnés par ANENA (1991, ANENA, Grenoble) 136-144.

[25] C. SCHNEIDER : *Prévision locale du risque d'avalanches à La Plagne,* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonnés par F. Sivardière (1995, Cemagref) 119-122.

[26] H. P. BADER et B. SALM : *On the mechanics of snow slab release,* Cold Regions Science and Technology **17** (1990) 287-300.

[27] R. BOLOGNÈSI : *Expert systems, tool for avalanche forecasting,* Comptes rendus Université d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonnés par G. Brugnot (1992, Cemagref) 307-312.

[28] J. M. DAULTIER : *Prévision locale du risque d'avalanches, Alpe d'Huez, Domaine des Grandes Rousses,* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonnés par F. Sivardière (1995, Cemagref) 139-143.
[29] G. GUYOMARCH : *Que faut-il savoir sur Astral?*, Neige et Avalanches **70** (1994) 21-25.
[30] R. PAHAUD, G. BRUNOT et E. BRUN : *Organisation du risque d'avalanche en France,* Comptes rendus Symposium ANENA, Chamonix, coordonnés par ANENA (1991, ANENA, Grenoble) 50-56.
[31] E. BRUN, P. DAVID et M. SUDUL : *Prévision du risque d'avalanche*, Neige et Avalanches **51** (1990) 17-20.
[32] J. VILLECROSE : *La prévision départementale du risque d'avalanche; l'exemple de l'Isère,* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonnés par F. Sivardière (1995, Cemagref) 157-162.
[33] J. MARTZOLF et E. PAHAUT : *Attention... L'échelle de risque d'avalanche a changé*, Neige et Avalanche **64** (1993) 11-13.
[34] G. GIRAUD : *Modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanche,* Comptes rendus Symposium ANENA, Chamonix, coordonnés par ANENA (1991, ANENA, Grenoble) 248-254.
[35] E. BRUN et L. REY : *Bilan de la campagne de mesures mécaniques de la neige effectuées sur le terrain durant l'hiver 1984-85*, Rapport interne (1985, Centre d'Étude de la neige, n° 199).
[36] R. I. PERLA, T. M. H. BECK et T. T. CHENG : *The shear strengh index of alpine snow*, Cold Region and Science Technology **6** (1982) 11-20.
[37] A. ROCH : *Les déclenchements d'avalanche,* Comptes rendus 'Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanche', Davos, coordonnés par (1965, International Association of Hydrological Sciences) 182-183.
[38] A. ROCH : *Les variations de résistance de la neige,* Comptes rendus 'Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanche', Gentbrugge, coordonné par (1966, International Association of Hydrological Sciences) 182-195.
[39] P. M. B. FÖHN : *The stability index and various trigerring mechanisms,* Comptes rendus Avalanche formation, movement and effects, Davos, coordonné par (1987, IAHS) 195-206.
[40] R. I. PERLA : *Slab avalanche measurements*, Canadian Geotechnical Journal 14 (1977) 206-213.
[41] J. B. JAMIESON et C. D. JOHNSTON : *Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting*, Annals of Glaciology **18** (1993) 268-273.
[42] B. JAMIESON : *Avalanche prediction for persistent slabs*, Thèse de doctorat Calgary (1995) Department of Civil Engineering.
[43] R. I. PERLA : *Experiences with shear frames*, Journal of Glaciology 29 (1983) 485-491.
[44] B. SALM : *Guide pratique des avalanches* (1983, CAS, Berne) 148 p.
[45] W. MUNTER : *Le risque d'avalanche* (1992, Club Alpin Suisse, Bern) 200 p.
[46] J. B. JAMIESON et C. D. JOHNSTON : *Rutschblock precision, technique variations and limitations*, Journal of Glaciology **39** (1993) 666-674.
[47] J. SCHWEIZER, C. CAMPONOVO, C. FIERZ et P. M. B. FÖHN : *Skier triggered slab avalanche release - some practical implications,* Comptes rendus 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche', Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 309-315.
[48] C. ANCEY : *Le bloc norvégien : un moyen complémentaire d'analyse du risque local d'avalanches*, La Montagne et l'Alpinisme **96-1** (1996) 64.
[49] H. GUBLER : *Artificial release of avalanches,* Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 379-407.
[50] N. MAENO : *Rheological characteristics of snow flows,* Comptes rendus International Workshop on Gravitational Mass Movements, Grenoble, coordonné par L. Buisson (1993, Cemagref) 209-220.
[51] D. M. MC CLUNG et P. A. SCHAERER : *The avalanche handbook* (1993, The Montaineers, Seattle) 271 p.
[52] IFENA : *Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen,* Rapports 52-56 (1988-93, IFENA, DAVOS).

Chapitre 7

PRÉVISIONS RÉGIONALE ET LOCALE DU RISQUE D'AVALANCHES

1. LA PRÉVISION DU RISQUE D'AVALANCHES À L'ÉCHELLE DU MASSIF*

1.1. La situation en France

La *Prévision du Risque d'Avalanches (PRA)* relève de la *gestion temporelle* du risque d'avalanches, étant entendu que le mot risque est ici pris au sens météorologique du terme, au même titre que le risque de brouillard ou d'orages. La prévision du risque d'avalanches consiste tout d'abord à estimer quelles seront la nature et l'intensité de l'activité avalancheuse à courte échéance (24 heures) sur une zone géographique de quelques centaines de km².

1.1.1. Du risque d'avalanches...

Le déclenchement d'une avalanche résulte de l'interaction de nombreux paramètres météorologiques, nivologiques et topographiques. Paramètres de surface comme la quantité et la qualité des chutes de neige, les effets du vent, la température et la couverture nuageuse, paramètres internes comme la structure du manteau neigeux, la qualité des liaisons entre strates, le profil vertical de température de la neige, la teneur en eau liquide, déterminent un état de stabilité – ou d'instabilité – du manteau neigeux. L'aspect topographique joue bien sûr un rôle important dans le déclenchement d'une avalanche : l'angle de pente, la nature du sol, les ruptures de pente, la sensibilité de la zone aux effets d'érosion ou d'accumulation dus au vent sont à prendre en compte.

Une particularité du phénomène avalanche réside dans son mode de déclenchement. Les départs spontanés d'avalanches ont pour origine une cause naturelle, sans intervention humaine, directement liée aux conditions météorologiques et à l'état du manteau neigeux. D'autres avalanches ne se déclenchent que par l'action d'une intervention extérieure, qu'elle soit volontaire comme dans le cas d'un déclenchement artificiel ou involontaire comme peut l'être la surcharge d'un skieur. Aussi, n'est-il pas rare d'analyser des situations nivologiques où le risque de départs spontanés d'avalanches très faible s'accompagne d'un risque particulièrement sévère de déclenchement accidentel au passage d'un ou plusieurs skieurs.

Certaines avalanches peuvent être qualifiées de météorologiques. Elles sont directement liées à des conditions météorologiques remarquables. Elles se produisent pendant ou immédiatement après d'abondantes chutes de neige, après un réchauffement très marqué ou encore au cours d'une période particulièrement ventée.

Une deuxième catégorie d'avalanches traduit l'effet de mémoire du manteau neigeux. Le déclenchement d'une avalanche peut très bien s'expliquer par des conditions météorologiques datant de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines, ces conditions ayant entraîné la formation de couches fragiles, responsables d'une mauvaise liaison entre les couches supérieures et le reste du manteau neigeux. C'est bien souvent cette deuxième catégorie d'avalanches qui est à l'origine des accidents provoqués en hors-piste ou en randonnée.

* Par Edmond PAHAUT (Météo-France)

1.1.2. A la prévision du risque d'avalanches...

Conséquence de l'interaction de nombreux paramètres, dont certains sont difficilement quantifiables ou encore mal connus, le risque d'avalanches n'est pas mesurable. Son estimation ne peut donc s'envisager que dans le cadre d'une expertise humaine. Une fois fixées les échelles de travail dans l'espace et dans le temps, le prévisionniste avalanche base son expertise sur un ensemble de mesures et d'observations effectuées sur et dans le manteau neigeux.

Météo-France a une approche de la prévision du risque d'avalanches (PRA) fondée sur ce principe et le dispositif opérationnel répond au schéma suivant : *observer, analyser et prévoir, informer* [1]. L'échelle de travail adoptée est le massif. Ainsi, les risques d'avalanches sont estimés sur la zone "Vanoise", "Queyras", "Haute-Bigorre" par exemples, avec, dans la majorité des cas, une différenciation du risque en fonction de l'altitude, de l'exposition ou encore de la plage horaire.

1.1.3. L'objectif de la PRA

La PRA est une des composantes de la sécurité en montagne. Le risque d'avalanches à l'échelle du massif est le reflet des conditions d'instabilité du manteau neigeux les plus représentatives et de leur extension géographique, hors des pistes balisées et ouvertes ainsi que des zones sécurisées.

Le public ciblé est très large. La PRA s'adresse tout particulièrement aux skieurs, randonneurs, surfeurs et autres raquettistes qui évoluent hors des pistes sécurisées. Elle intéresse également les organismes de sécurité de l'État ou des stations de sports d'hiver ainsi que toutes les personnes qui, résidant en montagne ou circulant sur des routes sensibles, peuvent un jour ou l'autre, être concernées par le risque d'avalanches.

1.1.4. L'organisation de la PRA

La PRA est fondée sur 4 piliers qui correspondent chacun à un niveau de responsabilité différent :

– les réseaux d'observations et de mesures, humains et automatiques, chargés de la surveillance du manteau neigeux ;

– les 9 centres "montagne" de Météo-France, implantés dans les Alpes, les Pyrénées et la Corse, chargés de la PRA sur leurs départements respectifs ;

– les 2 points focaux "Alpes" et "Pyrénées" qui ont une responsabilité régionale dans l'alerte des services de sécurité lorsque le risque d'avalanches devient très sévère et préoccupant pour la sécurité des personnes et des biens. Il s'agit des centres météorologiques de Grenoble/Saint Martin d'Hères pour les Alpes et de Tarbes pour les Pyrénées ;

– le centre d'études de la neige (CEN), chargé des études et recherches sur la neige et des développements d'outils d'aide à la prévision destinés à être utilisés en opérationnel par les centres chargés de la PRA.

1.1.5. Le dispositif opérationnel

Surveillance du manteau neigeux

• les réseaux de mesures

Le *réseau nivométéorologique* est exploité en partenariat avec les stations de sports d'hiver. Agents des DDE, du RTM, gendarmes et CRS de montagne participent également à la collecte de données. Le réseau comprend près de 140 postes de mesures répartis sur les Alpes, les Pyrénées et la Corse. Deux séries d'observations sont réalisées tous les jours en début de matinée et en mi-journée. Nuages, vent, températures et précipitations, épaisseur et qualité de la neige fraîche, hauteur totale de la neige au sol, phénomènes de chasse-neige sur les crêtes, avalanches observées font l'objet de relevés précis. Toutes ces informa-

tions sont ensuite codifiées et transmises aux centres "montagne" départementaux, chargés de la PRA. Les postes de mesures sont majoritairement situés dans la tranche d'altitude 1 500 à 2 000 m.

Les sondages par battage et les profils stratigraphiques sont des mesures pratiquées dans le manteau neigeux. Ce sont les seules qui permettent de connaître ponctuellement la structure interne du manteau neigeux dans un contexte opérationnel. La connaissance de paramètres internes comme le type de grains, la cohésion, la température, la densité, la teneur en eau liquide est essentielle pour évaluer la stabilité du manteau neigeux. Ces investigations dans le manteau neigeux sont effectuées au moins une fois par semaine sur un grand nombre de sites, dont l'altitude est généralement comprise entre 1 800 et 2 500 m.

Le prévisionniste attache également beaucoup d'importance au contact direct avec l'observateur présent sur le terrain. Des renseignements occasionnels ne pouvant être intégrés à l'observation standard sont ainsi échangés et viennent parfois compléter et affiner l'information de base.

Le *réseau de stations automatiques "nivôse"* fournit un complément d'informations dans des zones où l'observation humaine n'est pas possible. Situées entre 1 500 et 3 000 m, ces stations mesurent en continu la température de l'air, la vitesse du vent, l'épaisseur de la couche de neige déposée au sol. Ces données, transmises par satellite, accessibles de nuit comme de jour, sont particulièrement intéressantes au cours des épisodes perturbés. Elles permettent de disposer en temps quasi réel d'informations précieuses sur le vent en altitude et les éventuels transports de neige qu'il occasionne ainsi que sur l'accroissement ou le tassement du manteau neigeux.



Le sondage par battage, complété par le profil stratigraphique, permet de repérer les zones de faible résistance dans le manteau neigeux.



Station automatique "nivôse". La hauteur de neige, la température et la vitesse du vent sont mesurées toutes les heures et sont transmises via satellite.

• la modélisation du manteau neigeux.

Une des faiblesses du système de surveillance, basé sur un ensemble d'observations et de mesures, est liée à la difficulté que peut éprouver le prévisionniste à suivre l'évolution du manteau neigeux dans toute sa diversité. Sur un massif donné, les conditions de neige sont très différentes suivant l'altitude, l'exposition, l'angle de pente... Les 140 postes du réseau nivométéorologique laissent supposer que la densité de points de mesures est forte. Pourtant, si l'on répartit ces points en fonction de l'altitude et de l'exposition, les mailles du réseau apparaissent alors très larges. De plus, des mesures essentielles comme le sondage par battage ne sont faites qu'une fois par semaine. Dans les cas de situations météorologiques très changeantes, il devient malaisé de déterminer comment a pu évoluer le manteau neigeux.

Le prévisionniste doit donc procéder par extrapolations successives pour connaître, avec une marge d'erreur non négligeable, l'état de la neige hors des mailles de son réseau.

Comme il est impossible de multiplier les points de mesures, il fallait donc développer un outil qui permette au prévisionniste, en complément des informations issues du réseau de mesures, de connaître la structure interne du manteau neigeux dans sa grande variabilité. C'est ce qu'a réalisé le Centre d'Études de la Neige avec le modèle numérique CROCUS [2]. Ce modèle prend en compte l'ensemble des processus contrôlant l'évolution du manteau neigeux et à partir de variables purement météorologiques, il simule l'évolution du manteau neigeux en terme d'accroissement, de tassement, de densité, de teneur en eau liquide, de stratigraphie et de métamorphose. Ces simulations sont réalisées sur 6 expositions et par pas de 300 m.

L'utilisation opérationnelle de ce modèle passe par une alimentation automatique en variables météorologiques utiles. C'est le rôle du modèle SAFRAN [3] qui utilise les sorties des modèles météorologiques, les données des réseaux météorologiques et nivométéorologiques, ainsi que celles de stations automatiques en montagne pour calculer, sur des pentes types définies par une exposition, une altitude et une inclinaison, les paramètres pertinents utiles aux simulations CROCUS.

Analyse des données et prévision

Cette mission est confiée aux neuf centres météorologiques spécialisés, chargés de la PRA sur un ou deux départements. Les prévisionnistes "avalanche" ont aujourd'hui encore pour principale source d'informations les données issues des réseaux de mesures. Ces données, collectées par télécopie ou téléphone, ont une double destination. En premier lieu, elles sont utilisées directement par les prévisionnistes grâce à une application informatique qui assure toutes les fonctions de saisie, de contrôle, de visualisation des données et propose toute une gamme de tableaux et graphiques. En second lieu, les données issues des réseaux de mesures participent indirectement aux simulations du modèle CROCUS puisqu'elles contribuent à l'alimentation de SAFRAN en variables nivométéorologiques.

A partir de ces deux sources d'information, le prévisionniste est à même de classer la situation nivologique analysée dans un éventail de situations types : journées avec ou sans précipitations, périodes de redoux ou de temps froid, journées avec ou sans transport de neige par le vent, etc.

A partir de là, il sélectionne et hiérarchise les paramètres les plus pertinents qui lui permettront d'apprécier l'état du manteau neigeux et le type d'instabilité existant le jour J.

La deuxième phase de son expertise revient à évaluer l'incidence des conditions météorologiques prévues dans les 24 heures sur l'état initial du manteau nei-

geux pour finalement aboutir à l'estimation du risque d'avalanches la plus réaliste au niveau du massif pour le jour J+1.

Paramètres de surface et paramètres internes auront plus ou moins d'importance suivant les situations analysées. Si, par exemple, il est tombé 60 à 80 cm de neige à 1 800 m et que l'on attende pour les prochaines heures un réchauffement brutal accompagné de pluie jusqu'à 2 200 m, quel que soit l'état des couches internes, une fort activité avalancheuse peut être attendue avec une très bonne probabilité. Cependant, l'état des sous-couches sera déterminant sur l'ampleur des avalanches. Si elles sont bien stabilisées, les avalanches ne concerneront que la couche de neige récente, si elles sont peu stabilisées, les avalanches pourront prendre une plus grande ampleur et intéresser tout ou partie du manteau neigeux.

Si l'objectif du prévisionniste est bien de prévoir l'évolution du manteau neigeux à court terme, la connaissance de l'historique du manteau neigeux lui est indispensable. Il est aidé en cela par des applications informatiques qui résument, sur des périodes allant de la semaine au mois, toutes les informations utiles à un suivi du manteau neigeux.

Le sondage par battage et le profil stratigraphique restent les mesures de référence pour estimer la stabilité du manteau neigeux. Prises isolément, ces investigations sont représentatives de la structure du manteau neigeux en un lieu et à un instant donnés. Mais, effectuées régulièrement dans le cadre d'un réseau et dans chaque poste de ce réseau, sondages et profils permettent un suivi du manteau neigeux, montrant les phases de consolidation ou de déstabilisation. La comparaison des sondages sur un massif peut alerter le prévisionniste. Un niveau d'instabilité qui apparaît comme une constante, sur l'ensemble des sondages peut être un indicateur de la généralisation d'un risque d'avalanches indécelable avec les seuls éléments de surface.

L'esprit de synthèse est une des qualités premières du prévisionniste. Partant d'un ensemble de données ponctuelles, il restitue les particularités les plus représentatives à l'échelle d'un massif. Sa mémoire, parfois secondée par des modèles basés sur la recherche de journées analogues, est fortement et constamment sollicitée. Ces modèles statistiques, qui ne prennent en compte que des paramètres de surface, consistent à caractériser, sur un poste, la situation nivologique du jour par une liste de paramètres pertinents et à la comparer aux situations du passé. Les journées les plus semblables sont alors sélectionnées et fournissent des indications sur l'activité avalancheuse observée. Ces modèles sont plutôt adaptés à une échelle locale, mais peuvent être utilisés par les prévisionnistes départementaux qui les activent sur des postes de référence. Le modèle ASTRAL basé sur ce principe est proposé aux postes du réseau nivométéorologique qui disposent de séries de données complètes sur 3 ou 4 hivers [4].

Il reste cependant que les modèles les plus adaptés à l'échelle de travail du massif sont les modèles SAFRAN/CROCUS. Avec les produits graphiques issus de ces deux modèles, le prévisionniste a la possibilité de visualiser des paramètres bruts ou élaborés calculés par SAFRAN ou par CROCUS. Les profils stratigraphiques calculés par tranche d'altitude et sur 6 expositions différentes ainsi que l'historique du manteau neigeux visualisé depuis le début de l'enneigement offrent des capacités d'analyse et de suivi très étendues. Le prévisionniste peut ainsi apprécier la variabilité de la structure du manteau neigeux suivant l'exposition et l'altitude, détecter les couches fragiles souvent sources d'instabilité, surveiller l'évolution des couches internes soumises à une métamorphose de gradient, suivre la rapidité du tassement et de la densification, ou encore connaître l'altitude et l'importance des phénomènes d'humidification.

Autre outil d'aide à l'estimation du risque d'avalanches mis à la disposition des prévisionnistes, le système expert MEPRA [5], a été couplé aux modèles

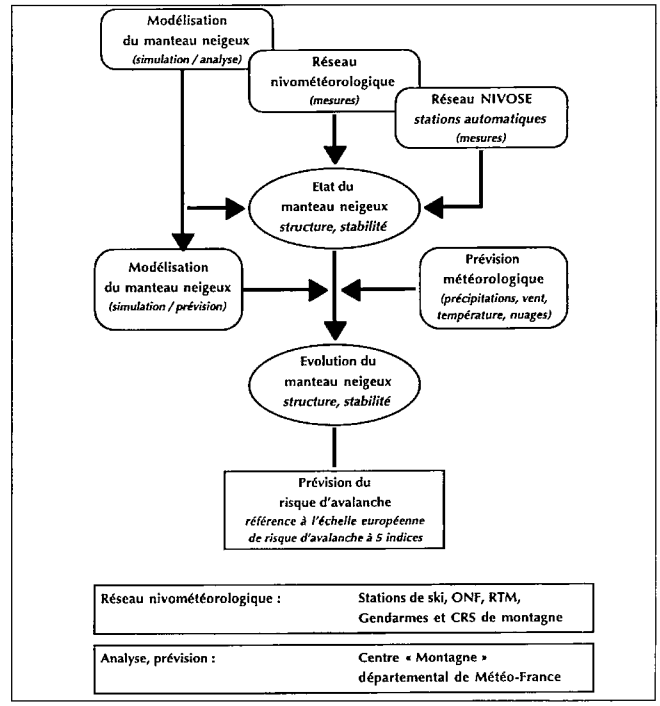
SAFRAN/CROCUS. MEPRA combine des connaissances expertes, mécaniques et déterministes. Il s'agit d'un modèle qui fournit une analyse du risque d'avalanches, naturel ou accidentel, par tranche d'altitude et en fonction de l'exposition.

La chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA fonctionne en analyse, à partir des réseaux de mesures, mais aussi en prévision à 24 ou 48 heures.

Tous les outils, aussi sophistiqués soient-ils, restent des outils qui aident le prévisionniste dans son analyse de la situation et dans son diagnostic. Celui-ci doit confronter les résultats des différents modèles qui lui sont proposés avec la réalité du terrain. Le prévisionniste doit garder un esprit critique et, notamment, tenir compte des limites et des faiblesses actuelles de la modélisation : précipitations réputées homogènes sur un massif, pentes typiques, sans relief, caractérisées par une déclivité, une exposition, dans une tranche d'altitude donnée, manteaux neigeux simulés sans prendre en compte les effets du vent [6]. Il est raisonnable de penser que tous ces points faibles seront atténués, sinon supprimés, dans les prochaines années avec les progrès qui seront réalisés dans la connaissance du matériau "neige" et des phénomènes importants comme peut l'être le transport de la neige par le vent.

Malgré ces réserves, dans son état actuel de développement, la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA est une source d'informations très riche donnant une vision assez réaliste de l'état du manteau neigeux dans des zones non couvertes par les réseaux de mesures. L'intérêt de la modélisation est bien sûr évident en début ou fin d'hiver, lorsque le réseau nivométéorologique fonctionne avec un nombre réduit de postes.

METEO-FRANCE ET LA PREVISION DU RISQUE D'AVALANCHE
Organisation départements - Échelle de travail : le massif



Informer

Les **bulletins d'estimation du risque d'avalanches (BRA).**

Le résultat de l'expertise doit s'exprimer dans un bulletin qui doit rester clair, concis et dont la durée d'écoute, sur les serveurs téléphoniques, doit rester dans des limites acceptables (environ 2 minutes). Le risque d'avalanches est estimé en référence à l'échelle européenne de risque d'avalanches. Cette échelle, qui

compte 5 niveaux de risque, est utilisée depuis l'hiver 93/94 par tous les services de prévision du risque d'avalanches des pays de l'arc alpin et de la chaîne pyrénéenne. L'échelle européenne de risque est une échelle croissante dont les indices sont ordonnés suivant le danger auquel s'expose le pratiquant de la montagne enneigée. Il faut que l'usager prenne connaissance de l'intégralité du bulletin et ne s'en tienne pas au seul indice chiffré de l'échelle, car seul le texte procure une information qualitative sur le type de risque et sa localisation éventuelle.

Toute l'information contenue dans les BRA est valable dans les zones vierges non aménagées et non sécurisées. Dans les domaines skiables des stations, les pistes balisées et ouvertes ainsi que les zones récemment sécurisées par les déclenchements préventifs ne sont pas concernées par les BRA. Cependant, dans certaines situations nivométéorologiques très sévères (importantes chutes de neige par exemple) on peut considérer que les informations du BRA s'appliquent à une partie du domaine skiable tant que les mesures de prévention n'ont pas été mises en œuvre.

Les BRA décrivent la situation nivologique générale sur les différents massifs d'un département en insistant sur les particularités les plus représentatives des conditions de neige existantes ou prévues, Cette synthèse s'attache notamment à indiquer les disparités du manteau neigeux liées à l'altitude, à l'exposition ou à la plage horaire. Aussi, l'utilisation de deux indices de risque dans un même bulletin est-elle assez fréquente. L'exemple typique de ces situations se rencontre après une chute de pluie suivie d'un refroidissement. La limite pluie/neige définit deux domaines très différents en matière de stabilité. En dessous de la limite, le regel entraîne une diminution rapide du risque alors qu'au-dessus, l'instabilité peut persister et le risque être marqué ou fort. Ces indices concernent l'ensemble des pentes de mêmes caractéristiques topographiques à l'intérieur du massif. Ils ne s'appliquent pas à un couloir ou à une pente en particulier [7], cette échelle de travail relevant de la *prévision locale du risque d'avalanches* [8].

Le niveau de risque utilisé dans les BRA n'est en aucune façon un risque moyen. Il est le reflet le plus réaliste d'une situation d'ensemble sur le massif la plus proche de la définition de l'indice en terme de stabilité et de probabilité de déclenchement : quel est le type de l'instabilité ? existe-t-elle sur un petit nombre de pentes ? un grand nombre de pentes ? les avalanches seront elles de petites taille ? de grande ampleur ? Voici quelques exemples de questions auxquelles doit répondre le prévisionniste pour déterminer l'indice le plus approprié à la situation.

Le but du bulletin n'est ni d'interdire, ni d'autoriser la pratique de la montagne. Ce n'est qu'un outil d'aide à la décision permettant à chacun d'adapter son comportement aux conditions de neige.

L'enseignement retiré du bulletin dépend bien sûr de l'expérience et de la connaissance du milieu montagnard que possède chaque utilisateur. Dans certaines situations à fort risque de déclenchement accidentel, le skieur peu expérimenté peut être amené à annuler la descente hors-piste ou la randonnée projetée et à rester sur les pistes ouvertes. Le skieur expérimenté peut décider de maintenir la sortie prévue en choisissant un itinéraire moins exposé que celui initialement prévu.

Une fois sur le terrain, il convient d'apprécier si les conditions réelles sont dans l'ensemble conformes à celles qui étaient annoncées. En effet, la prévision du risque d'avalanches est établie à partir des conditions nivologiques existantes mais aussi des prévisions météorologiques, dont l'essentiel est indiqué dans la rubrique "aperçu météo" du bulletin. L'estimation du risque d'avalanches peut être remise en cause si les conditions météorologiques ont évolué différemment de ce qui était prévu. C'est dans ce type de situation que l'expérience et la connais-

sance de la neige jouent un grand rôle car elles permettent au montagnard averti de s'adapter au décalage observé entre la prévision et le constat sur le terrain.

La consultation des BRA doit devenir un réflexe quand on pratique la montagne enneigée, en dehors des pistes balisées et ouvertes. En station, une information locale auprès des professionnels est également recommandée.

Les BRA sont diffusés de la mi-décembre à la fin du mois d'avril et couvrent tous les départements alpins, pyrénéens ou corses. Ils sont disponibles sur *minitel* et sur des serveurs téléphoniques interactifs.

En dehors de la période de diffusion des BRA, une information *"neige et avalanches"* moins complète est disponible une ou deux fois par semaine en automne et au printemps.

Dans les cas où la situation avalancheuse devient préoccupante pour la sécurité des personnes et des biens, des **bulletins régionaux d'alerte météorologique "avalanches" (BRAM)** sont diffusés vers les services de la Sécurité Civile. Cette mission d'alerte est assurée par les deux points focaux.

Dans ce type de situation ou lorsque le risque de déclenchement accidentel est particulièrement fort, des **communiqués météorologiques de presse (CMP)** sont émis à l'intention des médias et du public.

2. La prévision locale du risque d'avalanche*

2.1. Objet de la prévision locale

Les comportements vis-à-vis de l'avalanche, autrefois perçue comme une fatalité, ne sont plus ce qu'ils étaient. Aujourd'hui, l'usager de la montagne exige une sécurité totale lors de ses déplacements sur les voies de communication ou sur les domaines skiables et il n'hésite pas à saisir les tribunaux en cas d'accident. Mais ce même usager accepte mal les fermetures de routes ou de pistes de ski en cas de danger d'avalanche !

Pour les zones ne pouvant être équipées d'ouvrages paravalanches, ces exigences antinomiques ne peuvent être satisfaites que par une prévision *spatio-temporelle* des avalanches très précise qui permettra soit d'alerter, soit d'interdire momentanément la circulation dans certaines zones : c'est l'objet de la prévision dite locale.

Celle-ci consiste donc à estimer les risques d'avalanches *ponctuellement* (c'est-à-dire pour un couloir ou un groupe de couloirs voisins et pour une durée limitée) plutôt que globalement.



L'objet de la prévision locale : annoncer l'avalanche pouvant survenir en un point et à un instant donnés. Ici, c'est évidemment l'instabilité du manteau neigeux dans la zone de départ du couloir dominant la route d'accès au village (celliers) qui conditionne la fermeture ou l'ouverture de cette dernière.

* Par Robert Bolognesi, chef de la Section R&D risques majeurs, GESTER SA

Mais la prévision locale des avalanches est une tâche particulièrement difficile, d'autant plus que l'erreur est condamnée tandis que l'excès de prudence est toujours réprouvé, et que les analyses régionales ne fournissent pas toujours l'information nécessaire pour prendre, localement, des mesures de protection pertinentes. En effet, le bulletin régional indique un risque global, autour duquel peuvent fluctuer les risques ponctuels. En cas d'instabilité très marquée et généralisée du manteau neigeux, le bulletin régional est normalement valable au niveau local. Mais en dehors de ces situations relativement rares, le risque ponctuel – celui qu'il faut évaluer – peut s'écarter sensiblement d'un risque global du fait de l'extrême variabilité spatiale des conditions nivologiques observables en montagne (cf. figure 1).

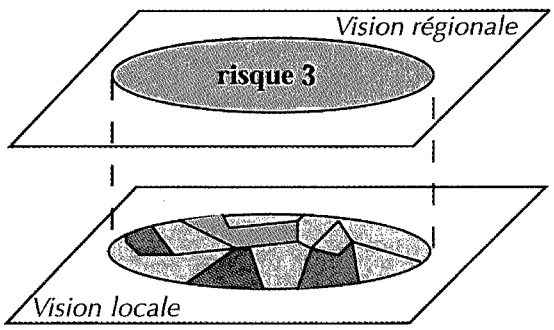


Figure 1. Le risque régional peut être considéré comme une "vue d'ensemble". Sauf situations critiques, il n'est donc pas nécessairement un élément de décision pour la prise de mesures de protection ponctuelles.

Par ailleurs, les éventuels déclenchements artificiels qui bouleversent le manteau neigeux dans les zones de départ des zones sous contrôle, interdisent de transposer directement à un niveau local les conclusions d'une analyse régionale qui sont établies pour les zones non soumises aux déclenchements préventifs. Aussi, des principes et des outils ont du être spécifiquement développés pour la prévision locale des avalanches.

2.2. Principes de la prévision locale

Rappelons que le risque local d'avalanche, représentant "l'éventualité d'un préjudice", peut se définir objectivement : à un instant donné, ce risque est le produit de la probabilité d'occurrence de l'avalanche (l'aléa) par la variable décrivant les dommages que causerait l'avalanche (la vulnérabilité).

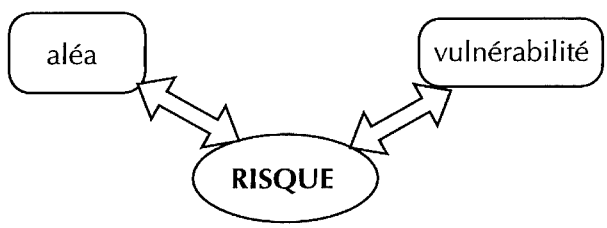


Figure 2. Les deux composantes du risque : aléa et vulnérabilité

Par conséquent, une prévision locale instantanée du risque d'avalanches repose sur une estimation de la probabilité, au sens mathématique du terme, que cette avalanche survienne. Les critères d'évaluation de la stabilité ponctuelle du manteau neigeux ne sont pas exactement les mêmes que ceux qui sont utilisés pour les analyses régionales.

Postulat fondamental, communément admis : les prévisions locales d'avalanches ne peuvent être établies que par l'analyse de données décrivant la situation nivo-météorologique *locale*. On ne peut espérer des prévisions *régulièrement*

fiables que si ces données sont prédictives de l'avalanche. Il existe deux types de données prédictives : celles qui ont un rapport de causalité (plus ou moins fort mais permanent) avec le déclenchement des avalanches et celles qui sont seulement corrélées aux occurrences des avalanches.

De quelles données doit-on disposer pour établir des prévisions locales d'avalanches ? On peut classer les données qui ont un rapport de causalité avec le déclenchement des avalanches en trois grandes catégories :

- les données topographiques ;
- les données météorologiques, décrivant des phénomènes atmosphériques ;
- les données nivologiques, décrivant des états du manteau neigeux.

Ces dernières seraient a priori les plus prédictives puisque c'est l'état du manteau neigeux qui détermine l'occurrence de l'avalanche. Cependant, la grande variabilité spatiale des caractéristiques du manteau neigeux limite souvent la portée – voire la validité – de l'analyse des données nivologiques : une analyse de stabilité effectuée à partir de données relevées au champ de mesures est tout simplement absurde si le manteau neigeux de la zone de déclenchement de l'avalanche présente trop de différences avec celui du manteau neigeux observé au champ de mesures (ce qui est souvent le cas) ! Ainsi les données nivologiques utilisées pour une prévision locale des avalanches devront être relevées en un point situé à proximité des zones de déclenchement, et présentant avec ces dernières certaines analogies géographiques (altitude et orientation analogues notamment). Elles constitueront alors de très précieuses informations dans la mesure où les couches supérieures du manteau neigeux dans le champ de mesures seront souvent similaires à celles du manteau neigeux dans les zones de départ (et nombreuses sont les avalanches qui ne mettent en mouvement que ces couches...). Les relevés comporteront les mesures et les tests classiques (cf. chapitres précédents).

* Les données météorologiques ont une validité spatiale souvent plus étendue. Elles sont prédictives d'un grand nombre d'avalanches car la plupart d'entre elles se produisent pendant ou juste après les précipitations (chutes de neige ou pluies), les épisodes de transport de neige par le vent et les redoux marqués. La mesure des précipitations, du transport de neige par le vent, du rayonnement solaire (ou à défaut de la nébulosité), du vent et de la température et humidité de l'air apportera donc des éléments de diagnostic très importants (cf. chapitres précédents).

Les données topographiques, enfin, permettent de localiser les éventuels dangers : un manteau neigeux très fragile n'est pas instable sur le plat ! Ces données doivent notamment renseigner sur l'inclinaison, le profil, l'étendue, la rugosité et les ancrages de chaque zone de départ d'avalanche.

Les données qui sont seulement corrélées aux occurrences des avalanches sont également utilisables pour la prévision locale. Les avalanches se produisant souvent durant les mêmes périodes (on parle parfois de crue avalancheuse), un déclenchement d'avalanche est souvent annonciateur de prochains autres. Ainsi, des avalanches se produisant sur certaines pentes sont souvent prédictives d'avalanches survenant sur d'autres pentes, bien qu'elles n'en soient pas la cause.

Le recours aux données corrélées est souvent efficace... si et seulement si les corrélations sont fortes et invariables.

A partir de ces diverses données, il sera alors possible d'établir des prévisions locales d'avalanches avec quelque fiabilité en effectuant la séquence d'actions suivante :

- Critique des données : cette phase préliminaire consiste à évaluer la portée spatiale, la précision, la fiabilité et la cohérence des données. Elle permet de rejeter une information éventuellement erronée, incomplète ou non généralisable, qui risquerait de compromettre la validité de l'analyse.

• Compléments d'information : cette phase permet de compléter les données mesurées par les diverses observations disponibles sur le moment (dont l'activité avalancheuse observée) et par les prévisions météorologiques à court terme.

• Caractérisation de la situation nivo-météorologique : cette phase de synthèse permet de classer la situation nivo-météorologique (situation de redoux, de fortes précipitations, de dégel-regel, etc.), ceci dans le but d'identifier les données les plus prédictives du moment. Par exemple, il sera souvent inutile de considérer la vitesse du vent en situation de pluie alors que cette donnée deviendra fondamentale en cas de chute de neige...

• Estimation, pour chaque pente, de l'éventualité du déclenchement d'une avalanche : pour cela, on peut se référer aux événements passés : si une avalanche est survenue sur telle pente lors de situations passées similaires, alors cette pente peut présenter un danger dans la situation présente. Il en va de même si les autres pentes de topographie analogue (pentes, profils et rugosités voisines) sont habituellement actives lors de situations semblables à la situation présente. On peut également se livrer au jeu des déductions en se référant à des règles réputées valides.

• Comparaison des diagnostics : comparer des diagnostics effectués par diverses personnes qui ne se sont pas concertées est une petite procédure de contrôle simple mais souvent très efficace.

• Vérification de la validité de quelques diagnostics : les diagnostics peuvent être confrontés à divers tests (blocs glissants, tirs à l'explosif, etc.). Dans le cas où les diagnostics ne seraient pas confirmés par les tests, l'analyse doit être reprise et affinée.

2.3. Outils de la prévision locale

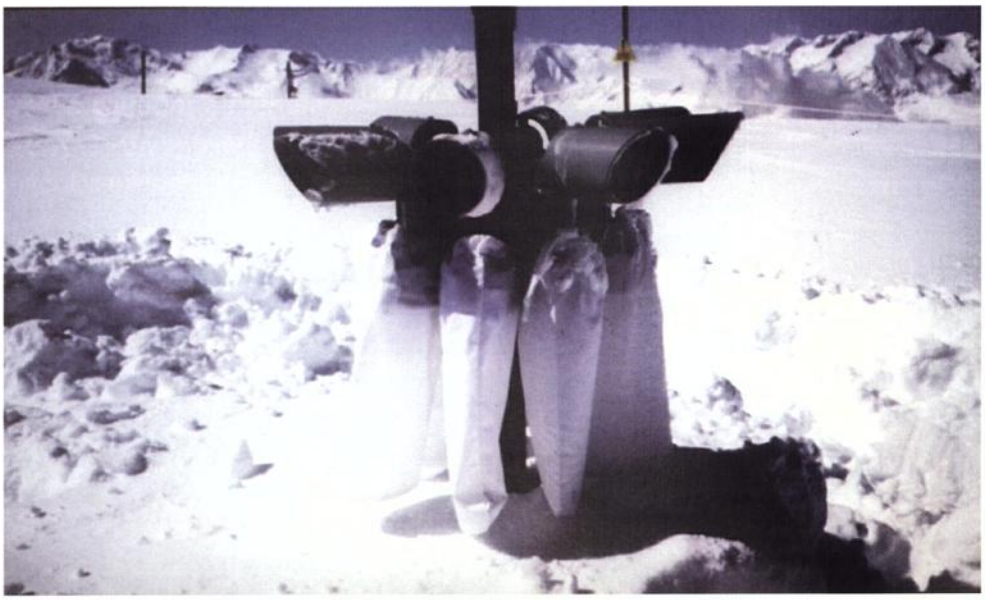
On a vu précédemment que la prévision locale des avalanches nécessite, en principe, une masse de données relativement importante. Ceci demande des moyens adaptés de collecte et de traitement de l'information : l'ordinateur est désormais de la partie...

2.3.1. Instrumentation

Parce que la prévision des avalanches repose totalement sur l'observation des conditions nivo-météorologiques locales, la collecte des données revêt une importance toute particulière. Cette collecte peut s'effectuer soit manuellement, soit automatiquement. Chacun de ces modes de collecte de l'information possède ses avantages et ses inconvénients.

* La collecte manuelle des données est habituellement confiée à un opérateur qualifié. Elle présente de nombreux avantages : tous types (ou presque) de mesures possibles, peu de risque de données aberrantes, faible coût de l'instrumentation et de son installation. Par contre, elle suppose la présence régulière de l'homme en altitude, ce qui n'est pas toujours concevable, et elle ne donne jamais qu'un instantané des conditions nivo-météorologiques qui évoluent en permanence.

L'instrumentation de base habituellement utilisée pour la collecte manuelle des données est des plus classiques : thermomètres, pluviomètre, planche à neige, anémomètre, perche à neige, carottiers et pesons. Cette instrumentation de base peut avantageusement être complétée par un appareil de mesure de la TEL pour la mesure du volume d'eau liquide au sein du manteau neigeux, par un scissomètre, et par un driftomètre (photo p. 160 en haut) qui indique la direction du transport de neige par le vent et fournit un index quantitatif des masses de neige soufflées (il a été montré que cet instrument simple améliore très sensiblement la fiabilité des prévisions locales) [17].



Le driftomètre, appareil renseignant sur le transport de neige par le vent (direction et intensité). Ce matériel a été mis au point en soufflerie puis testé en situation réelle. Il fournit une donnée hautement prédictive des avalanches dues au transport éolien.

❄ La collecte automatique des données tend actuellement à se développer. Elle offre le formidable avantage de fournir, en continu et en temps réel, des données en provenance de lieux inaccessibles à l'homme.

La collecte automatique des données suppose une station de mesures comprenant un dispositif de production d'énergie, divers instruments de mesures et un système de transmission des données (photo p. 160 en bas).



Station de mesure automatique rendant possible la mesure en continu et en temps réel de nombreuses données nivo-météorologiques.

Le développement récent de nouveaux capteurs ouvre des perspectives très prometteuses pour la prévision locale des avalanches. Parmi ceux-ci, on peut citer les driftomètres automatiques comme le FlowCapt [26] ou encore les détecteurs d'avalanches comme le capteur acoustique Arfang [22] ou les divers capteurs sismiques. Il est encore délicat d'établir des prévisions locales d'avalanche à partir des seules informations délivrées par les stations de mesures automatiques du fait que certaines données nivologiques nécessaires ne sont pas mesurables automatiquement (épaisseur de regel, enfoncement de la sonde, masses volumiques, etc.). Mais cet inconvénient pourrait être supprimé dans la mesure où ces données seraient calculées à partir des autres mesures disponibles.

2.3.2. Modèles de diagnostic

La prévision locale des avalanches est un exercice difficile qui a suscité de nombreux travaux scientifiques visant à formaliser des procédures d'analyse : les modèles de diagnostic.

Il existe plusieurs grands types de modèles (qui peuvent être combinés) : les modèles déterministes, les modèles statistiques et les modèles experts [13].

* Les modèles déterministes simulent les phénomènes en appliquant les lois connues de la physique. S'il était possible de décrire le manteau neigeux d'une manière qui ne soit pas trop réductrice, il est probable que ces modèles permettraient de simuler la genèse d'une avalanche avec précision et exactitude. Dans l'avenir, ils apporteront peut-être une solution définitive au problème de la prévision des avalanches.

* Les modèles statistiques [10, 14, 15, 16, 19] offrent une alternative intéressante : ils fournissent des prévisions à partir des relations statistiques, constatées sur des échantillons d'ajustement, entre les conditions nivo-météorologiques et l'occurrence des avalanches (ces relations n'étant pas nécessairement formulées de façon explicite). Parmi les modèles statistiques, ceux qui utilisent la méthode dite "méthode des plus proches voisins" se révèlent relativement efficace. Ils reposent sur l'hypothèse selon laquelle "des causes semblables produisent des effets semblables" : pour estimer les probabilités d'avalanches à un instant donné, on se réfère alors aux événements survenus lors de situations nivo-météorologiques semblables observées par le passé.

* Les modèles experts [11, 16] sont également assez performants pour la prévision des avalanches. Ces modèles simulent le raisonnement empirique d'un expert humain. Le savoir de l'expert humain est le plus souvent décomposé en règles indépendantes ("granules de connaissance"), et par application de ces règles, le modèle progresse de déductions en déductions pour finalement établir un diagnostic. L'intérêt évident de ce type de modèle est qu'il est possible d'utiliser des règles locales, ce qui permet souvent d'augmenter leur fiabilité.

Chacun de ces modèles possède ses forces et ses faiblesses. Aussi la tendance actuelle est-elle de combiner les différentes approches au sein de modèles dits hybrides.

2.3.3. Logiciels

En prolongement des travaux théoriques concernant les modèles, divers logiciels ont été réalisés dans le but de faciliter la prévision locale des avalanches.

* Les systèmes de visualisation des données : ces systèmes sont conçus pour présenter l'information collectée de façon claire et synthétique. On peut citer, à titre d'exemple, le programme GELINIV de Météo-France [20] qui offre à l'utilisateur de nombreuses représentations graphiques lui permettant d'appréhender immédiatement les caractéristiques principales de la situation considérée.

* Les systèmes d'analyse des données : de nombreux logiciels d'analyse des données, basés sur la méthode des "plus proches voisins" ont été développés en France et en Suisse depuis le début des années 80 : PRELA, ASTRAL, NXLOG [12]...

* Les systèmes de diagnostic : parmi ces logiciels, on peut citer NivoLog qui est un système expert simulant et combinant un raisonnement par analogie et un raisonnement par déduction. Pour établir ses diagnostics, ce système se réfère à la fois à des règles expertes générales, à des règles spécifiques aux sites concernés, et à des situations nivo-météorologiques analogues. Il indique la probabilité d'avalanche pour toute pente placée sous surveillance. Il fournit également une estimation globale du risque au niveau micro-régional.

Ces divers logiciels sont incontestablement de précieux auxiliaires pour l'estimation des risques locaux d'avalanches. Cependant, ils ne restent que des outils d'aide à la décision largement perfectibles.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] PAHAUT E., GIRAUD G. : *La Prévision du risque d'avalanche en France*, Neige et Avalanches, 76 et 77.

[2] BRUN E., MARTIN E., SIMON V., GENDRE C., COLÉOU C. : "An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting", Journal of Glaciology 35 (1989), 333-342.

[3] DURAND Y., BRUN E., MÉRINDOL L., GUYOMARC'H G., LESAFFRE B., MARTIN E. : "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models", Annals of Glaciology 18 (1993), 65-71.

[4] GUYOMARC'H G., MERINDOL L. : *Que faut-il savoir sur ASTRAL*, Neige et Avalanches 66, 21-25

[5] GIRAUD G. : "MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting", Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 97-106.

[6] VILLECROSE J. : *La prévision départementale du risque d'avalanche, l'exemple de l'Isère*, La météorologie, 8e série, n° 17, mars 1997.

[7] BRUN E. : *L'utilisation juridique des bulletins neige et avalanche*, Neige et Avalanches 79.

[8] BOLOGNESI R. : *Prévision locale des avalanches*, Neige et Avalanches 78

[9] MEFFRE J.-F., *Protection des voies de communication et des travaux d'un grand chantier en montagne par prévision localisée du risque d'avalanche.* 2e Colloque International des Services de Prévision des Risques d'Avalanches (C.I.S.P.R.A. 86), Météo-France, Centre d'Etude de la Neige, Grenoble.

[10] BUSER O., *Two years experience of operational avalanche forecasting using the nearest neighbours method*, Annals of Glaciology 13 (1989).

[11] BOLOGNESI, *Artificial intelligence and local avalanche forecasting : the system AVALOG*, proceedings of the International Emergency Management and Engineering Conference, S.C.S., San Diego CA (1993).

[12] BOLOGNESI R., BUSER O., GOOD, W., *Local avalanche forecasting in Switzerland : strategy and tools. A new approach*, proceedings of the International Snow Science Workshop 94, Snowbird, UT (1994).

[13] GOOD (W.), AMMANN (W.), 1994, *Modelling local avalanche forecast, a review*, proceedings of the International Symposium on Snow and Related Manifestations, S.A.S.E., Manali.

[14] GUYOMARC'H G., MÉRINDOL L., *Que faut-il savoir sur Astral?* Neige et avalanches n° 66 (1994).

[15] MCCLUNG (D.M.), TWEEDY J., *Numerical avalanche prediction : Kootenay Pass, British Columbia*, Journal of Glaciology, 40, Cambridge (1994).

[16] BOLOGNESI R., BUSER O., *Merging data analysis and symbolic calculation into a diagnosis system for natural hazards*, proceedings of the International Emergency Management and Engineering Conference, Nice (1995).

[17] BOLOGNESI R., NAAIM F., OUSSET F., DAULTIER J.-M., *Une évaluation quantitative du snowdrift pour la prévision locale des avalanches*, Neige et avalanches n° 69 (1995).

[18] SCHNEIDER C., *Prévision locale du risque d'avalanche à La Plagne.* Actes du colloque "Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche", A.N.E.N.A.-C.E.M.A.G.R.E.F., Grenoble (1995).

[19] BOLOGNESI R., *Pattern recognition pour la prévision des avalanches; demain comme hier?...*, Neige et avalanches n° 75 (1996).

[20] DUMAS J.-L., Gendre C., *Geliniv for Windows - an integrated softwarefor Snow Data Analysis*, proceedings of the International Snow Science Workshop 96, Canadian Avalanche Association, Revelstoke BC (1997).

[21] BOLOGNESI R., DENUELLE M., DEXTER L., *Avalanche forecasting with GIS*, proceedings of the International Snow Science Workshop 96, Canadian Avalanche Association, Revelstoke BC (1997).

[22] CHRITIN V., ADAM V., ROSSI M., BOLOGNESI R., *Acoustic detection system for operational avalanche forecasting,* proceedings of the International Snow Science Workshop 96, Canadian Avalanche Association, Revelstoke BC (1997).
[23] BOLOGNESI R., 1997, *Prévision locale des avalanches en France : pourquoi et comment ?* Neige et avalanches n° 78 (1997).
[24] BOLOGNESI R., 1998, *Prévention des avalanches : le système NivoLog ; présentation générale,* Neige et avalanches n° 81 (1998).
[25] BOLOGNESI R., *Estimation du risque d'avalanches micro-régional par le système NivoLog,* actes des conférences, TRACE 98, Sion (1998)
[26] CHRITIN V., BOLOGNESI R., GUBLER H., *Acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting, proceedings of NGI anniversary conference, Voss* (1998).

Remerciements : la première section article reprend certaines parties de l'article publié dans la revue de la Société Météorologique de France "La Météorologie", 8e série, n° 12, décembre 1995 et dans la revue de l'ANENA (nos 76 et 77, décembre 1996/mars 1997).

Chapitre 8
GÉNIE PARAVALANCHE, VIABILITÉ HIVERNALE*

Même devenue au XXe siècle un atout économique, la neige continue de poser de nombreux problèmes aux hommes, qui ont au cours du temps tenté de réduire son emprise et ses méfaits. Symboliquement, en France, on peut séparer les différentes étapes de cette lutte par deux dates : 1860, qui marque la création des services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) et 1970, avec la catastrophe de Val-d'Isère. Ce chapitre traite des différentes techniques couramment utilisées aujourd'hui en France dans la lutte contre les avalanches et les congères et précise le cadre réglementaire associé.

1. LES PROBLÈMES LIÉS À LA NEIGE

1.1. Les problèmes et quelques remèdes des temps jadis

Autrefois, l'habitat permanent connaissait l'emprise de la neige durant de longs mois (voir ch. 1), était quelquefois exposé à une activité avalancheuse et il était nécessaire de construire dans les endroits les plus sûrs, de préserver la forêt, ce qui n'était pas toujours suffisant pour éviter des catastrophes. Au cours des derniers siècles, de nombreux villages ont ainsi été touchés, voire rasés par des avalanches [1] :

- 1601 : les villages de Chèze et Saint-Martin (Hautes-Pyrénées, commune de Saint-Martin) sont détruits : 107 morts ;
- 1634 : le village du Tour dans la vallée de Chamonix (Haute-Savoie) est touché par une avalanche (11 morts) ;
- 1681 : Abriès, Molines et l'Echalp dans le Queyras (Hautes-Alpes) sont fortement touchés par des avalanches (15 morts) ;
- 1706 : l'actuel département des Hautes-Alpes est sinistré ; le village de la Chenal est détruit (43 maisons et 21 morts), Serres est partiellement enseveli (14 morts, 7 maisons) ainsi que Fouillouse (18 morts) et Costeroux (11 maisons) ;
- 1749 : le village d'Huez-en-Oisans (Isère) passe sous une avalanche (38 morts) ;
- 1757 : Villard-de-Vallouise (Hautes-Alpes) est rasé par un gros aérosol (54 maisons, 27 morts) ;
- 1788 : le hameau de Costeroux est encore la proie des avalanches (21 morts, 43 maisons) ; à Ceillac dans le Queyras (Hautes-Alpes), 30 maisons sont détruites ;
- 1793 : une avalanche touche Celliers (Savoie) et cause la mort de 7 personnes, puis encore en 1810, 1825, 1870, 1881, 1907, 1908, 1945, 1952, 1978, 1981, 1988 ;
- 1792 : une avalanche part de la dent de Crolles dans le massif de la Chartreuse (Isère) et touche le village de Saint-Bernard-du-Touvet (6 maisons détruites, 2 morts) ;
- 1803 : le village de Barèges (Hautes-Pyrénées) est touché (11 morts), puis en 1811, 1842, 1855 (12 morts), 1856, 1860, 1879, 1882, 1886, 1889, 1895, 1897, 1902, 1907, 1939 ;
- 1806 : le village de Talau (Pyrénées-Orientales, commune d'Ayguatébia) subit une avalanche meurtrière (64 morts) ; il sera de nouveau touché en 1906 (22 maisons détruites, 1 mort) ;

* Ce chapitre a été écrit par C. ANCEY, C. CHARLIER, O. MARCO et F. RAPIN.

- 1810 : le village de Fontpédrouse (Pyrénées-Orientales) est sévèrement atteint (27 morts), puis en 1822 (8 morts) ;
- 1843 : on compte 8 morts à la Giettaz, 5 morts aux Houches (Haute-Savoie), 10 morts à Valsenestre dans l'Oisans (Hautes-Alpes) ;
- 1847 : on dénombre 7 morts dans la vallée de Chamonix (les Pélerins et la Flégère) ;
- 1881 : le hameau des Brévières (Savoie), au bas de l'actuel lac de retenue de Tignes, est touché une première fois par l'avalanche (14 morts), puis en 1950 (6 morts) ;
- 1895 : dans les Pyrénées, on compte 20 morts à Orlu et Ax-les-thermes (Ariège) ;
- 1923 : le hameau des Lanches dans le Beaufortain (Savoie) est touché (10 morts) ;
- 1943 : Saint-Colomban-les-Villards (Savoie) est atteint une première fois (7 morts), puis en 1981 (2 morts) ;
- 1950 : à la mine d'Huez (Isère), c'est le drame pour les mineurs (10 morts) ;
- 1970 : le chalet de l'UCPA à Val-d'Isère (Savoie) est touché ; c'est la plus grosse catastrophe en France (39 morts). De nombreuses autres avalanches meurtrières (Tignes, Lanslevillard) ;
- 1978 : plusieurs avalanches dans la vallée de Chamonix touchent des routes et des habitations (10 morts) ;
- 1981 : plusieurs villages de Savoie et du Dauphiné sévèrement touchés : Saint-Collomban-des-Villards, Saint-Étienne-de-Cuines, Valloire (Savoie), Clavans, La Morte, etc. (Isère) ; en tout on dénombre 4 morts ;
- 1986 : une avalanche touche un chalet à Porte-Puymorens (Pyrénées-Orientales) : 2 morts ;
- 1990 : avalanche de Taconnaz (Hautes-Savoie). Plusieurs maisons détruites (pas de victimes). En février, tempête d'une semaine. La station de Tignes (Savoie) bloquée et touchée par des avalanches ;
- 1993 : avalanche du Bourgeat (Savoie, vallée de Chamonix) : dégâts matériels ;
- 1995 : avalanche de Peisey-Nancroix (Savoie) : plusieurs chalets détruits (pas de victime) ;
- 1996 : avalanche exceptionnelle d'Arinsal (Andorre). Dégâts matériels.

Dans quelques cas, la seule parade consistait à abandonner le village pour un autre endroit ; le plus souvent, on déplaçait les bâtiments les plus exposés. Parfois, on construisait des ouvrages de défense [2], comme à Vallorcine, où une étrave fut construite pour protéger l'église et le presbytère en 1722 et renforcée en 1843. Les routes d'accès étaient fort exposées aux avalanches, ce qui entravait encore la circulation rendue déjà pénible par l'enneigement et ce qui plus rarement coûta la vie à quelques malheureux voyageurs à pied. Face à la neige et à ses dangers, on s'adaptait, on limitait les déplacements, on évitait les zones à risques...

1.2. La lutte contre les avalanches

En 1860, sous le Second Empire, à la suite de nombreuses calamités naturelles, une loi donna naissance aux services de Restauration des Terrains en Montagne, dépendant de l'administration des Eaux et Forêts[1]. Leur mission principale se fixa tout d'abord sur le reboisement des zones sensibles, la correction des torrents et la lutte contre l'érosion des versants (par exemple, au mont Aigoual). Progressivement, les services RTM ont pris en charge, entre autres, les travaux de protection contre les avalanches, essentiellement en reboisant les versants exposés. Ainsi, les RTM se substituèrent aux sapeurs du génie militaire sur le site de Barèges (Hautes-Pyrénées), qui fut le premier en France à bénéficier d'une défense active contre les avalanches [3]. Barèges, village et station thermale, est bâti dans une gorge à 1 250 m d'altitude. Il est fortement exposé aux avalanches

1. Jusqu'en 1877, le ministère de tutelle était celui des Finances ; après cette date, c'est le ministère de l'Agriculture qui les prit en charge.

qui descendent des ravins dominant le village; les villageois eurent à souffrir des avalanches durant le XIX[e] siècle à de nombreuses reprises : 1803, 1811, 1823, 1842, 1855, 1856, 1860, 1879, 1882, 1886, 1889, 1895, 1897 [4]. A ce propos, l'ingénieur Lomet[2] note au cours d'un voyage à Barèges en 1794, que c'est le déboisement qui est à l'origine des catastrophes récentes : « Autrefois, toutes les montagnes qui dominent Barèges étaient revêtues de bois de chêne jusque vis-à-vis de la vallée d'Escoubous. Des hommes actuellement vivants en ont vu les restes et les ont achevés... Les habitants des plateaux ont tout ravagé eux-mêmes, parce que ces pentes étant les premières découvertes par leur exposition et par la chute des avalanches, ils y ont de bonne heure un pâturage pour leurs moutons, et que, le jour où ils les y conduisent, ils oublient que pendant l'hiver ils ont frémi dans leurs habitations de la peur d'être emportés avec elle par ces neiges, dont ils provoquent obstinément la chute. » (voir aussi ch. 1). La présence d'un hôpital militaire dans une zone exposée allait entraîner les premières études sur la protection contre les avalanches, la recherche et la mise en œuvre des techniques adéquates. Le capitaine du génie de Verdal soumit à l'état-major les premières propositions en 1839, puis 1843, qui restèrent lettre morte. Il fallut attendre l'avalanche catastrophique de 1860 pour que le génie consacrât ses efforts à la mise en place de moyens de défense. Les travaux entrepris sur trente années furent gigantesques : séries de banquettes (sur 1,22 ha), forêt artificielle (7 750 pieux enfoncés), plate-forme en maçonnerie, 33 barrages en pierres sèches, etc.

Certaines de ces méthodes étaient anciennes, et déjà connues dans les Alpes suisses[3], d'autres (comme la forêt artificielle) étaient à l'état embryonnaire; toutes allaient pouvoir être testées sur le site de Barèges sur plusieurs années. La stratégie adoptée par les concepteurs était d'empêcher le glissement du manteau neigeux en altitude, et non de freiner ou d'arrêter l'avalanche. Il s'avéra que la forêt artificielle était inefficace et fragile (elle fut arrachée en moins de dix ans) tandis que les barrières à lames jointives furent arrachées en moins de deux ans par les vents violents qui soufflent sur les crêtes. En revanche, banquettes et plates-formes eurent les effets escomptés : fixer le manteau neigeux et séparer la zone d'accumulation en panneaux indépendants de telle sorte que l'instabilité de l'un d'eux n'entraîne pas dans son glissement les autres. Parallèlement, les services RTM entreprenaient un colossal effort de reboisement (essentiellement des résineux : pins noirs d'Autriche, mélèzes et épicéas...), qui était le principal remède préconisé contre les avalanches. En 1892, l'administration des Eaux et Forêts prit la relève du génie militaire sur le site de Barèges : de nouvelles banquettes furent construites dans les versants exposés qui n'en étaient pas encore pourvus (en tout 50 ha traités), les réfections des plantations (250 ha) sont poursuivies sans relâche. Le reboisement des zones sensibles allait être la priorité des services RTM pendant de nombreuses années : à Barèges, Celliers, Saint-Colomban-des-Villards, etc. des *séries domaniales* sont constituées.

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, contrairement à la Suisse, il n'y a pas eu en France une volonté politique d'organiser une lutte systématique[4] contre les avalanches, d'une part à cause du faible enjeu et du faible poids économique de la montagne française, mais également à cause du coût exorbitant des travaux de correction (réalisés à la main et à la pioche). Le reboisement était donc amplement considéré comme la meilleure politique globale de prévention [3]. Progressivement, après la première guerre mondiale apparut la nécessité de maintenir ouverts les grands axes routiers : la ligne de chemin de fer de Maurienne, certains cols (par exemple, le Lautaret à 2 050 m) furent déneigés. Le développement du tourisme hivernal après la seconde guerre mondiale incita à l'extension des travaux de protection (défense rapprochée : galerie, tourne...).

2. Cité dans [4].

3. En s'inspirant des techniques utilisées en Suisse, l'ingénieur Lomet notait dès 1794 : « Ce qu'il faut, dans cette situation, ce sont des forts, des bastions en pierres sèches, par étages de hauteur en hauteur, pour couper et diviser la neige." [4].

4. Il faut noter toutefois que, de manière sporadique, plusieurs dispositifs de protection ont été construits; citons notamment l'exemple de Chamonix dès 1924 (Jeux Olympiques).

La voisine Suisse fut le grand modèle : le service forestier helvétique avait de longue date assuré la direction des travaux de défense[5]. L'enjeu était bien plus important qu'en France : à dominante montagneuse, la Suisse possédait de nombreuses lignes de chemins de fer exposées, des centres de tourisme alpin parmi les plus prestigieux (Saint-Moritz, Davos, Zermatt...) et en outre il y avait la volonté au plus haut niveau (légitimée par la politique de défense de la Confédération) de maintenir ouverts les grands axes routiers et ferroviaires ainsi que les principaux cols (Gothard, Simplon, Oberalp, Bernina...). C'est ainsi qu'avait été créé en 1931 le premier laboratoire de la neige, l'IFENA, à Davos au Weissfluhjoch, où exerçait notamment le célèbre alpiniste André Roch, que certains surnommèrent "le père des avalanches". En 1946, des forestiers français rendaient visite à l'Institut et s'informaient des techniques employées pour l'étude de la neige (sondage par battage...), pour la sécurité des pistes (déclenchement artificiel), des moyens de défense (tournes mais surtout claies), des méthodes de déneigement (chasse-neige)... [5]. A la même époque, se développaient en France des recherches scientifiques sur le sujet : ainsi, une collaboration entre le centre technique forestier (CTF), la Météorologie nationale et EDF avait conduit à la création en 1954 du centre de documentation nivo-glaciologique (CEDONIGLA), qui menait ses propres expériences depuis la fin des années cinquante au col de Porte.

En février 1970, la catastrophe du chalet de l'UCPA à Val-d'Isère, puis celle de Passy, émut l'opinion publique et fut le symbole de la défaillance du système français en matière de protection. Aussitôt, le gouvernement nomma une commission interministérielle d'enquête ; dès octobre 1970, la commission Saunier proposa la création de l'association nationale pour l'études de la neige et des avalanches (ANENA), de la mise en place de la division "nivologie" au CTGREF (devenu le Cemagref) et du centre d'études de la neige [6, 7]. On entre alors en France dans la période moderne de la lutte contre les avalanches.

1.3. Les problèmes actuels

Au cours du XXe siècle, en montagne, l'augmentation de la fréquentation hivernale, l'intensification des infrastructures routières, le développement de nouvelles zones urbanisées ont accru la nécessité d'assurer non seulement une protection des populations et activités humaines mais également la libre circulation quotidienne : il apparaît presque intolérable au citadin partant aux sports d'hiver que la route soit bloquée à cause de la neige ou des avalanches. Que quelques touristes soient coupée dans une station à cause des chutes de neige, et la presse ne manquera pas d'évoquer les "naufragés de la neige". En même temps que la neige, encore vue au début ce siècle comme une contrainte naturelle parfois une calamité, s'est progressivement transformée en "or blanc" par la secrète alchimie du tourisme, il devenait de plus en plus inacceptable pour l'homme que cet atout économique soit également accompagné de nuisances et de contraintes en termes de sécurité, de viabilité ou d'urbanisme. Se prémunir contre ces nuisances exige des collectivités locales et de l'État de lutter sur plusieurs plans bien distincts :

① Les avalanches : il s'agit d'assurer la protection du patrimoine (zones urbanisées, équipements, forêts...) et des activités humaines (circulation, domaine de ski). Malgré l'importance des moyens mis en œuvre, des accidents ont eu lieu :

• des *habitations* ont été endommagées ou détruites à la suite de situations météorologiques ou d'avalanches exceptionnelles :

– 1970 : l'hiver catastrophique avec 39 morts à Val-d'Isère, à Lans-le-Villard (8 morts) ainsi que Bonneval, Chamonix, la Giettaz,

5. Il existait auparavant en Suisse une grande tradition en la matière, puisqu'une grande partie du pays est montagneux et chaque village se défendait comme il pouvait contre les avalanches, entreprenant parfois parfois des ouvrages de défense [2].

– 1978 : le Queyras, le Briançonnais, la vallée de Névache sont touchés en janvier (nombreux dégâts) puis en février vient le tour de la Haute-Savoie (10 morts dans la vallée de Chamonix),
– 1981 : après la tempête de janvier, de nombreux villages dans les Alpes du Nord sont atteints : Saint-Colomban-des-Villards, Saint-Étienne-de-Cuines, La Morte, Clavans... 2 morts et des millions de francs de dégâts ;

• des *domaines skiables* ont pu être concernés, causant parfois des accidents mortels :

– 8 mars 1988 : deux skieurs sont emportés par une avalanche sur une piste balisée (Corrençon),
– 21 novembre 1992 : une avalanche ensevelit 10 personnes ; malgré la rapidité des secours, 7 décèdent (Val-Thorens) ;

• les *voies d'accès* sont parfois coupées par des avalanches, les accidents sont très rares depuis 1970 :

– 2 février 1978 : cinq automobilistes sont ensevelis par une avalanche près d'Argentière dans la vallée de Chamonix,
– 12 mars 1981 : l'avalanche emporte un car et une voiture qui reliaient Argentière à Vallorcine. Par chance, aucune victime,
– du 13 au 14 février 1990, 3 voitures sont emportées (12 personnes, 1 mort),
– à l'étranger, un car est emporté le 2 mars 1985 près de Zermatt (11 morts). Le 1er mai 1992, un car et une voiture sont emportés par une avalanche sur la route du col Flüela (Engadine) : 34 personnes sont ensevelies (4 morts). L'autoroute du col du Brenner (Autriche) a également été touchée en janvier 1974 par une avalanche (4 morts).

② La viabilité hivernale : il s'agit de garantir la praticabilité des routes et de supprimer ou limiter les effets dus à la neige (enneigement des routes, verglas, congères). En termes économiques, ces actions représentaient (en 1988) :

– 600 000 à 700 000 tonnes de sel de déneigement répandues annuellement sur le réseau des nationales et départementales ;
– 12 000 engins de déneigement ;
– 40 000 agents ;
– soit un coût global de 1 020 millions de francs par an [8].

Des chutes de neige en plaine (février 1970 dans le sud de la France, décembre 1990...) peuvent paralyser les grands axes routiers pendant plusieurs heures, voire journées.

③ Surcharge imposée : la neige peut causer d'autres dégâts aux bâtiments et équipement divers en provoquant une surcharge ; entre autres en imposant des normes de construction, il s'agit d'éviter la rupture des installations :

• *surcharge sur les toits* : les accumulations de neige sur le toit peuvent être la cause de la rupture de la charpente. En montagne, ceci est assez rare et en général limité à quelques maisons, car les montagnards ont su adapter l'architecture en fonction des matériaux disponibles, parfois pour retenir la neige (isolation thermique), dans d'autres cas pour la faire s'écouler. Les chutes de neige du toit provoquent quelques accidents mortels. A plus basse altitude, ou en plaine, il faut des chutes importantes pour causer la rupture d'une charpente. Jusqu'à très récemment, les normes ont eu néanmoins tendance à sous-estimer l'occurrence et l'ampleur de telles chutes [9] :

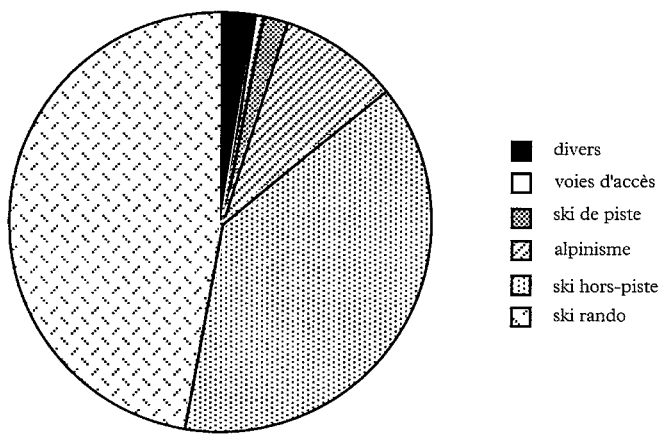
– 12-16 janvier 1978, une chute d'environ 1,8 à 2,5 m (au-dessus de 1 100 m) de neige dans le Queyras ou dans le département de l'Ardèche cause de nombreux effondrements de toiture. A la suite des chutes de neige de la fin janvier et du début février (9-11/02), 98 communes de l'Isère et de la Drôme sont sinistrées,
– 11-12 janvier 1981 : des chutes de neige (55 cm à 120 m) puis de pluie sont à l'origine de la destruction de nombreux bâtiments dans les départements

de l'Aude et des Pyrénées-Orientales (215 millions de dommages pour les agriculteurs),
- 16-20 janvier 1981 : 300 bâtiments sont endommagés par les chutes de neige dans le Jura et dans la vallée du Rhône,
- 6 février 1986 : on recense 2 000 sinistres dans le département de l'Ardèche après une chute de neige (1 m entre le 28 janvier et le 6 février à 900 m),
- 9-13 décembre 1990 : il tombe pendant cinq jours entre 60 et 100 cm de neige sur la région lyonnaise ; de nombreuses communes de l'Isère, de l'Ain et du Rhône sont déclarées sinistrées. Le montant remboursé par les assurances dépasse 1 200 millions de francs.
- 23-25 janvier 1992 : dans les départements de l'Aude et des Pyrénées-Orientales, une chute de neige puis de pluie (50 cm de neige, puis 70 mm de pluie) provoque plus d'un milliard de francs de dégâts ;

• *surcharge des câbles* : des tempêtes de neige ou du givre opaque peuvent former des dépôts de neige sur les câbles de remontée mécanique, sur les lignes haute-tension, etc. et provoquer leur rupture ;

• *poussée sur les obstacles* : la reptation de la neige peut provoquer la dégradation d'équipements (pylône, maison, soutènement...) situés sur des pentes.

Nous n'avons pas dressé ici un tableau exhaustif de toutes les menaces ou nuisances que la neige peut créer. Il faudrait encore parler des dangers qu'elle induit (avalanche dans une retenue d'eau d'un barrage[6], glissement de terrain[7], crue[8]), les dégâts aux exploitations agricoles ou des calamités à l'étranger (les tempêtes de neige ont provoqué plusieurs centaines de morts en Amérique du Nord[9], les écoulements de neige fluidifiée[10], laves torrentielles[11]...). Si les avalanches (et les phénomènes associés à la neige) causent la mort de personnes et de nombreux dégâts, elles sont aussi de loin le phénomène naturel le moins meurtrier et destructeur à l'échelle de la Terre... En France, sur 10 200 communes exposées à des calamités naturelles, seules 400 sont sous la menace d'avalanches. La plupart des accidents d'avalanches ayant causé des victimes concernent des activités de loisir (91 % des décès). Les dégâts et les efforts de protection se chiffrent en millions de francs : la construction du dispositif paravalanche du Taconnaz a dépassé les vingt millions de francs, le déneigement des routes coûte annuellement plus d'un milliard de francs...



➟ Figure 1.
Activité des victimes au moment de l'avalanche. D'après [11].

2. Protection contre le danger d'avalanche

2.1. Position du problème

L'expertise vise à proposer les techniques de défense qui restent compatibles avec l'étude de faisabilité et le cahier des charges : une solution est acceptable lorsque l'objectif de protection est réalisé en tenant compte du scénario majeur

6. A la suite de la catastrophe du Vajont en Italie en 1963 (un glissement de terrain tombant dans la retenue d'un barrage créa une onde de submersion, il y eut 2 000 morts), les barrages sont sous haute surveillance, entre autres, en ce qui concerne le risque d'avalanches.

7. En avril 1970, un affaissement de terrain (à la fonte des neiges) emporta un sanatorium sur le plateau d'Assy et tua 74 enfants.

8. En 1957, les chutes de pluie sur un manteau neigeux important provoquent une crue gigantesque du Guil (Queyras).

9. Par exemple, le 9 février 1978, une tempête provoque la mort de 65 personnes dans la région autour de New York.

10. Les anglo-saxons appellent cela des *slushflows*, assez fréquents dans les pays scandinaves, à la fonte des neiges. Ainsi, en Norvège à Sogn, le 9 février 1928, un tel écoulement cause la mort de 45 personnes [10].

11. La neige a accentué l'ampleur de certaines catastrophes, notamment l'avalanche du Huascaran le 10 janvier 1962 (4 000 morts), au Pérou ou lors de la rupture de la poche glaciaire du glacier de Tête Rousse le 12 juillet 1892 (175 morts)...

choisi et des contraintes techniques, financières, réglementaires... En France, on distingue quatre types d'objectifs : les lieux habités, voies de communication, domaines skiables et les aménagements industriels. On classe les stratégies paravalanches[12] en quatre familles distinctes. Les deux critères de cette classification sont : la pérennité de la protection (permanent/temporaire) et le point d'intervention sur l'avalanche (passive/active). Le tableau suivant présente les quatre classes de protection courantes en France [12-15] :

Défense permanente	**Passive**	– *Déviation* : galerie, tremplin, tourne, digue, étrave – *Freinage* : tas, dent, obstacle – *Arrêt* : mur, digue (stockage : plage de dépôt) – *Zonage* : PPR – *Adaptation* : renforcement des constructions – *Avertissement* : signalisation, DRA	
	Active	– *Reboisement* : plantation – *Modification de la rugosité du sol* : banquette (étroite), fauchage, drainage – *Utilisation de l'action du vent* : barrière à neige, vire-vent, toit-buse – *Fixation et soutien du manteau neigeux* : râtelier, claie, filet	
Défense temporaire	**Passive**	– *Réglementation* : interdiction, évacuation, consignes	
	Active	– *Damage* – *Déclenchement artificiel*	* avec les skis * à l'explosif : à la main, au canon, avalancheur, hélicoptère, CATEX * au gaz : GAZEX

➡ Par la suite, des prix sont donnés à titre indicatif (en francs, hors taxe, en 1998) [14, 15].

2.2. La défense permanente

Cette stratégie de protection contre les avalanches met en œuvre des techniques opérationnelles sans intervention humaine. On recherche une protection par des ouvrages fixes et pérennes :

• la *défense permanente passive* : elle consiste à lutter contre l'écoulement avalancheux (en général dans les zones d'impact), sans se préoccuper des conditions de déclenchement. Il s'agit soit de détourner l'avalanche (latéralement, dans une ou deux directions, par dessus...), soit de freiner voire d'arrêter l'écoulement dans sa phase d'arrêt, soit de renforcer les constructions à protéger de telle sorte qu'elles résistent à l'impact de l'avalanche ;

• la *défense permanente active* : dans ce cas, il s'agit de lutter contre les facteurs favorables au départ d'avalanche en fixant la neige dans la zone d'accumulation et d'empêcher sa mise en mouvement. On y parvient soit en aidant la stabilisation du manteau neigeux grâce à des ouvrages charpentés, soit en modifiant la structure du manteau neigeux au cours de son dépôt (c'est le rôle des ouvrages à vent), soit en augmentant la rugosité du sol, soit en reboisant quand cela est possible.

Une fois le type de stratégie bien défini, il faut choisir la tactique de protection adéquate. Il existe pour chacune des familles un catalogue de techniques en usage en France. En la matière, chaque pays a ses habitudes propres : ainsi en France, on reste attaché (historiquement) à l'emploi des râteliers plutôt que des

12. A l'évidence le meilleur moyen de protéger un équipement reste une implantation hors des zones menacées. Les techniques de cartographie et de zonage du risque aident au choix d'une bonne implantation. Cette approche peut donc être considérée comme un cinquième type de stratégie paravalanche ; on la fera apparaître ici dans la rubrique "défense permanente passive".

claies ; des méthodes globales combinant canalisation, freinage et stockage (ou encore dérivation, évacuation et dispersion) ont été développées avec succès ces dernières années. En outre, une démarche de normalisation (NF P 95-3...) établit des normes homologuées sur certains équipements paravalanches. Il faut signaler qu'actuellement chaque dispositif paravalanche construit est conçu spécifiquement en fonction du site et de l'équipement à protéger, et s'appuie sur une palette variée de techniques. L'aménagement de Taconnaz dans le massif du Mont-Blanc en donne un bon exemple (cf. § 2.5.).

2.2.1. La défense permanente passive

Les techniques de défense permanente passive ont été traditionnellement employées par les populations montagnardes. Elles assurent la protection rapprochée de l'objectif (voirie, équipement, habitations). Les diverses parades sont :

☞ *Ouvrages de déviation*

• *Galerie, tunnel* : l'ouvrage forme un tremplin au-dessus de la voie d'accès ; sa longueur doit être supérieure à la celle de la zone initialement balayée par l'avalanche. C'est un investissement extrêmement onéreux : il faut compter au moins 150 000 FF par mètre linéaire d'ouvrage ; une galerie de cent mètres coûte déjà 15 millions de francs.

• Tourne : il s'agit d'une digue de déviation sur le côté, constituée d'une levée de terre ou d'un mur en maçonnerie et qui détourne l'écoulement dense. La hauteur doit être importante, le mur amont est le plus vertical possible. Le coût est alors d'environ 30 F/m³.

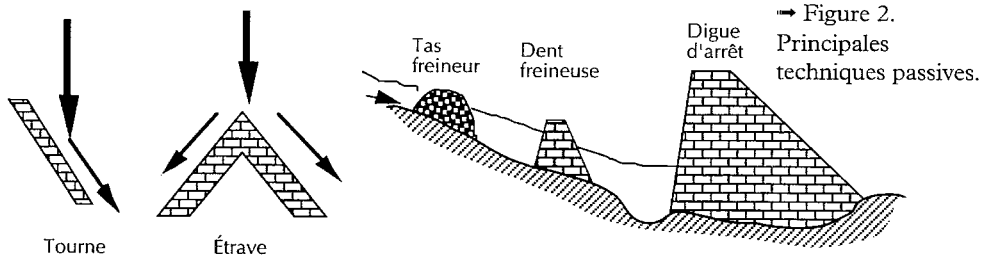
• *Étrave* : c'est un ouvrage massif en forme de coin, de principe similaire à la tourne, et placé juste à l'amont de l'objectif (pylône, maison...). Il dévie l'écoulement en deux parties.

☞ *Ouvrage de freinage et d'arrêt*

• *Tas freineurs* : ce sont des buttes en terre, en maçonnerie ou en gabion qui, disposées en réseau, servent à freiner l'avalanche et à tenter de provoquer son arrêt dans une zone de stockage ; il faut donc prévoir une plage suffisante pour le dépôt de l'avalanche. Le coût est environ de 35 F/m³. Si une première avalanche comble l'aire de stockage, une deuxième peut passer au-dessus et endommager l'objectif à protéger.

• *Dent freineuse* : il s'agit d'un ouvrage pyramidal en béton armé, haut de plusieurs mètres et de principe similaire au tas. Elle supporte au cours de l'avalanche une pression bien plus importante. Le coût est en revanche bien plus élevé.

• *Digue d'arrêt* : il s'agit d'un mur en pierre ou en terre, haut de plusieurs mètres qui tente d'arrêter la fin de l'écoulement. Le coût n'est pas très élevé s'il s'agit de terre compactée : 35 F/m³. La même réserve doit être apportée à propos d'une saturation possible de la plage de dépôt. Ce type d'aménagement est complémentaire d'autres.



➟ Figure 2. Principales techniques passives.

TYPE D'ACTION	DÉVIATION			FREINAGE	ARRÊT	AUTO-PROTECTION
	Vers le haut	Latéralement dans une direction	Latéralement dans deux directions	Ralentissement dissipation d'énergie	Blocage ; stockage	Prescriptions architecturales adaptées au site et au phénomène
TYPE D'OUVRAGE	Tremplin, galerie, tunnel	Tourne, digue	Étrave	Tas, dents, plage de dépôt	Mur, digues, plage de dépôt	Renforcement ; épaississement, aveuglement
ÉQUIPEMENT VISÉ PAR LA PROTECTION	Linéaire : voirie chemin de fer	Zone étendue ou éloignée : urbanisation voirie	Ponctuel : pylône, habitation	Zone étendue et éloignée : urbanisation, voirie	Zone étendue et rapprochée : urbanisation, voirie	Ponctuel : pylône, habitation
NIVEAU DE SÉCURITÉ	Très bon (si assez long)	Bon (mais variable)	Bon (si assez haut et si assez rapproché)	Faible (mais variable ; bon si à la limite des dépôts extrêmes)		Bon (mais assez variable)
NIVEAU DE COÛT INVESTISSEMENT	Très cher	Moyen (mais très variable)	Cher	Bon marché (tas) très cher (dent)	Bon marché (digue) cher (mur)	Très bon marché (sauf exceptions)
AVANTAGES	Sécurise l'itinéraire par tous les temps	Rapport qualité/prix	S'ajoute facilement	Diminution de la distance naturelle d'arrêt (si ouvrage dans la zone de dépôt)		Discret
INCONVÉNIENTS	Longueur accrue car diminution de la pente à l'amont	Ne convient pas pour les aérosols. Conservation de hauteur libre ; direction et angle à respecter		Conservation de la hauteur et du volume libre ; surfaces nécessaires ; dimensionnement vis à vis du phénomène majeur seulement		Doit être envisagée dès la conception
REMARQUES	Attention à la largeur en virage	Meilleur avec mur amont vertical. Attention si ouvrage voisin		Nécessité de réseau	Meilleur avec mur amont vertical	Sensibilisation des personnes

2.2.2. La défense permanente active

TYPE D'ACTION	MODIFICATION DE LA SURFACE DU SOL			UTILISATION DE L'ACTION DU VENT		MODIFICATION DU MANTEAU NEIGEUX	
	Reboisement	Activités agricoles	Terrassement	Déplacement d'un dépôt	Modification d'un dépôt	Rigide	Souple
TYPE D'OUVRAGE	Plantation	Drainage, fauchage	Banquette étroite (1 m)	Barrière à neige	Vire-vent, toit-buse	Râtelier, claie	Filet
ÉQUIPEMENT VISÉ PAR LA PROTECTION	Différé dans le temps	Zone étendue ou éloignée mais peu sensible ou très marginale		Zone étendue ou éloignée urbanisation, voirie... Aide aux ouvrages de soutien		Zone étendue ou éloignée urbanisation, voirie parfois domaine de ski...	
NIVEAU DE SÉCURITÉ	Moyen (zone d'accumulation, hauteur	Faible (seulement contre avalanches de fond)		Bon (si bien placé)	Moyen (si bien placé)	Très bon (mais assez variable)	Bon (mais assez variable)
NIVEAU DE COÛT INVESTISSEMENT	Moyen : très faible à l'unité			Cher	Très cher	Très cher	Cher
AVANTAGES	Agrément : lutte contre l'érosion	Technique simple	Association avec le reboisement	Bon rapport qualité-coût si couple site-ouvrage parfaitement adapté		Technique solide	Discret
INCONVÉNIENTS	Durée initiale sans protection : risque de dégradation	Pérennité douteuse	Reprise d'érosion ; entretien difficile	Chute de neige sans vent ou avec vent dans mauvaise direction ; surveillance hivernale		Efficacité diminuée en cas de neige sans cohésion	Efficacité diminuée en cas de neige sans bonne cohésion
REMARQUES	Conditions écologiques ; investissement productif	Zone à faible enneigement uniquement ; inefficace pour des phénomènes majeurs		Permanente ou amovible ; auto-orientable	Division en 2 sous-bassins ; suppression de corniche	Emergence indispensable, doit couvrir toute la zone de départ, placement en lignes continues ; entretien impératif	

C'est une stratégie qui a été développée[13] en France dès le siècle dernier à Barèges : il s'agit de s'attaquer aux avalanches directement dans la zone d'accumulation en fixant le manteau neigeux ou en modifiant la répartition des accumulations. L'investissement est dès lors considérable, puisqu'il faut traiter des surfaces étendues (plusieurs hectares) dans des pentes raides (35 et 50°) et d'accès difficile (l'hélicoptère est aujourd'hui employé) et ne peut se justifier que vis-à-vis de l'importance de l'objectif à protéger. Plusieurs procédés sont en usage :

☞ *Modification de la surface du sol*

• *Terrassement* : on aménage des banquettes étroites (de largeur 1 m environ) ; les banquettes larges (3 m environ) sont proscrites car elles favorisent

13. Selon l'inspecteur des Eaux et Forêts Campagne, à propos de Barèges : "Ces travaux avaient pour but, non pas d'arrêter les neiges en mouvement (car nulle puissance humaine ne saurait produire de résultat), mais bien d'empêcher les glissements de neige sur les points où ils prenaient naissance".

l'érosion et défigurent le paysage. Les banquettes freinent la reptation de la neige et son glissement au sol. Elles ne se justifient que lorsque des actions parallèles de reboisement sont envisagées, ce qui limite l'altitude d'utilisation au-dessous de 2 000 m. Elles doivent par ailleurs être entretenues annuellement pour garder leur efficacité. L'investissement est variable selon les zones d'accumulation ; le prix du mètre linéaire est compris entre 120 et 400 francs et il faut ajouter un coût de fonctionnement d'environ 3 F/an/ml.

• *Revégétalisation* : ce sont des actions à long terme[14] (20 à 50 ans au moins) de reboisement (diverses essences selon l'altitude et le sol). La *revégétalisation* est le plus souvent associée à des actions de terrassement.

☞ *Soutien du manteau neigeux*

• *Râtelier* : c'est un ouvrage en métal (acier Corten, aluminium) ou en bois composé d'un tablier à traverses perpendiculaires au terrain (non jointives) de plusieurs mètres. On place les râteliers en lignes continues le long d'une courbe de niveau pour soutenir le manteau neigeux. Il nécessite un entretien annuel (vérification de l'état, révision...). L'investissement est important : il faut compter 5 000 francs par mètre linéaire, soit environ 2 millions de francs pour traiter un hectare et annuellement 5 000 francs d'entretien par hectare. En cas d'épaisseur importante du manteau, les râteliers peuvent être saturés et devenir inefficaces. De même lors de chutes importantes de neige très légère, la neige sans cohésion peut s'écouler au travers des ouvrages, qui se purgent alors brusquement.

• *Claie* : c'est le même type d'ouvrage que le râtelier, mais les traverses sont horizontales. La claie est surtout utilisée en Suisse et en Italie.

• *Filet* : ce sont des nappes souples câblées avec des mailles d'une vingtaine de centimètres (câble en acier), qui jouent le même rôle que des ouvrages rigides, mais dont l'ancrage dans le sol est plus aisé. Relativement discret, le filet demande également un entretien ; son coût d'investissement est moindre que pour un râtelier : environ 3 500 F/m.

☞ *Utilisation de l'action du vent*

• *Barrière à neige* : il s'agit d'une barrière métallique ou en bois (châtaignier), verticale à transverses horizontales de 4 à 5 mètres de hauteur. Elle comporte une garde au sol (comprise entre 15 et 20 % de la hauteur de la barrière, elle sert à accélérer le vent au sol, elle évite un enlisement de l'ouvrage et permet d'augmenter le volume du dépôt). On l'utilise couramment pour limiter les accumulations et les congères : en perturbant l'écoulement d'air, la barrière placée face au vent, crée un sillage (ralentissement du vent) qui favorise un dépôt de neige ; elle permet d'atténuer la formation ainsi des corniches. Elle est très utilisée pour améliorer l'enneigement d'une piste de ski ; en génie paravalanche, elle est utilisée en complément d'autres parades. Son efficacité est amoindrie voire nulle si le vent souffle dans une mauvaise direction ; il existe maintenant des barrières amovibles auto-orientables pour atténuer cet inconvénient. Comme tous les ouvrages de ce type, elle nécessite un entretien annuel et une surveillance particulière (en cas d'enneigement de l'ouvrage). Le coût est conséquent : environ 3 500 francs par mètre linéaire.

• *Vire-vent* : il s'agit d'un tablier vertical plein de forme trapézoïdale haut de plusieurs mètres. Sa forme perturbe l'écoulement d'air et donne naissance à des tourbillons qui érodent localement, souvent jusqu'au sol, le manteau neigeux. Quelquefois, un réseau linéaire de vire-vents peut être également utilisé pour découper en plusieurs panneaux un secteur de la zone d'accumulation et les rendre indépendants.

14. Voir dans [16] des exemples de gestion forestière dans ce but sur les sites de la Mongie l'Hospitalet, etc. (Pyrénées).

• *Toit-buse* : c'est un panneau composé, plein, à plus ou moins 45°. Il agit comme un goulot d'étranglement, qui accélère l'écoulement d'air et force la neige transportée par le vent à se déposer plus loin.

2.3. La défense temporaire

Cette stratégie de protection contre les avalanches nécessite l'observation des conditions nivo-météorologique et implique une prise de décision (humaine). On se contente d'assurer la protection pour un temps limité, quand il y a risque.

2.3.1. Défense temporaire passive

La *défense temporaire passive* : après observation des conditions nivo-météorologiques, on cherche à atténuer les effets néfastes d'une éventuelle avalanche en prenant des mesures administratives d'interdiction de circulation, d'évacuation des équipements menacés. Ces mesures relèvent en général d'un règlement : l'autorité prend la décision, dont elle est responsable, elle doit prévoir des plans de secours ou d'intervention.

TYPE D'ACTION	AVERTISSEMENT	PRESCRIPTIONS DES RÈGLEMENTAIRES CONTRAIGNANTES			DÉTECTEUR ROUTIER D'AVALANCHE
	Signalisation	Interdiction	Évacuation	Consignation	
TYPE D'OUVRAGE	Drapeau à damiers, panneaux routiers	Pouvoir de police du maire : arrêté (éventuellement précédé d'un ordre oral) ; avis d'une commission de sécurité			DRA : détection dans le couloir, feu sur la voirie
ÉQUIPEMENT VISÉ PAR LA PROTECTION	Zone étendue ou linéaire : domaine skiable, voirie	Zone étendue ou linéaire : piste remontée, voirie	Ponctuel : immeuble, hameau, chantier		Voirie
NIVEAU DE SÉCURITÉ	Moyen à faible (dépend de l'opportunité)	Moyen (dépend de la qualité et de la rapidité de la commission de sécurité et du dispositif permettant son information)			Bon (mais surveillance du bon fonctionnement et mise en place délicate)
NIVEAU DE COÛT INVESTISSEMENT	Très faible	Très faible (mais variable)			Moyen (sauf exceptions)
AVANTAGES	Simplicité	Très bon rapport qualité-prix ; pouvoirs étendus ; urgence ; facile à engager			Automatique
INCONVÉNIENTS	Risque de banalisation	Nécessité de péril grave : intervention ni intempestive, ni inadéquate ; difficile à arrêter ; problème de décision, de responsabilité (nécessité de prévoir un plan de secours et d'intervention)			Adaptation indispensable du couloir et de la voirie entretien
REMARQUES	Protection juridique	Aucune indemnité n'est alors accordée au propriétaire menacé malgré l'éventuelle importance des pertes économiques résultantes			

Les mesures d'interdiction ou d'évacuation sont prises par le maire (Code des communes article L 131-2). Le *détecteur routier d'avalanche* (DRA) est un dispositif constitué de feux rouges de part et d'autre de la zone balayée. Lorsque l'avalanche part, elle tend un câble, qui commande par radio les feux. Il faut investir environ 400 000 francs pour l'installation d'un DRA. Un entretien annuel est obligatoire.

2.3.2. Défense temporaire active

La *défense temporaire active* : cette stratégie recouvre, outre des méthodes comme celle du damage, l'ensemble des actions de déclenchement artificiel préventif des avalanches. Elle consiste à nettoyer, à *purger* de manière systématique la zone d'accumulation dès que l'accumulation atteint une valeur seuil, plutôt que d'attendre un départ spontané à un moment imprévisible et de plus grande ampleur. Ces déclenchements sont en général provoqués par une explosion au-dessus du manteau neigeux. Ils sont soumis à une réglementation stricte. Ce type de défense repose souvent sur l'emploi d'explosifs qui est sévèrement réglementé et nécessite un personnel qualifié (artificiers, certificat de préposé au tir :

CPT). Chaque intervention doit avoir lieu dans le cadre d'un *plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches* (PIDA). C'est un document proposé par le maire, visé par le préfet, qui précise les secteurs concernés par les tirs préventifs, la procédure utilisée, les itinéraires à suivre, les zones interdites, les intervenants et les consignes de tir.

TYPE D'ACTION	AU PIED	A L'EXPLOSIF				EXPLOSEUR A GAZ GAZEX
		A la main	Hélicoptère	Avalancheur	Catex	
MATÉRIEL	Skis, cordes, ARVA, pelle, sonde	Skis, cordelette, luge, ARVA, pelle, sonde	Caisse de rangement des explosifs, inflammateur	Lanceur pneumatique de flèche explosive	Câble tournant transporteur d'explosif	Mélange de propane et d'oxygène dans un tube ouvert
ÉQUIPEMENTS VISÉS	Domaine skiable		Insensible (piste, voirie fermée...)	Domaine skiable	Domaine skiable, voirie	
NIVEAU DE SÉCURITÉ	Très faible pour le pratiquant	Moyen (mais variable)	Moyen (mais variable)	Bon	Bon	Très bon
NIVEAU DE COÛT INVESTISSEMENT	Très bon marché			Moyen	Cher	Très cher
	Moyen		Très cher	Cher	Cher	Moyen
AVANTAGES	Plutôt facile (avec organisation rigoureuse préalable)		Pratique	Bonne précision, discret	Plusieurs couloirs parallèles ou sur deux versants	Pas d'explosifs ; gestion facile
INCONVÉNIENTS	Très dangereux	Dangereux (surtout lors des déplacements)	Conditions météorologiques, problèmes du tir	Portée ≤ 2 000 m dénivelée < 600 m	Givre, vent, foudre, gestion, implantation	1 couloir par tube, très grand froid, foudre, PIDA, consigne de tir
		Usage d'explosifs, réglementation (PIDA, consigne de tir, CPT, habilitation)				
EFFICACITÉ	Faible	Moyenne (mais variable)			Bonne	Très bonne

Les diverses procédures sont :

• *déclenchement manuel* : la charge est positionnée à la main par l'intermédiaire d'une cordelette jetée dans la pente. L'explosion a lieu sur le manteau neigeux et est d'une efficacité moyenne. Son coût de revient est très faible mais une telle méthode n'est pas tout le temps possible (mauvaises conditions ou accès difficiles). La sécurité du pisteur n'est pas toujours garantie ;

• *avalancheur* : il s'agit d'un lanceur pneumatique de flèches explosives. La portée est comprise entre 900 et 2 000 m pour une dénivelée maximale de 600 m. La flèche explosive est un tube d'environ 1,8 mètre de long contenant un mélange liquide explosif de 2 kg (inerte au bout d'une dizaine d'heures de non-utilisation) et explose juste avant d'atteindre le sol (efficacité maximale). Le lanceur coûte 140 000 francs environ ;

• *CATEX* : il s'agit d'un câble tournant soutenu par des pylônes, qui permet de positionner quelques kilogrammes d'explosif juste au-dessus du manteau neigeux et dans plusieurs couloirs proches (de 5 à 20). Très largement employé en France depuis bientôt vingt ans (plus de 160 installations), c'est un investissement lourd (500 000 francs par kilomètre) surtout utilisé pour la protection des pistes de ski et de certaines routes. Il est maintenant très concurrencé par le GAZEX (voir comparatif dans [12]) ;

• *GAZEX* : c'est une installation apparue en 1988. Elle est constituée d'un tube ouvrant vers l'extérieur, où est enflammé un mélange détonant de propane et d'oxygène. L'onde de pression[15] créée peut déclencher une accumulation instable. Il existe à la fin 1997 plus de 260 tubes explosifs en France. C'est un dispositif d'emploi peu onéreux, très souple et discret (si ce n'est le bruit) mais demandant un investissement conséquent (400 000 francs par unité) ;

• *hélicoptère* : son utilisation est marginale mais s'étend petit en petit. Son principal handicap est qu'il ne peut pas intervenir par tout temps et qu'il n'est autorisé qu'à titre expérimental.

15. Pour 3 m³, la règle estime que la pression doit être supérieure 25 mB sur un rayon de 60 m.

2.4. Le zonage

La meilleure stratégie de protection contre les avalanches consiste à installer l'équipement hors de la zone dangereuse, ce qui a été traditionnellement réalisé par le montagnard dans le choix de son habitat. Il s'agit dès lors de rechercher l'aire d'emprise maximale de l'avalanche. Mais de nos jours, les activités modernes (ski, circulation...) qui s'imposent dans des zones à risques, exigent la prévention et la gestion du risque d'avalanche. Le zonage est alors utilisé dans l'analyse du site, dans la prospection de secteurs aménageables, dans l'étude des protections... Les procédures en usage actuellement sont variées.

2.4.1. Bases d'informations

Des fichiers informatisés liés à deux procédures distinctes, l'enquête permanente des avalanches et l'observation permanente des avalanches (EPA, OPA) constituent la base des informations nécessaires au zonage du risque. La carte de localisation probable des avalanches (CLPA) offre une représentation cartographique des zones soumises aux avalanches et situe les dispositifs paravalanches déjà en place (cf. ch. 6). La CLPA constitue un inventaire des couloirs pour lesquels on a relevé des témoignages d'événements avalancheux dans le passé ; il ne s'agit donc pas d'un zonage du risque.

2.4.2. Les plans de zonage

Il existe des procédures spécifiques à l'initiative du préfet qui permettent de définir des zones à risque(s) échelonnées en différents niveaux : le *plan d'exposition aux risques* (PER), le *plan des zones exposées aux avalanches* (PZEA) et la procédure R111-3 (du nom de l'article afférent dans le Code des communes). Une réforme a récemment établi des *plans de préventions des risques* (PPR). Après enquête publique et arrêté préfectoral, les plans sont opposables aux tiers, c'est-à-dire contraignants dans l'aménagement d'un site. Ces deux documents sont composés d'une carte cadastrale (du 1/1 000 au 1/10 000) avec représentation zonale du risque (rouge : construction interdite, bleue : construction réglementée, blanche : aucune restriction vis-à-vis du risque) et d'un rapport.

• *Plan d'exposition aux risques* : défini en vertu de la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 et du décret n° 84-328 du 3 mai 1984, confirmé par la "loi montagne" (en date du 9 janvier 1985, article 78) il s'agit d'une localisation de tous les risques naturels prévisibles (inondation, mouvement de terrain, éboulement, séisme, avalanche...) en définissant un zonage parcellaire général à l'échelle de la commune et en définissant un certain nombre de points à respecter (conditions et prescriptions de protection, règlement précisant la servitude selon le risque et la nature de la construction). En outre, le PER a un effet rétroactif (assoupli par un décret de mars 1993). En France, en 1992, moins de 1 000 communes sur 10 200 exposées étaient pourvues de ce document. Le coût (environ 170 000 francs) et la lourdeur de la procédure sont les freins au développement du PER, en particulier en montagne où les aléas sont multiples [17]. C'est pourquoi la procédure des PPR, plus souple et donc plus adaptable à chaque cas particulier, est maintenant préconisée.

• *Plan des zones exposées aux avalanches* : le risque analysé dans ce document est limité aux avalanches. Le PZEA s'intègre dans la procédure de délimitation de périmètres de risque naturel, conformément au code de l'urbanisme (article R 111-3, circulaire n° 74-201 du 5 décembre 1974, décret n° 77-1281 du 22 novembre 1977) ; il est utilisé dans le plan d'occupation des sols[16] (POS), si ce dernier existe. A ce titre, le département de l'Isère est un exemple intéressant car il a essentiellement basé son zonage du risque d'avalanche sur l'application de l'article R111-3. Après enquête publique, un arrêté municipal ou préfectoral (article L-122.1) le rend public (l'arrêté préfectoral est opposable aux tiers).

16. Le plan d'occupation des sols fixe à moyen terme, en vertu de la loi n° 83-8 du 7 janvier 1983 et du décret n° 83-813 du 9 septembre 1983, les règles générales et les servitudes d'utilisation des sols applicables aux parcelles de terrain.

Il comprend un zonage parcellaire des secteurs urbanisés de la commune, répondant aux mêmes critères que dans un PER (rouge/bleu/blanc) et un règlement (mesures de police, prescriptions sécuritaires, architecturales...). Les communes exposées aux avalanches sont largement pourvues de PZEA.

• *Plan de Prévention des Risques* : les difficultés de mise en œuvre des PER (moins du quart des communes traitées après 12 ans pour un coût exorbitant), plus qu'une remise en cause de la procédure, ont justifié une réforme du dispositif concernant la prévention des risques naturels. La loi du 2 février 1995, dite "loi Barnier", réorganise le droit des risques qui trouvait sa source dans deux lois fondamentales du 13 juillet 1982 (loi d'assurance) et du 22 juillet 1987 (loi de prévention et de secours). La loi de 1995 concerne trois aspects liés à la prévention : elle consacre la "notion d'urgence" pour répondre de manière immédiate à un risque inéluctable de catastrophe ; elle vise à assurer un meilleur entretien des cours d'eau pour prévenir les crues, et surtout elle simplifie les procédures de prévention par l'instauration de *plans de prévention des risques naturels prévisibles* (PPR) qui sont substitués aux PER et à toutes les autres réglementations de prise en compte des risques naturels. Les PPR s'appuient sur une procédure simplifiée (possibilité de ne prévoir que les mesures les plus urgentes et de compléter les plans ultérieurement, possibilité de dispositions conservatoires immédiates en matière d'urbanisme, procédure prévue d'exécution d'office des travaux, etc.). Ils peuvent intégrer toutes les dispositions relevant des documents auxquels ils se substituent. L'objectif visé est de doter d'ici à l'an 2000 les deux mille communes les plus exposées grâce à une dotation de crédits portée à 40 millions de francs pendant cinq ans.

2.5. Un exemple : l'aménagement de Taconnaz

2.5.1. Le contexte

Le hameau de Taconnaz, dans la vallée de Chamonix, s'étend entre 1 000 et 1 050 m d'altitude près de la "route blanche", entre les communes des Houches et de Chamonix. Le 20 mars 1988, une avalanche coulante partant du glacier de Taconnaz et s'écoulant le long du ravin de même nom, touche et détruit plusieurs maisons dans le haut du hameau. Au mois de février, une avalanche majeure a déjà concerné le site. Quoique l'activité de ce couloir soit régulière, le phénomène a surpris par son ampleur : la masse mobilisée a été estimée (pour les deux événements) à environ 600 000 m^3, le dépôt avait une hauteur atteignant 17 m. Les communes de Chamonix et des Houches ont décidé conjointement d'entreprendre la construction d'un dispositif paravalanches pour protéger le hameau de Taconnaz et la route nationale [18].

2.5.2. Analyse du risque

Comme on l'a décrite dans le chapitre 5, l'analyse du risque s'articule autour de cinq étapes principales :

❶ *Le site* : le couloir de Taconnaz menace les habitations (plusieurs hôtels), voire la nationale desservant le tunnel du Mont-Blanc et la ville de Chamonix. Le site est complexe : la zone d'accumulation s'étend largement sur le glacier de Taconnaz, qui bute partiellement vers 3 100 m contre une barre rocheuse importante qui soutient le glacier des Bossons ; les deux glaciers sont très crevassés et se joignent vers 3 300 m sous l'aiguille du Goûter (3 863 m) pour former la face nord du dôme du Goûter (4 304 m). Dans le haut du glacier de Taconnaz, la surface concernée lors d'un départ d'avalanche représente alors entre 50 et 250 ha en pente raide. La zone de transit, longue de moins de 2 kilomètres, canalisée entre la montagne de la Côte et la crête du Bélachar, emprunte le couloir du gros

torrent du Taconnaz (un deuxième couloir, moins marqué, existe dans ce ravin). Elle débouche sur la zone de dépôt, large (plus de 20 ha) et de faible pente (voisine de 15°). Le lieu-dit s'appelle les Lanches, ce qui indique que les anciens se sont méfiés de ce secteur. L'activité humaine y est surtout liée à l'élevage (pâturage) mais aussi au tourisme : présence d'hôtels, de chalets et, plus en marge, du télésiège des Bossons. Des digues de protection avaient déjà été construites auparavant. A côté des contraintes imposées par le site (contexte haute montagne, dimensions importantes...), il y a aussi des contraintes politiques afin de circonscrire au maximum l'emprise cadastrale des travaux (coût du terrain, forte urbanisation de la vallée...).

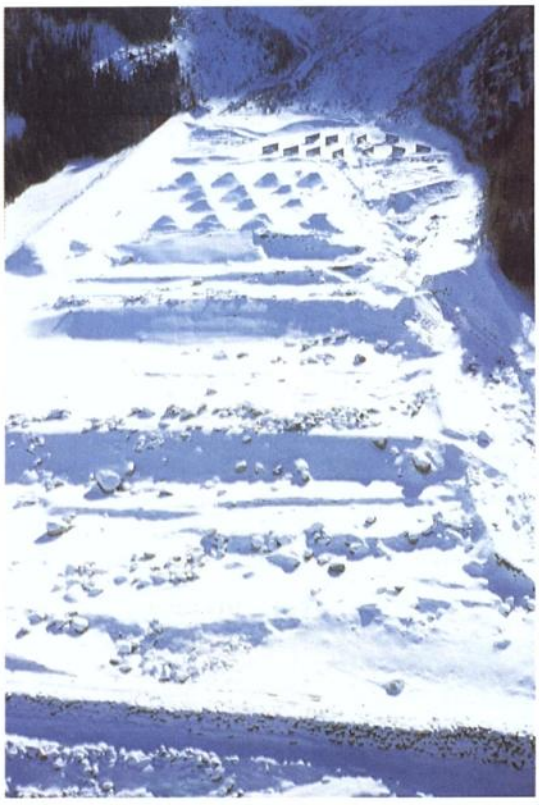
❷ *Description des scénarios majeurs* : le couloir connaît une activité régulière. Récemment deux avalanches importantes s'y sont produites : le 20 mars 1988 (coulante ; il y avait eu un événement précédent en février) et le 17 février 1990 (mixte), encore plus importante (1 000 000 m^3). Le couloir du Taconnaz peut produire aussi des aérosols, sans doute parmi les plus importants en France. La présence de séracs peut servir de détonateur. Dans les deux avalanches mentionnées, on a en effet trouvé de nombreux blocs de glace, mais on n'a pas pu déterminer si l'avalanche avait été déclenchée à la suite d'une chute de séracs ou si elle les avait entraînés.

❸ *Détermination de l'avalanche majeure* : conformément aux souhaits du maître d'ouvrage (les communes concernées), c'est l'avalanche du 20 mars 1988 qui servit d'aléa de référence pour l'étude. Il s'agit donc d'un écoulement coulante. Le dispositif aura donc une efficacité partielle contre un aérosol ; il faut vérifier en tout cas que le dispositif n'amplifie pas les effets d'un éventuel aérosol.

❹ *Sélection d'une stratégie de protection* : compte tenu du contexte (zone d'accumulation sur glacier = pas de défense permanente active, pas de CATEX ni GAZEX, ampleur des phénomènes...), on adoptera une stratégie de défense permanente passive dont le principe se résume par : freinage-stockage-arrêt-exutoire.

❺ *Conception du dispositif paravalanche* : le dispositif s'articule autour des différents points suivants :

- dispersion/freinage : on étale au maximum (à l'aide des dents déflectrices) et on freine l'écoulement dense (par une combinaison de dents et tas freineurs) tout en gardant un effet de canalisation avant de maîtriser la direction d'écoulement : il faut donc à la fois freiner, réguler et contenir l'écoulement (constructions de 2 digues latérales). Le dimensionnement et le positionnement des systèmes de freinage sont primordiaux pour assurer l'efficacité de cette étape. 11 dents déflectrices, 14 tas freineurs, une digue déviante ont été construits ;
- stockage : à l'aval du précédent dispositif on prévoit une aire de stockage consistant en une succession de trois terrasses, en rive droite du torrent, déversant légèrement vers l'ouest (direction des Houches) et permettant de stocker un volume au moins équivalent à l'avalanche de référence. Une digue « baïonnette » essaye de séparer les écoulements avalancheux (vers les aires de stockage) de ceux du torrent (lave torrentielle) ;
- arrêt : il faut arrêter définitivement l'avalanche et l'empêcher de dépasser les deux digues pré-existantes. Une digue frontale a été réalisée ;
- exutoire : il a été construit une longue digue latérale haute d'une dizaine de mètres (côté Chamonix) et la digue latérale côté les Houches a été rehaussée ; des ouvertures ont été aménagées dans le lit du torrent. Le rôle de l'exutoire est de guider le débordement en cas de débordement (dans le cas d'un volume exceptionnel).



Vue aérienne du dispositif de Taconnaz en février 1992. Le coût a été de l'ordre de 25 millions de francs.
Cliché C. Charlier.

2.5.3. Les limites du dispositif

Le dispositif de Taconnaz a été conçu en fonction d'un aléa de référence donné ; de ce fait, il ne peut pas être considéré comme parfait. Par ailleurs, tout le système construit n'est valable que pour des écoulements denses (avalanche coulante ou partie dense d'une mixte) et perd de son efficacité pour un aérosol. Le couloir de Taconnaz peut en produire d'importants à l'instar du couloir des Favrands (voir chapitre 5, § 1). Dans ce cas extrême, des dégâts sont possibles.

2.6. Les situations de crise

2.6.1. Un exemple : Tignes en février 90

En février 1990, après un début extraordinairement sec [19] sur l'ensemble des Alpes, l'anticyclone s'effondre à partir du samedi 10 février 1990, pour laisser place à une perturbation océanique extrêmement violente. Après plus de six semaines de beau temps, le manteau neigeux est épais de 30 cm de neige (à Tignes, 2 100 mètres) et composé de gobelets, surmontés d'une croûte de regel (formée entre le 6 et 7 février). En 72 heures, il tombe 108 cm de neige à 2 100 m. La neige est froide et tombe jusqu'en basse altitude (vers 800 m) accompagnée de forts vents. Des avalanches partent spontanément et occasionnent de nombreux dégâts (gare du télésiège des Lanches, piscine de la Grande-Motte). Entre le 13 et le 14, les températures remontent mais les précipitations de neige continuent (50 cm de cumul à 2 100) en altitude. Dans la nuit du mercredi 14, une avalanche partant du versant nord de Lognan, endommage un chalet. Le mercredi 14, à Val-d'Isère, le chalet de l'UCPA est une nouvelle fois touché. Il le sera encore le lendemain. Dès le matin, une commission déclenche les premières mesures de police ; 400 personnes sont évacuées. Le centre de météorologie publie leur bulletin spécial avalanche. Le risque est maximal, il le restera pendant 3 jours. Une cellule de crise est mise en place par le préfet de Savoie le jeudi 15. Tout le monde songe aux hivers catastrophiques de 1970, 78, 81. Le chassé-croisé des vacanciers ne fait qu'accroître les problèmes. Toujours le mercredi, à

Tignes, les râteliers inférieurs de la Sache se purgent naturellement et l'avalanche touche une piste de ski ; plusieurs chalets sont endommagés par d'autres avalanches spontanées ou déclenchées. Dans l'après-midi, la gare aval du Télésiège du Marais et la gare amont du télécabine de la Sache au-dessus des Brévières sont partiellement détruites. Avec le redoux, la limite pluie/neige remonte vers 2 500 m. Le jeudi 15, de nombreuses avalanches de fond se déclenchent spontanément : quelques pistes, immeubles, parkings sont touchés. La situation devient confuse : les services des stations ou de l'Équipement ne savent pas s'il est opportun de déclencher localement ou non. Les accès en haute Tarentaise sont bloqués. Le cumul de neige est alors de 276 cm à 2 100 m. Le vent a localement accumulé des quantités considérables. Le vendredi 16, une accalmie provisoire permet de parer au mieux, de sécuriser les pistes et de nombreuses zones. Les spécialistes dépêchés par la préfecture effectuent des sondages : la situation semble rapidement s'améliorer. Les tirs préventifs commencent à devenir négatifs. Le samedi 17, les routes sont progressivement ouvertes. Le beau temps revient le dimanche [20-22].

2.6.2. Les procédures

Face à une situation de crise, il existe trois niveaux de plans de secours :

- *au niveau de la commune*, le maire a tout pouvoir dans la direction des secours (article L 131-1, Code des communes) : interdiction d'accès, déclenchement préventif, évacuation, premiers secours... Si la crise s'aggrave, le maire peut appeler l'autorité supérieure ;
- *au niveau préfectoral*, si la crise concerne plusieurs communes ou si le préfet le juge nécessaire dans une commune (art. L 131-13 ou article 5 de la loi 87-565 du 22 juillet 1987), ce dernier peut élaborer et déclencher un *plan d'organisation des secours* (ORSEC), qui regroupe les moyens publics et privés habilités à agir selon un organigramme précis ;
- le *plan de secours spécialisés* (PSS) est un plan d'urgence lancé par le préfet pour compléter des secours.

3. Autres problèmes liés à la neige

3.1. Transport de neige par le vent et viabilité hivernale

Le transport de neige par le vent entraîne la formation de congères et une diminution de la visibilité sur les routes. Les zones de montagne et de plateaux sont annuellement confrontées à ce problème. Pour lutter contre ces nuisances, il existe plusieurs moyens plus ou moins largement utilisés[17] [8, 23] :

- modification du profil de la chaussée, aménagement des routes : 16 % ;
- action de déneigement : 77 % ;
- transformation de l'environnement : 7 %.

3.1.1. Modification du profil de la chaussée, aménagement

Il s'agit par divers moyens d'éviter que la neige transportée par le vent ne se dépose sur la chaussée. Les principes sont identiques quelle que soit la parade adoptée :

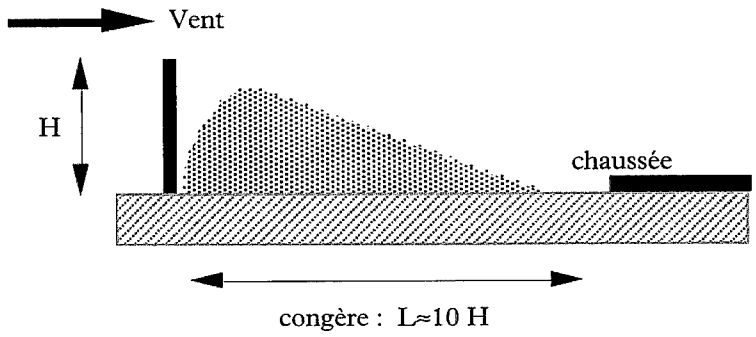
- lutter contre la création de zones mortes (tourbillonnaires) en diminuant les effets de sillage créés par un obstacle ;
- empêcher que la neige soit transportée ;
- stocker la neige transportée.

A cet effet, plusieurs actions sont possibles :

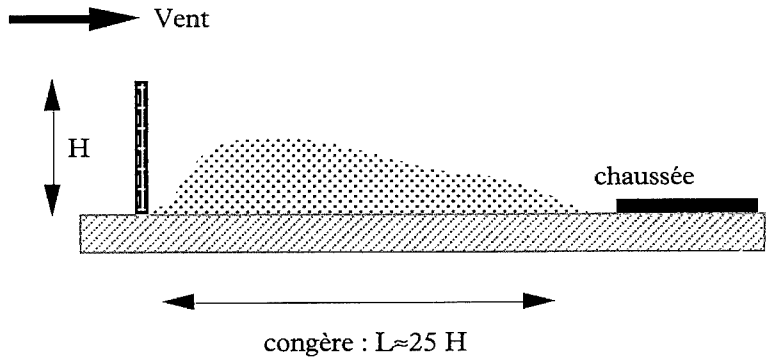
☞ Ouvrages à vent : il s'agit d'ouvrages qui, en modifiant localement le comportement du vent, forcent la neige à se déposer. Il en existe deux sortes :

17. Chiffres cités d'après enquête auprès des subdivisions de l'Équipement [8].

– les ouvrages imperméables : il se crée des zones mortes où la neige piégée se dépose ;
– Les ouvrages perméables : le vent passe au travers du dispositif. Pour quantifier le degré de perméabilité, on introduit un indice de porosité (rapport de la surface vide sur la surface totale). La majeure partie des systèmes utilisés ont une porosité comprise entre 40 % et 60 % ; cette plage de valeurs s'avère en effet la plus efficace dans le but recherché (congère longue et peu épaisse). On aménage également un espace libre (environ 20 % de la hauteur totale) entre le sol et le tablier, appelé *garde au sol.* Le vent qui s'y engouffre empêche le dépôt de neige au niveau de l'ouvrage, qui pourrait obstruer les mailles et arrêter l'écoulement d'air.



➡ Figure 3. Effet dû à une barrière imperméable. D'après [8].



➡ Figure 4. Effet dû à un obstacle poreux sans garde au sol. D'après [8].

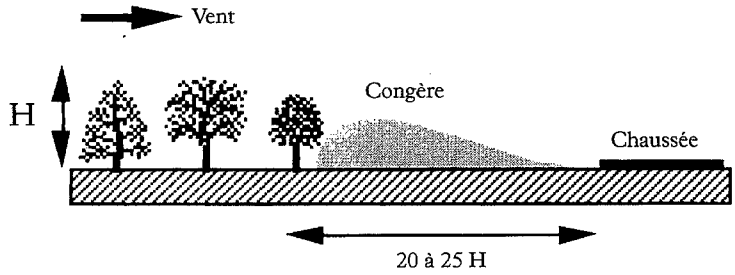
Les spécifications de conception (l'inclinaison par rapport au sol, la hauteur, la longueur, la garde au sol, la porosité, etc.) sont fixées dans le cadre de la norme française P 95 305 ; en fonction de la stratégie adoptée, on peut compléter le dispositif en fixant la zone d'implantation, l'orientation de l'ouvrage, le type d'ancrage... On distingue plusieurs types d'ouvrages (cf. § 2.2) :

- *barrière à neige ;*
- *toit-buse ;*
- *vire-vent.*

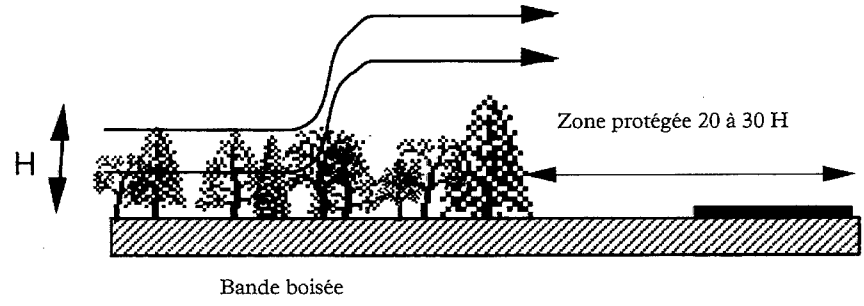
☞ *Végétalisation :* il s'agit de planter des arbres ou des arbustes qui empêchent la formation des congères. Pour que le dispositif soit efficace, il faut que le vent souffle perpendiculairement à l'axe de la plantation. Selon l'importance du boisement à créer, on aura différentes catégories de protection :

- la *haie brise-vent* : son rôle est analogue à une barrière à neige en créant une zone de dépôt. Une haie comporte au plus cinq rangées successives de feuillus. Il faut veiller à émonder les branches inférieures afin de ménager une garde au sol.
- la *bande boisée* : on parle de bande boisée lorsqu'il y a plus de cinq rangs d'arbres, soit une largeur en moyenne supérieure à 15 m. En s'engouffrant dans cette zone, l'air décélère, perd de son humidité et dépose de la neige, qui y est

stockée. En revanche, elle peut aussi être un facteur favorable à la formation de verglas. Il faut absolument éviter les trouées (lignes d'électricité, pâturage...) qui canaliseraient l'air comme un entonnoir.



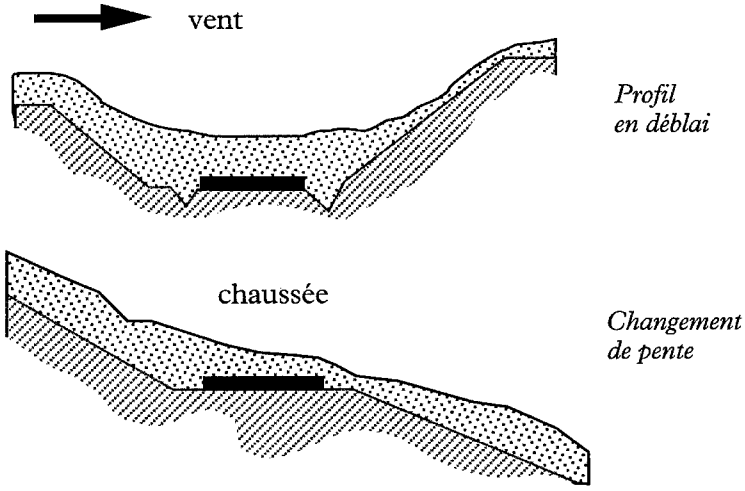
➟ Figure 5.
Rôle d'une haie brise-vent. D'après [8].



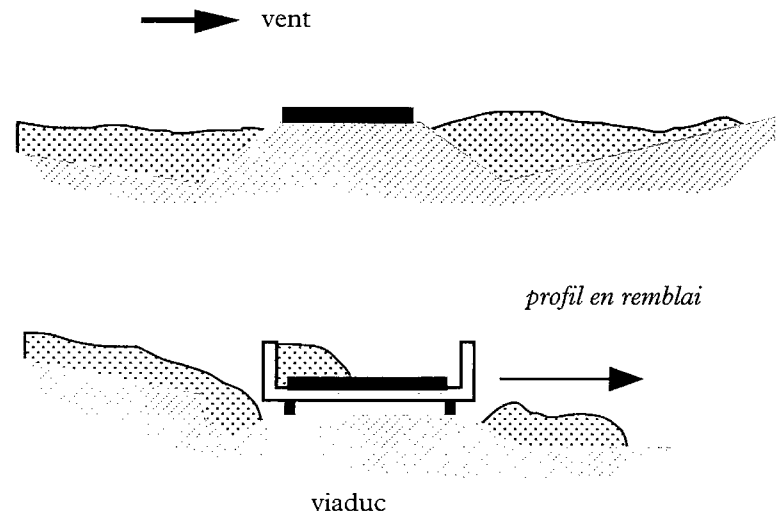
➟ Figure 6. Effets d'une bande boisée. D'après [8].

☞ *Aménagement de la route* : il s'agit de modifier le tracé de la chaussée pour réduire la naissance et le développement de congères. Il convient d'éviter des profils en déblai, ou des changements de pentes brusques. On fait attention à l'effet de sillage dû à des obstacles naturels ou non (pile de pont, écran anti-éblouissement...). On favorise au contraire un relèvement de la chaussée (remblai), un adoucissement des ruptures de pente. Dans des zones particulièrement difficiles, on peut envisager la construction d'ouvrages spécifiques comme :

- galerie ;
- tunnel ;
- viaduc.



➟ Figure 7. Profils propices au développement des congères. D'après [8].



➟ Figure 8. Aménagements en vue de réduire les congères. D'après [8].

3.1.2. Les actions de déneigement

Il s'agit par des moyens mécaniques (lame biaisée, étrave, fraise, voire tracteur ou bulldozer) de déneiger la route (précipitations ou congères). Dans des régions où la formation de congères entravant la circulation routière est peu fréquente, ce genre d'action est le plus utilisé. Pour des zones de montagne, un engin est capable d'ouvrir une route enneigée à cause de chutes de neige ou du vent. En revanche, ce type d'action n'offre aucun remède contre la perte de visibilité lors d'épisode venteux (saltation), qui est souvent à l'origine de la fermeture d'une route. Par ailleurs, le passage répété d'engins crée le long des côtés de la route des bourrelets (cordons de déneigement), qui favorisent la naissance rapide de congères. A titre d'exemple, on donne le coût d'opérations de déneigement en fonction de l'engin utilisé (à partir d'une enquête du CETE [8]) :

Engin utilisé	Hauteur de la congère	Vitesse de déneigement	Coût au kilomètre
étrave	h<50 cm	15 km/h	300 F/km (TTC)
fraise	50<h<150 cm	2 km/h	2 500 F/km

3.1.3. Transformation de l'environnement

Cette opération consiste à reboiser des surfaces importantes dans la zone d'ablation pour éviter l'érosion éolienne de la neige. Un réseau d'arbres (à la manière du bocage normand), un boisement diffus (nombreux bosquets) sont suffisants à freiner et fixer la neige ; néanmoins, il faut des surfaces suffisamment importantes et les cas de reboisement pour lutter contre les congères sont rares.

3.2. Neige et constructions

3.2.1. Nature des problèmes

La neige peut être une source de nuisance pour les bâtiments en montagne, plus rarement en plaine : formation de congères qui obstruent les accès mais surtout surcharge des toitures, ce qui peut occasionner d'importants dégâts comme les chutes de neige du 8 au 13 décembre 1990 dans la vallée du Rhône (cf. § 1.3). Il existe des normes de construction françaises : les règles N.V. 65 et N.84 (applicables depuis 1986) indiquent les valeurs de charge que doivent supporter les toitures, selon les régions et l'altitude (indiquées par la carte Neige : quatre régions A, B, C et D) et la nature du bâtiment (habitat, serre...).

3.2.2. Normes en vigueur

On indique dans le tableau suivant les valeurs de charge (en daN/m²) d'après le règlement N.84 et pour comparaison les normes suisses SIA [9] :

Altitude	région A	région B	région C	région D	SIA
200	60	75	90	130	-
400	95	110	125	165	-
600	150	165	180	220	-
800	235	250	265	315	-
1 000	320	335	350	390	370
1 200	400	415	430	470	515
1 400	485	500	515	555	685
1 600	595	610	625	665	885
1 800	725	740	755	795	1 110
2 000	860	875	890	930	1 360

Pour Rhône-Alpes :
+ région B : Ain, Allier, Haute-Savoie, Isère, Savoie ;
+ région C : Ardèche, Drôme.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] L. REY : *La neige, ses métamorphoses, les avalanches* (1986, ANENA, Grenoble) 214 p.
[2] M.-C. BUSSET et P. SCHOENEICH : *Stratégies traditionnelles face au danger d'avalanches*, Comptes rendus du Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen (1996, Tagungpublikation) 255-264.
[3] B. SAILLET : *Le service de restauration des terrains en montagne, la neige et les avalanches*, Comptes rendus du Symposium de Chamonix, Chamonix (1991, ANENA) 46-49.
[4] M. CAMPAGNE : *Les travaux de défense contre les avalanches dans la vallée de Barèges* (1905, Imprimerie Nationale, Paris).
[5] A. GUISLAIN : *La lutte contre les avalanches en Suisse*, Revue des Eaux et Forêts (1947).
[6] L. DE CRÉCY : *L'ANENA a vingt ans*, Neige et Avalanches **56** (1991) 12-16.
[7] J. SAUNIER : *Mission interministérielle d'étude sur la sécurité des stations de montagne*, Rapport interministériel (1970).
[8] F. NAAIM et G. BRUGNOT : *Transport de neige par le vent, connaissances de base et recommandations* (1992, Cemagref, Grenoble).
[9] J. P. NAVARRE : *La neige et les constructions*, Neige et Avalanches **58** (1992) 3-11.
[10] K. KRISTER : *Snow avalanche accidents in Norway*, Comptes rendus du Symposium de Chamonix, Chamonix (1991, ANENA, Grenoble) 92-100.
[11] F. SIVARDIÈRE et F. VALLA : *Évolution des accidents d'avalanche en France de 1971 à 1994* Comptes rendus de 'Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace, et avalanche', Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 13-18.
[12] M. GAY et F. RAPIN : *A propos du déclenchement artificiel : comment choisir entre CATEX et GAZEX?* Comptes rendus du Symposium de Chamonix, Chamonix (1991, ANENA).
[13] C. CHARLIER : *L'expertise du risque d'avalanche*, Comptes rendus de 'International Symposium on Avalanche Control', Nagaoka (1991).
[14] F. RAPIN : *Un récapitulatif des techniques françaises de protection paravalanche*, Rapport interne (1994, Cemagref, Grenoble).
[15] F. RAPIN : *Un récapitulatif des techniques françaises de protection paravalanche*, Neige et Avalanches 55 (1991) 24-27.
[16] R. MIDI-PYRÉNÉES : *Gestion forestière et risques naturels, Pyrénées centrales*, Rapport interne (1994, ONF, Toulouse).
[17] J.-P. GOUT : *Prévention et gestion des risques majeurs, les risques d'origine naturelle* (1993, Eyrolles, Paris) 304 p. Voir aussi L. BESSON : *Les risques naturels en montagne* (1996, Artès Publialp, Grenoble) 438 p.
[18] C. CHARLIER : *Le dispositif paravalanche de Taconnaz*, Comptes rendus du Symposium de Chamonix (1991, ANENA) 17-24.
[19] J. P. NAVARRE, J. VILLECROSE, E. PAHAUT et J. KÖNIG-BARDE : *Caractères exceptionnels de l'enneigement du début de l'hiver 1989/90*, Neige et Avalanches **53/54** (1991) 15-23.

[20] B. FOUCHER : *Situation avalancheuse exceptionnelle, épisode du 10 au 16 février 1990*, Comptes rendus de l'Université d'été sur les risques naturels, Chamonix Cemagref, coordonné par l'ANENA (1995, Cemagref) 19-22.
[21] C. FORGET : *Les Alpes dans la tempête*, Neige et Avalanches **51** (1990) 2-3.
[22] C. CHARLIER : *La crise 'neige'de février 1990 en Tarentaise : une relation simplifiée des faits*, Comptes rendus de l'Université d'été sur les risques naturels, Chamonix Cemagref, coordonné par l'ANENA (1995, Cemagref) 19-22.
[23] F. SIVARDIÈRE et T. CASTELLE : *Les ouvrages à vent*, Neige et Avalanches **60** (1992) 16-23.

Chapitre 9
PRÉPARATION D'UNE SORTIE EN MONTAGNE

L'objet de ce chapitre est de donner les divers éléments qui permettent de préparer une course en montagne (à skis, à raquettes). L'accent a surtout été mis sur la sécurité et la nécessité de s'entraîner à un certain nombre de techniques : sont abordés ici les problèmes liés à l'orientation, au choix de la course en fonction des conditions nivo-météorologiques et des participants, à la consultation du bulletin neige et avalanches, aux bivouacs, et à la manipulation de l'ARVA.

1. LA LECTURE DE LA CARTE ET L'ORIENTATION (À SKIS)*

Ce paragraphe résume les principes de lecture d'une carte qui sont essentiels pour pouvoir s'orienter sur le terrain et pour prévoir son itinéraire. Dans un premier temps, on rappelle quelques notions simples sur la topographie et le matériel associé. Cette première partie peut être sautée par le lecteur initié. Ensuite la méthode classique de l'azimut est explicitée rapidement car si elle constitue la base de l'orientation, elle reste moins efficace dans le cadre d'une pratique hivernale [1-3]. Enfin, est abordée la méthode de la tangente à la courbe, qui est plus particulièrement adaptée et recommandée pour des skieurs[1]. On peut d'ores et déjà préciser que les objectifs de ces deux techniques sont différents : la méthode de la tangente à la courbe permet de déterminer l'endroit où l'on se trouve tandis que la méthode de l'azimut indique un cheminement à suivre. A ce titre, on peut dire qu'elles sont complémentaires.

1.1. Le matériel nécessaire

L'orientation sans visibilité suppose un travail très précis dans des conditions souvent difficiles (humidité, vent, tempête, fatigue, stress). L'efficacité passe d'abord par l'utilisation d'un matériel performant étudié dans le moindre détail.

1.1.1. La carte

En France et dans les pays voisins, on dispose la plupart du temps de cartes au 1/50 000 et au 1/25 000. Ces dernières sont les seules à permettre une navigation vraiment précise car elles représentent tous les détails du relief. Toutes les cartes ne sont pas de qualité équivalente en précision ou en type de représentation et il est capital de connaître le crédit que l'on peut accorder à la carte que l'on possède. Ce n'est pas chose facile, mais on peut retenir que les cartes se classent *grosso modo* comme suit, des meilleures aux moins bonnes : suisses, françaises, autrichiennes et allemandes, italiennes, espagnoles. Certaines cartes sont surchargées d'itinéraires à skis très utiles, mais dont il faut bien connaître les limites : les difficultés indiquées sont parfois très subjectives, et en tout cas variables selon les conditions. Bien entendu, en aucun cas un itinéraire tracé ne signifie qu'il y a absence de danger, même s'il est classique. Enfin on trouve parfois des erreurs importantes, éventuellement dangereuses.

1.1.2. La boussole

Il en existe de nombreux modèles, plus ou moins sophistiqués. Le modèle le plus simple, à bain d'huile et à base transparente, convient parfaitement, à condition qu'il soit à cadran mobile. Éventuellement, un côté peut être gradué en mil-

* Par Claude REY.

1. La plupart des parties de cette section sont extraites de l'article de Claude REY paru dans *La Montagne et Alpinisme*, 1987, n° 4 : "Orientation sans visibilité à skis"

limètres. Si l'on doit l'utiliser dans un pays à forte déclinaison magnétique, on peut choisir un modèle à affichage de déclinaison. Pour une utilisation en plaine, on peut préférer une boussole avec miroir de visée (inutile en montagne si l'on utilise les techniques exposées plus loin). La boussole à boîtier fermé, type armée suisse, considérée comme l'une des meilleures, est assurément la moins bonne : chère, peu pratique à ouvrir avec de gros gants, elle n'est pas transparente et le report d'angles sur la carte est difficile.

1.1.3. L'altimètre

Il existe de nombreux modèles, plus ou moins précis et plus ou moins pratiques. Le Thommen (mécanique) et l'Alti plus (électronique) sont des références, mais il existe plusieurs modèles acceptables sous forme de bracelets-montres. Attention cependant à la variation d'indication d'altitude en cas de changement de température : il est nécessaire d'utiliser un modèle "compensé en température". Par ailleurs, il est très utile de posséder un altimètre pouvant indiquer, lorsqu'on se trouve à une altitude connue, la pression ramenée au niveau de la mer (aux environs de 1 013 hPa).

1.1.4. Les accessoires

Un crayon peut éventuellement servir à annoter la carte ou tracer un itinéraire. Une pochette en plastique transparent, fermée par un velcro ou un zip, est indispensable par vent violent ou en cas de neige, pour protéger la carte. Plusieurs modèles existent dans le commerce, seuls quelques-uns sont suffisamment grands et parfaitement transparents. Un simple sachet plastique ne suffit pas. Enfin, bien que cela n'ait qu'un rapport lointain avec l'orientation, il faut mentionner le masque de ski, à double écran, pour éviter la buée, et qui permet, par grand mauvais temps, de se faire une idée du relief environnant. Le rapporteur est totalement inutile. Il fait double emploi avec la boussole, qui permet le relevé d'angles de 0 à 360°, contre la moitié seulement pour le rapporteur classique. La règle graduée n'est pas vraiment utile, mais il existe des règles, qui par justaposition sur la carte, permettent de lire l'inclinaison des pentes (voir 1.2.1.).

1.2. La lecture de carte

De même que l'on ne peut saisir le sens d'un texte sans savoir lire, on ne peut utiliser aucune méthode d'orientation si l'on n'est pas capable de lire une carte, c'est-à-dire d'imaginer le relief du terrain en regardant la carte. L'idéal est, après avoir étudié la carte chez soi, d'arriver en terrain inconnu avec une sensation de déjà vu. Cette capacité à lire une carte étant absolument fondamentale, on doit s'efforcer de l'acquérir, ou de la développer, jusqu'à obtenir une vision instantanée du relief.

1.2.1. Apprentissage et entraînement

☞ *Lecture instantanée du relief* : le premier point important est de bien distinguer, sans jamais hésiter ni faire d'erreur, les vallons des croupes. Si l'on éprouve quelques difficultés devant cet exercice (si l'on voit par exemple un ruisseau coulant sur une arête !), on peut s'entraîner selon la méthode suivante : on détermine d'abord où se trouvent le haut et le bas de la pente en repérant le fond de la vallée et les sommets (sur les cartes françaises, les nombres indiquant l'altitude des courbes sont orientés vers le haut de la pente. Cela peut être utilisé comme contrôle complémentaire). Les ondulations des courbes de niveau représentent donc des gorges, vallons, creux, ou au contraire des crêtes, croupes, bosses, qu'il faut différencier. On choisit une courbe (2 600 m sur la figure 1), et on place ou on imagine un point à l'intérieur de l'ondulation à étudier. Du fait que l'on sait où se trouvent le bas et le haut de la pente, on sait aussi si le point est plus bas ou plus haut que la courbe. S'il est plus bas (A), il est dans un creux et l'on est en présence d'une combe, alors que s'il est plus haut (B), il est sur une bosse et l'on a donc une croupe.

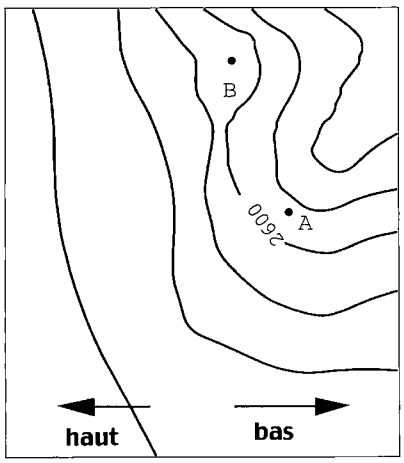


Figure 1 :
exercice de lecture instantanée de la carte.

On peut aussi tracer, à titre complémentaire, les lignes de crête et les lignes de thalweg, comme dans la partie inférieure gauche de la photo. Répéter ces exercices des dizaines de fois conduit au but visé : bien distinguer des vallons et croupes, sans jamais faire d'erreur.

Évaluation des pentes : lorsqu'on a une bonne expérience d'un type de carte, il est possible d'évaluer au premier coup d'œil si une pente est faible, moyenne ou forte, et c'est tout ce qui est nécessaire dans la plupart des cas. Si au contraire, on n'a pas l'habitude de la carte que l'on utilise, ou si l'on estime qu'une pente doit être connue avec précision, on peut utiliser une règle graduée spéciale donnant par superposition avec la carte une lecture directe de la pente au degré près. Attention, cette règle, distribuée par la Banque de Commerce de Soleure en Suisse, est prévue pour être utilisée sur des cartes au 1/25 000 dont l'équidistance des courbes est de vingt mètres. Sur les cartes françaises dont l'équidistance est de dix mètres, il convient de sauter une courbe pour effectuer la mesure de pente. La société Ortovox vend également une règle de ce type. A défaut d'une telle règle, on peut toujours tracer une petite coupe de la pente considérée, mais c'est un travail fastidieux, qui se fait plutôt chez soi, alors que la règle suisse peut s'utiliser à tout instant.

Détermination des altitudes : la vision instantanée de la forme du terrain étant maintenant acquise, on peut commencer l'entraînement par quelques calculs élémentaires, en particulier l'altitude des points non cotés. Il suffit de compter le nombre d'intervalles entre une courbe cotée et le point à déterminer, et de multiplier par l'équidistance des courbes. Attention, il ne faut pas perdre de vue que cet exercice, simple pour ne pas dire simpliste, est très important et doit être conduit avec une précision rigoureuse. Pour rester efficace sur le terrain malgré la fatigue et les conditions difficiles, on doit s'entraîner chez soi jusqu'à acquérir une grande sûreté et une grande rapidité.

Evaluation des distances : de même qu'il est inutile de connaître une pente au degré près, il n'est pas nécessaire de connaître la distance séparant deux points au mètre près. Il est en revanche souvent utile d'estimer grossièrement une distance sans faire une erreur du simple au double, voire au triple. Dans ce but, il faut avoir en tête en permanence, sans avoir à effectuer le moindre calcul, la signification de l'échelle, par exemple, sur la carte au 1/25 000, 1 cm sur la carte représente 250 m de terrain, ou 1 mm représente 25 m sur le terrain.

Tout ce travail de fond peut sembler fastidieux à bon nombre de skieurs qui souhaitent apprendre à s'orienter. Il est néanmoins absolument indispensable ; l'expérience montre que la plupart des gens ayant du mal à s'orienter sont de mauvais lecteurs de cartes, et que, au contraire, les "doués en orientation" savent parfaitement lire leur carte.

1.2.2. Travail préalable à la course

Le travail de fond précédent étant accompli, il existe un certain nombre de précautions à prendre avant d'utiliser la carte sur le terrain :

- *Mémorisation des caractéristiques de la carte* : il s'agit de l'échelle et de sa signification pratique, de l'équidistance des courbes, en vérifiant qu'elle est bien la même sur toute la carte (il arrive, sur des assemblages, ou en zone frontière, qu'il y ait des équidistances différentes d'une partie de la carte à l'autre). Il est aussi important de vérifier la date de dernière mise à jour, pour supputer les éventuelles modifications de sentiers, glaciers, remontées mécaniques, etc. A l'étranger, il est bon de se renseigner sur la qualité et la précision de la carte auprès d'un ami l'ayant déjà utilisée. Toutes ces informations doivent être bien mémorisées avant d'utiliser la carte.
- *Étude de l'itinéraire* : il convient de déterminer avec précision l'itinéraire que l'on va suivre, et éventuellement de le tracer. Il faut bien mémoriser les passages délicats (pentes fortes, crevasses, barres rocheuses, passages obligés, etc.). A skis, on utilise peu les angles de marche et il est inutile d'en tracer.
- *Cas particulier des cartes au 1/25 000 de l'I.G.N.* : sur ces cartes (même sur les dernières éditions), pourtant très précises, les courbes de niveau ne sont pas toujours très lisibles sur les glaciers, et sont à peu près illisibles sur les moraines et éboulis où elles figurent en orange sur fond de gros pointillés noirs. Les trop nombreuses courbes (équidistance 10 m) ajoutent à la confusion. Pour une meilleure lecture (nous entendons par là la visualisation instantanée du relief à la vue de la carte), il est nécessaire de retracer avec un crayon ou un stylo à pointe fine les courbes maîtresses (tous les 50 m) de la zone où l'on va évoluer. On en profitera pour ajouter quelques cotes d'altitude. Ce travail est à faire chez soi, car il est long, très pénible pour les yeux, et demande un excellent éclairage. A noter qu'il est inutile près de la frontière suisse, car on peut acheter les 1/25 000 suisses, qui débordent un peu sur la France et sont bien plus lisibles.

1.2.3. Lecture de la carte sur le terrain

Lorsqu'on arrive sur le terrain après avoir effectué tout le travail ci-dessus, il devient plus facile d'opérer un rapprochement entre ce que l'on voit sur la carte et le relief environnant. Effectuer rapidement et parfaitement ce rapprochement est capital, et conditionne le succès des exercices ultérieurs. Il faut s'y entraîner par bonne visibilité, en orientant la carte et en comparant en permanence carte et terrain, jusqu'à ce que la correspondance entre les deux soit bien claire et évidente. Alors on peut passer à l'orientation sans visibilité. Petite astuce pour faciliter cette phase de l'entraînement : lorsque l'on compare terrain et carte, après avoir orienté cette dernière, on a souvent tendance à tourner involontairement la carte, car il est difficile de tout observer à la fois. Au lieu d'orienter la carte, il vaut mieux à l'aide de la boussole orienter un ski ou si la position est inconfortable, un bâton que l'on pose sur la neige. Il suffit ensuite de juxtaposer visuellement le bord de la carte avec le ski ou le bâton, et de surveiller du coin de l'œil que l'on ne tourne pas.

⚠ Cette orientation de la carte, dont le but, rappelons-le, est d'apprendre à comparer carte et terrain, ne s'effectue pas lorsque l'on utilise l'une des deux techniques suivantes, à savoir angle de marche ou méthode de la tangente à la courbe.

1.3. La méthode de l'azimut

Traditionnellement, c'est la méthode la plus connue et enseignée. Elle est loin d'être la plus efficace sur terrain enneigé, mais elle doit être bien maîtrisée.

1.3.1. Principe

Il s'agit, partant d'un point caractéristique (c'est-à-dire facilement identifiable sur le terrain) A, d'aller à un point caractéristique B, en suivant à l'aide de la boussole une ligne droite dont l'angle par rapport au nord a été déterminé sur la carte. On dit qu'on suit un *angle de marche.*

Une direction est définie par un angle par rapport au nord magnétique. Il existe plusieurs "nord" selon que l'on parle du nord géographique (la direction du pôle Nord), du nord magnétique (celui indiquée par la boussole), ou du nord Lambert (dû au quadrillage des cartes topographiques en coordonnées Lambert). Les angles formés par ces différentes directions sont donnés sur les cartes IGN; il faut savoir qu'ils restent compris en France dans une plage de 3° autour du nord géographique. En pratique, actuellement dans les Alpes et les Pyrénées, on peut négliger la différence entre nord magnétique et nord géographique.

1.3.2. Relevé d'un angle de marche sur la carte

Ce travail peut s'effectuer chez soi, pendant la préparation de la course, mais aussi en quelques secondes sur le terrain, en cas de nécessité.

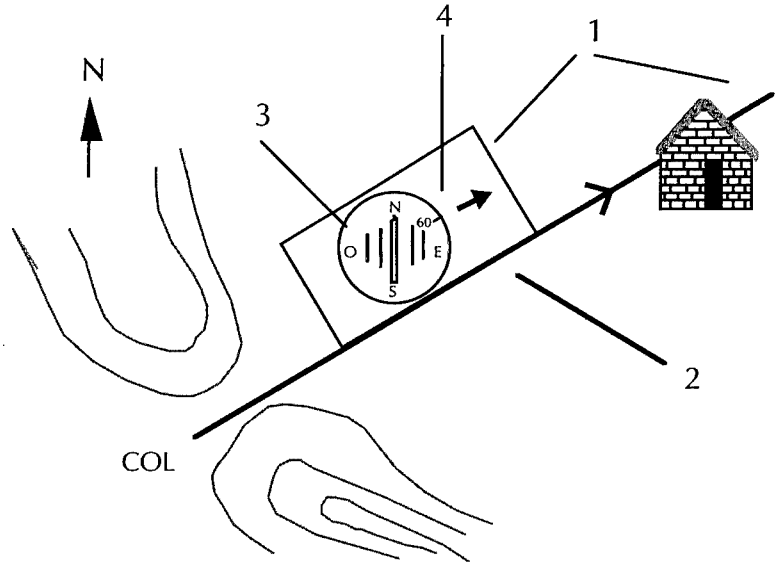


Figure 2. Relevé sur la carte de l'angle de marche à suivre pour aller du col au refuge.
La boussole sert de rapporteur (on oublie l'aiguille aimantée) :
• 1) poser la boussole sur la carte, flèche de direction dans le sens de la direction à suivre;
• 2) faire coïncider précisément le bord de la boussole avec la direction à suivre;
• 3) faire coïncider, en tournant le cadran mobile les lignes de nord du cadran avec le nord de la carte;
• 4) lire l'angle de marche (ici, 60°).

1.3.3. Marche selon un angle sur le terrain

On dit souvent qu'il est difficile de suivre un angle lorsque la visibilité est nulle, et c'est assez vrai. Mais on dit aussi qu'il faut pour cela faire marcher un compagnon devant soi, en corrigeant pas après pas sa direction. C'est à notre avis une mauvaise méthode, dont l'effet est de brouiller définitivement les meilleurs amis, et de renforcer cette réputation de difficulté. Il nous semble bien plus simple, sûr, et efficace de marcher soi-même dans la direction choisie, en ne conservant qu'un bâton, et en tenant dans la main libre la boussole, qu'on observe *en permanence*, de façon à ne jamais dévier de la route prévue. Avec un peu d'entraînement à cette technique, l'efficacité vient vite (moins d'un mètre de dérive par 100 m).

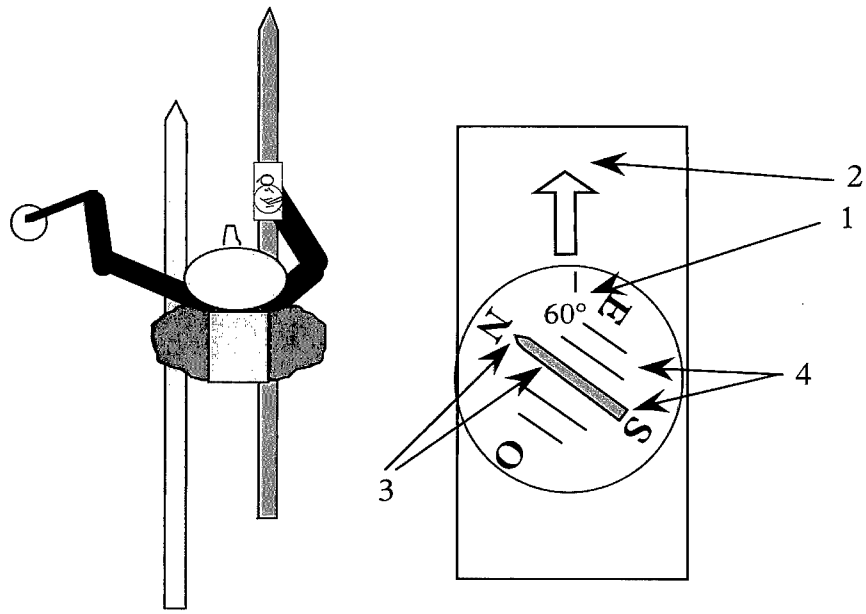


Figure 3. Progression sur le terrain selon l'angle de marche déterminé sur la carte (ex. 60°). La boussole est maintenant redevenue une boussole ; on utilise l'aiguille aimantée :
• 1) contrôler que le bon angle est affiché (ex. 60°) ;
• 2) placer la boussole devant soi, flèche dans le sens de la marche ;
• 3) tourner sur soi jusqu'à ce que le nord du cadran mobile corresponde au nord de l'aiguille aimantée ;
• 4) tout en avançant dans le sens de la flèche, vérifier que l'aiguille aimantée reste parallèle aux traits du cadran mobile.

1.4. Méthode de la tangente à la courbe de niveau

1.4.1. Principe général

L'orientation traditionnelle, comme on vient de le voir, consiste à atteindre une série de points caractéristiques, et à suivre un cheminement bien précis (selon les angles de marche), sans forcément savoir, entre les points, où l'on se trouve précisément. L'orientation par la méthode de la tangente à la courbe de niveau consiste au contraire, en se déplaçant au mieux selon le terrain rencontré, sans s'occuper de ces fameux points caractéristiques, à toujours connaître l'endroit précis où l'on se trouve, tout comme on le ferait par bonne visibilité.

1.4.2. Exemple pratique

Avant d'aborder cette partie, il est conseillé de se munir d'une boussole pour pouvoir reporter les angles sur les cartes. Si l'on examine, sur la figure 4, la courbe cotée 3 450, on constate que son orientation subit d'importants changements : du sud-est/nord-ouest au-dessus du mot "Dôme", elle passe au milieu de la croupe par une orientation est-ouest, puis revient vers le sud à gauche. On peut, pour être plus précis, dire qu'en A, son orientation est, par rapport au nord, de 148° (ou 328°), en B de 90° (ou 270°), en C de 72° (ou 252°). A chaque instant, la courbe change d'orientation, et en chacun de ses points, on peut tracer une tangente formant avec le nord un angle différent. Sur le terrain maintenant, à l'altitude 3 450 m, on conçoit qu'il est possible de matérialiser cette tangente en plaçant les skis horizontalement. Il est alors possible de connaître sa position en relevant l'angle des skis avec le nord, et de chercher sur la carte en quel point la courbe a une tangente de même valeur. Si par exemple, l'angle des skis est de 52°, cela signifie que l'on est en D (afficher 52° sur votre boussole et contrôler).

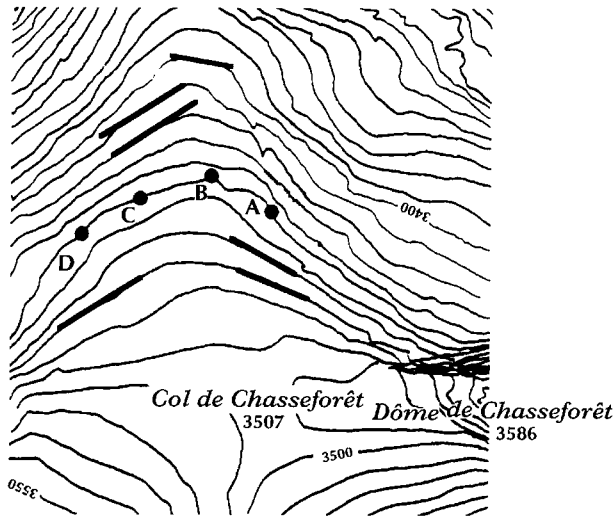


Figure 4.
carte topographique du dôme de Chasseforêt (Savoie). Croquis d'après carte IGN Vanoise.

1.4.3. Utilisation pratique

Il peut y avoir différentes façons de procéder, mais la méthode suivante, en cinq points, permet une grande rigueur et donc une grande efficacité. De plus, elle donne d'excellents résultats lorsqu'elle doit être enseignée.

❶ *Placer les skis horizontalement* : cela demande au néophyte une certaine concentration. Afin que l'esprit soit libre pour cette tâche, ne pas sortir carte et instruments pour l'instant. Lors des premiers essais, un auto-contrôle de l'horizontalité peut s'effectuer en faisant une conversion. La pente éventuelle des skis est alors plus sensible. Attention à la neige profonde : pour que la mesure soit valable, spatule et talon du ski doivent avoir le même enfoncement dans la neige. Dès que l'on a acquis une bonne habitude de l'opération, on peut gagner du temps, à la montée, en se contentant de placer le ski aval à l'horizontale, le ski amont restant dans la trace de montée.

❷ *Relever avec la boussole l'angle des skis avec le nord* : c'est une opération identique à celle qui consiste à relever un azimut sur le terrain. Il faut faire coïncider le bord de la boussole avec la direction donnée par les skis et tourner la partie mobile jusqu'à ce que son nord corresponde à l'aiguille aimantée. On notera que, contrairement au cas du relevé d'un azimut, une erreur de 180° est sans importance, la tangente à la courbe étant caractérisée indifféremment par deux angles de 180° de différence (ci-dessus, 138 et 318°, 90 et 270°, 60 et 240°).

❸ Relever avec l'altimètre l'altitude à laquelle on se trouve.

❹ Sortir la carte et repérer sur la carte la courbe sur laquelle on se trouve (suivant le relevé d'altitude effectué en 3).

❺ Poser la boussole sur la carte : la boussole est maintenant un rapporteur qui a été étalonné lors de l'opération 2. En maintenant les rayures du cadran mobile parallèles au bord de la carte, on fait glisser la boussole parallèlement à elle-même, jusqu'à ce que le bord de sa base soit tangent à la courbe de niveau. Le point de tangence est l'endroit où l'on se trouve.

1.4.4. Limites de la méthode et remèdes à appliquer

① *Courbes à grand rayon de courbure* : lorsque les courbes de niveau ont un très grand rayon de courbure ou qu'elles sont droites, il devient impossible de se localiser avec précision.

② *Pentes faibles* : en cas de pentes très faibles, il est évident que la moindre erreur d'horizontalité du ski se traduit par une rotation de celui-ci et donc par une erreur de positionnement sur la carte. Il convient donc d'éviter de faire des relevés à l'intérieur de zones trop plates. Dans le cas précédent du col de Chasseforêt, si l'on traverse sud-nord, on s'abstiendra de faire un relevé à 3 500 m, près du col, pour attendre les pentes un peu plus soutenues qui apparaissent vers 3 480 m.

③ *Micro-reliefs* : en cas de non-visibilité totale, il est facile, on s'en doute, de confondre relief et micro-relief, ce qui conduit quelquefois à faire un relevé sur une bosse non significative et donc à mal se positionner sur la carte. On doit prendre bien soin avant d'effectuer tout relevé de tangente par très mauvaise visibilité de vérifier, en se retournant, la position avec des autres membres du groupe, qui matérialisent, si besoin est, les micro-reliefs. Dans ce cas-ci, il faut se déplacer d'une vingtaine de mètres, pour opérer sur un secteur plus régulier, où le relevé de tangente est pertinent. Il est évident que l'on doit particulièrement se méfier des micro-reliefs dans les zones peu raides.

④ *Combes ou crêtes successives* : dans certains cas, comme sur la figure 5, un relevé de tangente (90° dans ce cas) va donner plusieurs points de stationnement possibles : A, A'ou A". Entre A et A' d'une part, et A" d'autre part, le doute est rapidement levé puisqu'il s'agit de deux zones concaves et d'une zone convexe différenciables sur le terrain, à la forme de la trace, ou par position des skieurs qui suivent. Il reste donc à lever le doute entre A et A'. Si l'on a été prudent et que l'on a effectué suffisamment de relevés auparavant, le doute n'est pas permis, mais dans le cas contraire (c'est fréquent quand on acquiert trop d'aisance !), il est normal de douter de sa position et le problème ne peut être résolu qu'en se déplaçant. Le déplacement permet alors de voir évoluer l'orientation des courbes et de lever le doute. Dans notre cas, partant de A ou A'(tangente 90°), on saura au bout de 50 à 80 m (2 à 3 mm de carte) si l'on est en B (tangente de 64°) ou au contraire en B'(tangente 34°).

⑤ *Erreur d'altitude* : un changement de pression barométrique va conduire à une erreur d'altitude et donc à ne pas choisir sur la carte la bonne courbe de niveau. Dans de nombreux cas, cependant, les courbes sont relativement parallèles, ce qui conduit à des erreurs minimes (par exemple, toujours sur la figure 5, une erreur d'altimètre de 30 m, vers 3 050 m, avec une tangente de 108°, conduit à se situer en C'au lieu de C, soit 150 m d'erreur, ce qui n'est pas dramatique. En fait, avec un peu de pratique, on apprend rapidement à recaler son altimètre sans passer par les points caractéristiques nécessaires en orientation traditionnelle, car du fait que l'on sait toujours où l'on se trouve, chaque replat ou chaque accident de terrain un peu prononcé permet de relever les anomalies d'altitude et éventuellement de recaler. Il est rare dans la pratique qu'il se passe plus d'une heure à la montée ou dix minutes à la descente sans que l'on ne puisse recaler l'altimètre.

☞ Dans pratiquement tous les cas, la solution au problème posé est le déplacement. Cela signifie que les différents problèmes se résolvent tout naturellement au cours de la progression, pour peu que l'on mémorise bien ce qui s'est passé et que l'on anticipe sur ce que l'on va trouver.

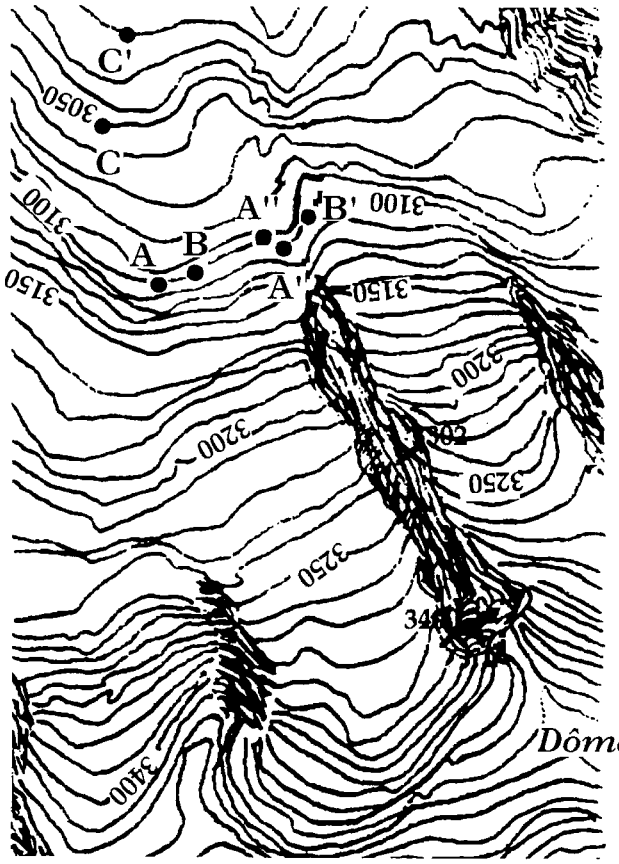


Figure 5. aiguille de Polset (Savoie). Croquis d'après carte IGN Vanoise.

1.5. Quelques questions au sujet de cette méthode

Lorsque l'on enseigne cette méthode d'orientation, un certain nombre de questions sont régulièrement posées. Il est vraisemblable que le lecteur se les pose également et en voici donc la liste avec les réponses.

❶ Et quand c'est plat ? La réponse a été partiellement donnée lors de l'exposé de la méthode. Si cependant, le terrain est réellement tout plat et très vaste, on peut soit suivre un angle de marche selon la méthode traditionnelle, soit marcher dans une direction approximative qui amènera tôt au tard sur une pente où la méthode de la tangente peut s'appliquer. Il faut noter que dans la pratique, il n'y a pas de grande différence entre ces deux techniques, si ce n'est dans l'esprit et dans la rapidité : en effet, dans le premier cas, on vise un point précis que l'on s'évertue (souvent en vain) à atteindre, et l'échec est assez désagréable, alors que dans le deuxième cas, on effectue un travail tout à fait approximatif, donc moins pénible et plus rapide, suivi d'une recherche précise et facile de l'endroit où l'on a abouti. En fait, je ne connais aucun glacier français où l'on soit obligé d'abandonner, même de façon temporaire, la méthode de la tangente à la courbe, et en Suisse, je ne vois que les secteurs d'Otemma, d'Aletsch ou de Plaine Morte. A titre d'exemple, le plateau de Trient, malgré son nom, ou les glaciers de la Vanoise se traversent très facilement avec la seule méthode de la tangente.

❷ Qu'appelle-t-on micro-relief ? C'est un relief trop petit pour être porté sur la carte, et c'est pour cela qu'il faut s'en méfier. On notera que, selon la carte que l'on utilise (1/25 000 française ou suisse ou 1/50 000 de type Kourpan), les micro-reliefs n'ont pas la même dimension et sont même très gros dans le deuxième cas ! Il faut alors effectuer des déplacements de contrôle plus importants. C'est une raison supplémentaire pour utiliser des cartes au 1/25 000.

❸ Cette méthode est-elle utilisable avec de mauvaises cartes ? Oui, mais avec difficulté, car les détails sont alors mal ou pas du tout représentés. Le plus souvent, on se contente des principaux contrôles : suis-je bien sur le flanc gauche du vallon ? Sur le bon versant du col ? etc. Selon la définition du paragraphe précédent, les micro-reliefs peuvent devenir énormes et il faut en tenir compte !

❹ Quelle est la précision de la détermination de l'angle de la tangente avec les skis ? Cela dépend, du degré d'entraînement, du niveau du skieur et de la profondeur de la neige. Pour donner une idée, sur une pente de 25° environ, avec 20 ou 30 cm de poudreuse (c'est plus facile sur la neige dure), un groupe de skieurs moyens donne des angles variant de 15° environ, du plus faible au plus fort. Dans les mêmes conditions, un groupe de futurs moniteurs donne des angles variant de 7 à 8°. Après une heure d'entraînement, l'éventail des angles diminue de moitié, pour les uns comme pour les autres.

❺ Quelle doit être la fréquence des relevés ? Cela dépend du besoin de savoir précisément où l'on se trouve, donc cela dépend du terrain. En situation délicate ou lors du franchissement d'un col, on peut avoir à effectuer un relevé tous les 10 à 20 m de dénivelée ou tous les 30 m de distance. En revanche, il m'est arrivé de remonter un glacier crevassé, inconnu de moi et par visibilité nulle, avec quatre relevés de tangente seulement sur 600 m de dénivelée.

❻ Combien de temps faut-il pour effectuer un relevé ? Environ deux minutes chaque fois quand on débute et avec de l'entraînement, on y arrive en moins d'une minute. Ce n'est pas trop cher payer pour savoir exactement où l'on se trouve !

❼ Doit-on suivre un itinéraire différent lorsqu'on n'y voit rien ? Dans la plupart des cas, non, car la fameuse recherche de points caractéristiques est sans intérêt pour l'utilisateur de la méthode de la tangente, qui dispose d'une infinité de points caractéristiques, au sens mathématique du terme. On peut cependant éviter les trop grands plats, si ce n'est pas une contrainte trop gênante, et bien sûr les zones dangereuses (barres, pentes raides, crevasses) qui sont encore plus dangereuses sans visibilité.

❽ Peut-on utiliser la méthode de la tangente l'été ? C'est possible, mais trop délicat pour être vraiment systématisé. Au même titre que, à skis, la méthode de l'angle de marche est un complément de la méthode de la tangente, celle-ci doit être utilisée en été comme un simple complément de la méthode de l'angle de marche. Les raisons en sont fort simples : à skis, il est difficile à la montée comme à la descente d'aller en ligne droite ; par ailleurs, il est naturel et peu pénible de se déplacer "pour aller voir" ; enfin les skis permettent facilement de matérialiser la tangente. Au contraire, à pied sur glacier, il est relativement facile d'aller droit, donc de viser ; en revanche, il est souvent pénible si la neige est profonde, d'y faire la trace et de faire un détour pour effectuer un relevé et enfin les skis ne sont pas là pour matérialiser la tangente. Il semble conseillé en été de limiter l'utilisation de la tangente aux fonds de thalwegs ou aux crêtes, lieux où l'on peut viser tant bien que mal deux flancs et voir si les angles correspondent sur la carte à ceux de l'endroit où l'on pense se trouver.

❾ Et la déclinaison magnétique ? Si l'on possède une boussole à affichage de déclinaison, on peut l'afficher. Dans le cas contraire, actuellement dans les Alpes, on l'oublie et cela marche aussi bien... en attendant le jour lointain où il faudra de nouveau en tenir compte.

⓾ Et que fait-on si l'on se perd ? On ne se perd plus tout simplement ! L'expérience a montré que lorsque l'on possède bien la méthode, on peut être "parachuté" à peu près n'importe où, sans savoir au kilomètre près le lieu où l'on se trouve et se repérer rapidement.

2. Choix de l'itinéraire*

Il existe maintenant un grand nombre de topo-guides et de cartes (au 1/25 000 ou au 1/50 000) qui présentent des itinéraires à skis. Ce sont des itinéraires conseillés qu'il est le plus souvent recommandé de suivre, mais le pratiquant projetant une course ou une descente en hors-piste doit savoir si l'itinéraire proposé est praticable ou non, s'il est exposé à un danger quelconque, quel horaire il doit prévoir, de quelles précautions il doit s'armer... Autant de questions auxquelles ni carte ni guide ne peuvent répondre.

2.1. S'informer : le bulletin du risque d'avalanche

*2.1.1. L'échelle européenne de risque d'avalanches***

En avril 1993, répondant aux vœux de nombreuses associations de pratiquants de la montagne, un groupe de travail réunissant les services de prévision du risque d'avalanches des pays de l'arc alpin a adopté une échelle de risque d'avalanche commune. Cette échelle est actuellement utilisée par tous les pays de l'Europe occidentale.

Le principe de l'échelle

L'échelle européenne de risque d'avalanches comporte 5 niveaux de risque définis par une évaluation de la stabilité et de ses conséquences en terme de probabilité de déclenchement d'avalanche. Aucun des indices de risque n'est à négliger. En montagne le risque 0 n'existe pas et le danger auquel s'expose le skieur ou le piéton avec ou sans raquettes, croît avec la valeur des indices.

Le risque d'avalanches n'étant pas un paramètre mesurable, chaque indice de l'échelle traduit non pas ce qui va se produire, mais ce qui peut se produire avec la meilleure probabilité, eu égard à l'analyse de la situation et à l'état des connaissances.

L'interprétation

Surcharges.

Les indices sont ordonnés en fonction de l'évaluation de l'instabilité et de son extension géographique. La probabilité de déclenchement prend en compte la surcharge suffisante pour qu'il y ait déclenchement : plus l'instabilité est grande, plus la surcharge nécessaire est faible. Une forte surcharge est typiquement celle imposée par un groupe de skieurs ou de piétons, une faible surcharge est celle provoquée par un skieur (ou piéton). Cette notion de surcharge doit être considérée comme un indicateur relatif de l'instabilité et interprétée en termes statistiques. Les indices 1 et 2 décrivent un risque de déclenchement "surtout par forte surcharge" ; cela signifie que dans la très grande majorité des cas les déclenchements sont à craindre par forte surcharge, sans exclure, dans de rares cas isolés, qu'une faible surcharge soit suffisante. La façon de skier influe d'ailleurs sur cette notion de surcharge : skier en douceur ou en en force n'a pas le même effet sur le manteau neigeux.

Sur les pentes.

Pentes raides et suffisamment raides

Dans leur très grande majorité, les avalanches se produisent sur des pentes comprises entre 25 et 45°. L'expression "pentes raides" utilisée dans la définition du risque faible (1) renvoie à une partie seulement de ces zones particuliè-

* Par Christophe Ancey

** Par Edmond Pahaut (Météo-France)

rement propices aux avalanches non seulement en raison de leur déclivité, mais aussi de leur configuration, de la nature du terrain, de la proximité des crêtes. Les "pentes suffisamment raides" recouvrent l'ensemble des pentes où des avalanches sont possibles.

Extension géographique

Les termes "rares", "quelques" utilisés pour les indices 1 et 2 indiquent une instabilité localisée à un petit nombre de pentes dont les expositions sont le plus souvent précisées dans le bulletin. De "nombreuses" pentes (indice 3) signifient que l'instabilité s'étend et affecte un grand nombre de pentes dont les caractéristiques topographiques sont généralement décrites dans le bulletin. Avec la "plupart" des pentes (indice 4) apparaît la notion de généralisation d'une forte instabilité qui peut affecter la majorité des pentes de l'ensemble des secteurs géographiques ou de certains secteurs caractérisés par une exposition, une tranche d'altitude, une plage horaire. L'indice 5 traduit une très forte instabilité généralisée du manteau neigeux sur l'ensemble des pentes, quelle que soit leur orientation.

Départs et déclenchements

Des indices 1 à 4, l'échelle différencie les risques de déclenchement accidentel (provoqué par le skieur lui-même) et les risques de déclenchement naturel (départ spontané, sans action extérieure). Lorsque l'indice 5 est utilisé, l'instabilité généralisée du manteau neigeux est telle qu'il n'est plus nécessaire distinguer le type de déclenchement. Pour éviter toute confusion, le terme *"départ"* concerne les avalanches qui se produisent spontanément, le terme *"déclenchement"* est réservé aux déclenchements provoqués par le ou les skieur(s).

Dans certaines situations

Dans la définition des indices 3 et 4, l'expression *"dans certaines situations"* signifie que si le risque de déclenchement accidentel est toujours de niveau 3 ou 4, marqué ou fort, il n'en est pas de même pour le risque de départs naturels qui peut être plus faible. Ces nuances sont indiquées dans le corps du bulletin d'estimation du risque d'avalanches. C'est notamment le cas lorsque l'éloignement des dernières chutes de neige ou un manteau neigeux de faible épaisseur mais dont la structure est particulièrement sensible aux surcharges accidentelles, réduisent le risque de départs spontanés tout en maintenant un risque de déclenchement marqué ou fort.

Sur la taille des avalanches

Cette notion de taille vaut surtout pour les avalanches spontanées en raison de leur potentiel destructeur et moins pour les avalanches déclenchées par les skieurs eux-mêmes, dont on sait qu'elles n'ont pas besoin d'être importantes pour avoir de graves conséquences.

Par coulées ou petites avalanches (indice 1), on entend des écoulements de neige de faible extension, ne provoquant pas de dégâts matériels. Le danger pour le skieur est alors surtout lié à la configuration du terrain : la rupture d'une plaque de moins de 20 cm d'épaisseur peut être suffisante pour entraîner un skieur et lui faire franchir une barre rocheuse.

Dans la définition de l'indice 2, (risque limité), l'expression "des avalanches de grande ampleur ne sont pas à attendre" signifie que la majorité des avalanches qui peuvent se produire seront de petite taille, quelques unes seulement d'entre elles pouvant être de taille moyenne. Les indices 5 (toujours) et 4 (parfois) font références aux "grosses avalanches". Il s'agit des avalanches de grande ampleur, pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de largeur ou de longueur, susceptibles de provoquer des dégâts matériels et qui constituent bien sûr un grand danger pour les skieurs. Entre les coulées ou petites avalanches et les grosses avalanches, se situe le large éventail des avalanches de "taille moyenne", (indices 3 et 4), dont on

peut dire qu'elles ne provoquent que très rarement des dégâts matériels et qu'elles constituent la majorité des avalanches déclenchées par les skieurs.

Ce que décrivent les indices

Risque faible

La stabilité d'ensemble du manteau neigeux est bonne. Les conditions sont alors les plus favorables pour la pratique de la montagne. L'instabilité est peu marquée et localisée dans de très rares secteurs caractérisés par une forte déclivité, un environnement de crêtes ou de cols, comportant des ruptures de pente. Le risque de déclenchement n'est envisagé dans la majorité des cas que sous l'effet de fortes surcharges. L'activité avalancheuse naturelle ne peut se manifester que sous forme de coulées ou de petites avalanches de faible extension. Entre 1993 et 1998, sur l'ensemble des massifs, aucun accident n'a été signalé alors que ce risque apparaît dans 15 % des bulletins.

Risque limité

La stabilité d'ensemble est satisfaisante mais une instabilité localisée affecte quelques pentes dont l'exposition et l'altitude sont le plus souvent mentionnées. Le risque de déclenchement ne concerne qu'un nombre limité de pentes. Il n'est à craindre en général que sous l'effet de fortes surcharges (groupe de skieurs par exemple). L'activité avalancheuse spontanée reste également peu importante. Les coulées ou avalanches qui peuvent se produire sont, dans la très grande majorité des cas, de petite taille. Entre 1993 et 1998, tous massifs confondus, près de 9 % des accidents recensés ayant impliqué des skieurs sont couverts par un risque 2 qui apparaît dans 39 % des bulletins.

Risque marqué

L'instabilité s'aggrave et s'étend à de nombreuses pentes dont les particularités topographiques sont généralement décrites dans le bulletin. Suivant les situations, il sera fait mention des zones les plus exposées, sans oublier que la réalité du terrain, notamment après des épisodes de neige ventée, exclut une localisation trop stricte des secteurs. L'instabilité est alors assez marquée pour que des déclenchements puissent se produire sous l'effet de faibles surcharges, comme le passage d'un seul skieur. Dans le cas où une activité avalancheuse "naturelle" est prévue, celle-ci doit se traduire par un nombre restreint d'avalanches, de moyenne importance dans la majorité des cas, quelques-unes d'entre elles seulement pouvant prendre une assez grande extension. Des dégâts matériels sont peu probables et restent exceptionnels dans ce type de situation. Entre 1993 et 1998, tous massifs confondus, 42 % des accidents recensés sont couverts par un risque 3 qui apparaît dans 34 % des bulletins.

Risque fort

L'instabilité affecte la plupart des pentes, dont les caractéristiques peuvent encore, mais plus rarement, être signalées dans le bulletin. Dans de nombreux secteurs concernés par cette instabilité, il existe une forte probabilité de déclenchement par faible surcharge (passage d'un seul skieur par exemple). Si le risque de déclenchements accidentels est toujours fort et préoccupant, il n'en est pas de même pour le risque de départs naturels. En effet l'indice 4 décrit des situations nivologiques très différentes où le risque de départ spontané d'avalanches peut être fort comme il peut être peu marqué ou même très faible. Ces nuances sont indiquées dans les bulletins. Entre 1993 et 1998, tous massifs confondus, 42 % des accidents recensés sont couverts par un risque 4 qui n'apparaît que dans 10 % des bulletins.

Risque très fort

L'instabilité du manteau neigeux est alors très forte et généralisée : épisodes neigeux très actifs, froids et ventés, brutal réchauffement accompagné de pluie

affectant un manteau neigeux peu transformé... De nombreuses et grosses avalanches peuvent se produire et atteindre des zones à faible pente (inférieure à 20°). Quelques unes des situations couvertes par un risque 5 présentent un caractère de gravité exceptionnelle. Des avalanches de grande ampleur, peuvent avoir de très graves conséquences tant sur le plan humain que matériel. Pylônes, bâtiments et routes peuvent être touchés et endommagés. Dans les cas les plus préoccupants des bulletins spéciaux sont émis vers les services de sécurité régionaux et départementaux ainsi que vers les médias (bulletin régional d'alerte météorologique "avalanche", communiqués météorologique de presse). Entre 1993 et 1998, tous massifs confondus, 7 % des accidents recensés sont couverts par un risque 5 qui apparaît dans moins de 2 % des bulletins.

2.1.2. Comment s'informer ?

Les bulletins diffusés par Météo-France

Le bulletin d'estimation du risque d'avalanches (BRA).

Les (BRA) sont diffusés tous les jours de la mi-décembre à la fin du mois d'avril. Ils comprennent 5 rubriques :

- estimation du risque d'avalanches : *par massif et pour les 24 heures à venir avec la référence à l'échelle européenne (indice chiffré et signification).*
- conditions d'enneigement : *limites inférieures de l'enneigement skiable, appréciation générale sur l'enneigement, qualité de la neige de surface.*
- aperçu météo : *brève information sur les paramètres prévus ayant une influence sur l'état du manteau neigeux.*
- stabilité du manteau neigeux : *bilan des chutes de neige récentes, état et évolution du manteau neigeux, conséquences sur la stabilité, nature et intensité du risque d'avalanche.*
- tendance ultérieure (facultatif) : *sens probable de l'évolution du risque à échéance d'au moins 48 heures.*

Deux autres bulletins sont diffusés par Météo-France pendant la saison hivernale :

Le **bulletin de synthèse hebdomadaire (BSH)** résume les phénomènes marquants de la semaine écoulée, avec notamment les épisodes de vent fort, les fluctuations de l'isotherme 0°, le cumul des chutes de neige. Sans être un bulletin d'estimation du risque d'avalanches, il s'adresse particulièrement aux randonneurs et aux professionnels qui ont besoin de connaître les conditions nivo-météorologiques des jours précédents. Ce bulletin est disponible sur répondeur et sur minitel du jeudi au dimanche, de la mi-décembre à la fin avril.

Le **bulletin montagne et neige (BMN)** est également proposé en hiver. L'usager peut ainsi avoir accès à une prévision météorologique adaptée aux massifs du département de son choix, complétée par des informations sur les limites de l'enneigement skiable, sur le caractère général de l'enneigement ainsi que sur les chutes de neige récentes.

• Du 1er novembre au 15 décembre, puis du 1er mai au 15 juin, des informations plus succinctes sur les conditions de neige sont délivrées au moins une fois par semaine, à la veille des week-ends.

• Des **communiqués météorologiques de presse** sont diffusés à l'intention des médias et du public lorsque la situation avalancheuse fait craindre une mise en danger des résidents en montagne, des habitations et des routes.

Diffusion des bulletins

Sur répondeur téléphonique

08.36.68.10.20

– 1. bulletin d'estimation du risque d'avalanche (BRA)
– 2. bulletin de synthèse hebdomadaire (BSH)
Ce numéro est accessible depuis l'étranger.

08.36.68.08.08 (accès aux prévisions par thème)
– choix "montagne" : touche ⋆ puis choix 2 donnent accès aux bulletins spécialisés "montagne"

été :
– 1. bulletin départemental de prévision météorologique adapté à la montagne
– 2. bulletin de prévision météorologique par grand massif
(Alpes du Nord, Alpes du Sud, Pyrénées, tous massifs français).

hiver :
– 1. bulletin de prévision météorologique adapté à la montagne
avec un complément "enneigement".
– 2. bulletin de prévision météorologique par grand massif
(Alpes du Nord, Alpes du Sud, Pyrénées, tous massifs français).
– 3. bulletin d'estimation du risque d'avalanche (BRA).

08.36.68.02.XX (XX = numéro du département)
Le choix offert sur ces serveurs est variable suivant les départements. Mais tous les départements alpins, pyrénéens et corses proposent le bulletin "montagne et neige" ainsi que le BRA.

Sur minitel **3615 météo**

Pour les départements montagneux, le mot-clé MONT donne accès aux informations spécifiques à la montagne (prévisions météo, données des stations automatiques "nivôse"). Le mot-clé NEIG donne accès aux informations "neige" sur une station ou un massif (enneigement par massif, hauteurs de neige en station, bulletin de synthèse hebdomadaire, bulletin d'estimation du risque d'avalanche).

*2.1.3. Un exemple de BRA**

L'exemple suivant montre un exemple d'un bulletin d'estimation du risque d'avalanche ainsi que son interprétation.

MÉTÉO FRANCE - CENTRE DE GRENOBLE
BULLETIN D'ESTIMATION DU RISQUE D'AVALANCHE DE L'ISÈRE
Valable en dehors des pistes balisées et ouvertes

Mardi 17 mars 1998
** ESTIMATION DES RISQUES JUSQU'À MERCREDI SOIR
* Belledonne :
En dessous de 2 200 m : risque limité niveau 2
Au dessus de 2 200 m : risque marqué niveau 3
* Oisans et Grandes Rousses :
Risque limité, niveau 2
* Chartreuse, Vercors :
Risque faible, niveau 1 le matin évoluant en risque limité niveau 2

* Par Jacques VILLECROSE

** CONDITIONS D'ENNEIGEMENT SUR L'ISÈRE

L'enneigement est un peu faible pour la saison, même si certains secteurs de Belledonne sont plus favorisés. On peut chausser les skis à partir de 1 200 m en versants nord et de 1 500 m en versants sud voire 1 800 m à 2 000 m dans l'Oisans. Les dernières chutes de neige, plus marquées dans Belledonne, datent de jeudi dernier. La qualité de la neige est très variable, généralement croutée ou dure le matin, se transformant sous l'effet du soleil dans les pentes bien exposées. Dans les versants ombragés, la poudreuse est souvent cartonnée par le vent.

** APERÇU MÉTÉO JUSQU'À MERCREDI SOIR

Nuit peu nuageuse puis temps bien ensoleillé malgré la présence de nuages accrochant les pentes entre 1 200 et 1 800 m en matinée.

Isotherme 0 degré : vers 2 600 / 2 800 m

Isotherme -10 degrés : vers 4 200 m

Vent à 3 000 m : faible de secteur nord à nord-est.

** STABILITÉ DU MANTEAU NEIGEUX

Dans les versants bien ensoleillés, jusque vers 2 800 m environ, prédominance de conditions de neige printanières. Les risques de départs spontanés d'avalanches de neige humide seront faibles le matin mais augmenteront au fil de la journée sous l'effet du soleil. Ces avalanches pourrant avoir plus d'ampleur dans le massif de Belledonne.

Dans les versants ombragés ou ne bénéficiant que d'un soleil rasant, les risques naturels seront faibles tout au long de la journée. En revanche des fragilités persistent en raison de la présence dans le manteau neigeux de strates de neige à faible cohésion. Des déclenchements au passage de skieurs restent possibles localement au dessus de 2 200 m, plus marqués dans le massif de Belledonne. On se méfiera particulièrement des zones plus faiblement enneigées que la moyenne.

➟ Un des bons usages de ce bulletin : comment l'interpréter et s'en servir.

Les risques d'avalanche annoncés en début de bulletin sont assez variables (de niveau 1 à 3) suivant les massifs, l'altitude et l'heure de la journée. Aucun d'eux n'atteint un niveau très élevé, ce qui n'est pas une raison pour les mésestimer : environ 40 % des accidents par avalanche se produisent en risque 3 et 10 % en risque 2. Le choix de course qui s'offre au randonneur potentiel de ce mercredi 18 mars est encore étendu, d'autant que les conditions météo sont prévues bonnes. Où aller pour profiter au mieux de sa journée de ski, et dans les meilleures conditions de sécurité ? Le Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche peut constituer, parmi d'autres éléments, une aide précieuse à la décision.

Mardi 17 mars à 19 heures, c'est l'heure de préparer sa course. X et Y, skieurs de montagne confirmés, ont envie – a priori – de se rendre le lendemain dans le massif de Belledonne. Est-ce un bon choix ? Ils ne sont pas allés en montagne depuis une dizaine de jours et il a neigé entre temps. Consulter le BRA de l'Isère constitue pour eux un réflexe. La première rubrique du BRA leur apprend que, manque de chance, le massif de Belledonne est celui où les risques d'avalanche sont estimés les plus importants, marqués de niveau 3 au-dessus de 2 200 m ; l'écoute complète du bulletin va leur apporter plus de précisions.

La rubrique *stabilité du manteau neigeux* indique des différences importantes entre les versants bien ensoleillés et les versants ombragés.

Dans les premiers, des conditions de neige printanières semblent prédominer jusque vers 2 800 m environ : neige dure ou croûtée le matin se transformant en journée sous l'effet du soleil, comme l'indique la rubrique *conditions d'enneigement.* Certes, au fil de la journée, le risque d'avalanche spontanée de neige humide va augmenter (l'isotherme 0 degré est prévu à un niveau assez élevé :

2 800 m). Ces avalanches pourront même prendre une certaine ampleur. Mais un départ suffisamment matinal devrait permettre de profiter d'une neige transformée sur juste ce qu'il faut. De plus, nos deux skieurs de montagne savent par expérience qu'il suffit de jouer avec les orientations pour mettre tous les atouts de leur côté : les versants sud-ouest à ouest sont plus tard ensoleillés que ceux orientés à l'est ou plein sud.

Dans les versants ombragés, en revanche, le BRA indique un manteau neigeux plus fragile. D'une part la neige de surface n'est pas transformée mais poudreuse, plus ou moins cartonnée par le vent. D'autre part, le manteau neigeux recèle encore des strates de neige à faible cohésion. Les risques naturels sont faibles, comme le précise bien le BRA, mais ce type de structure rend possible des déclenchements par surcharge accidentelle, provoquée par des skieurs par exemple. Le BRA localise les pentes les plus dangereuses, propices donc à des déclenchement même par faible surcharge, dans les zones plus faiblement enneigées que la moyenne[2]. Ce sera un élément à apprécier, bien évidemment, sur le terrain.

X et Y tirent comme conclusion que leur projet de course dans Belledonne reste du domaine du raisonnable, compte tenu qu'ils ne sont que deux, bien entraînés et expérimentés. L'enneigement plus favorable du massif de Belledonne, annoncé dans la rubrique *conditions d'enneigement*, laisse supposer un temps de portage réduit au minimum. Les versants bien ensoleillés paraissent relativement sûrs, à condition de descendre suffisamment tôt, et offrent la perspective d'une neige transformée, agréable à skier. Quant aux versants nord, ils restent fréquentables à condition de respecter de strictes règles de sécurité en terme de cheminement et d'effectuer de temps à autre quelques tests (test du bâton, mini sondage ou coin glissant).

X et Y choisissent finalement de se rendre dans un secteur de Belledonne offrant de nombreuses possibilités d'exposition ; ils se détermineront dans leur choix final de sommet et d'itinéraire en fonction de ce qu'ils verront sur le terrain. Au reste, en cas de conditions plus mauvaises qu'annoncées, renoncer ne présente aucun déshonneur.

Mardi 17 mars à 20 heures, changement de programme. Le téléphone n'a pas arrêté de sonner et le nombre de participants à la course a sensiblement augmenté : une douzaine maintenant. Les nouveaux venus ont un niveau d'entraînement et une expérience de la neige très variable, parfois faible. Ils s'en remettent à X et Y pour le choix de la course.

Ceux-ci, après réflexion, renoncent au choix initial de Belledonne. Le faible entraînement de quelques uns rend incertain la tenue d'un horaire compatible avec le risque d'avalanche de neige humide dans les versants bien ensoleillés. Quant aux versants nord, le nombre des participants peut provoquer des surcharges importantes ; X et Y ne sont pas sûr de pouvoir imposer une discipline parfaite (cheminement, espacement) à un groupe aussi nombreux, ou peut-être ont-ils envie de randonner l'esprit plus tranquille. Au reste, pourquoi prendre des risques inutiles et gâcher la journée ? le BRA indique des risques d'avalanche moins importants dans les autres massifs de l'Isère.

X et Y éliminent le Vercors et la Chartreuse, bien que ces massifs soient apparemment les plus sûrs (risque 1 à 2). La rubrique "conditions d'enneigement" signale en effet un enneigement un peu faible pour la saison et des limites d'enneigement skiable augmentant le temps de portage et diminuant la dénivelée skiable. X et Y optent finalement pour un versant bien ensoleillé de l'Oisans culminant aux alentours de 2 800 m, de préférence d'orientation SW à W pour des questions d'horaire. Le risque 2 annoncé pour ce massif leur indique que les éventuels départs de neige humide ne prendront pas trop d'ampleur ; par ailleurs la neige sera plus facile à skier qu'en versant nord.

2 La faible épaisseur du manteau neigeux favorise en cours d'hiver, si les conditions de températures s'y prêtent, la formation de strates de neige à faible cohésion, du type grain à face plane ou gobelet.

Quant à leur projet initial, la rubrique tendance ultérieure des risques est optimiste jusqu'à dimanche. Alors Belledonne, pourquoi pas le week-end prochain...

Remarques :

Il est intéressant de prendre des notes lors de la consultation du BRA étant donné la densité d'informations dont il faut tenir compte pour le choix de la course. Il existe un bulletin d'information hebdomadaire de synthèse, complémentaire du BNA quotidien, disponible du jeudi au lundi sur répondeur téléphonique et donnant les faits marquants de la semaine (cumuls de neige, vent...). On y accède également par le service Minitel de Météo-France.

2.1.4. Carte et topo-guide

Il existe à l'heure actuelle de nombreux guides pour la pratique du ski de randonnée, du hors-pistes ou de la randonnée à raquettes qui offrent un vaste choix de courses dans les Alpes et les Pyrénées tout en présentant un descriptif de l'itinéraire : difficulté de la course, dénivellation, orientation, commentaires, variantes, approche routière... Les trois paramètres importants qu'il faut regarder lors du premier choix sont la difficulté, l'altitude et l'exposition au soleil.

2.1.4.1. La difficulté d'une course

Grosso modo, la difficulté de l'orientation est souvent donnée en fonction de la déclivité moyenne ou maximale rencontrée dans la course ; il existe plusieurs échelles en général subdivisées en 6 niveaux :

F	S1	SM	pentes très faibles	<15°
PD	S2	SM/BS	pentes faibles	15-25°
AD	S3	BS/TBS	pentes moyennes	25-35°
D	S4	TBS	pentes raides	35-45°
TD	S5	TBS	pentes très raides	45-50°
ED	S6	TBS (EBS)	pentes extrêmement raides	50-55°

Les deux premières échelles sont identiques à celles utilisées en alpinisme : la première donne une évaluation globale de la difficulté en tenant compte de plusieurs paramètres (risque objectif, ampleur, engagement...) tandis que la seconde est surtout une estimation de la difficulté technique rencontrée (ici directement liée à la déclivité, à la configuration). La troisième échelle est spécifique à la pratique du ski de randonnée (montée et descente) et renvoie au niveau technique requis pour le skieur. Les abréviations employées sont :

- F : *facile*, PD : *peu difficile*, AD : *assez difficile*, D : *difficile*, TD : *très difficile*, ED : *extrêmement difficile*. Il existe encore des subdivisions dites supérieures ou inférieures (+/-) pour apporter une nuance dans la difficulté.
- Les chiffres 1 à 6 indiquent le niveau de difficulté comme en escalade ou en alpinisme (échelle UIAA) ; la lettre S rappelle qu'il s'agit d'une cotation pour skieurs.
- S.M : skieur moyen, BS : bon skieur, TBS : très bon skieur, (parfois aussi EBS : excellemment bon skieur). Ces abréviations sont parfois suivies d'un A pour alpin, ce qui indique que le parcours est alpin (glacier, passage rocheux...).
- Certains auteurs comme G. Chantriaux ou V. Shashani ont proposé également une cotation ouverte (similaire à la cotation américaine pour l'escalade) en cinq degrés. Le niveau 1 correspond au terrain d'initiation au ski et pentes agréables à raquettes ; le niveau 2 est caractéristique des courses avec peu de difficultés techniques mais le dénivelé comme l'exposition à la chute peuvent être importants ; le niveau 3 marque la frontière entre la randonnée et le ski-alpinisme : des pentes soutenues (35 °) et/ou des passages courts mais raides (40 à 45 °) ; le niveau 4 correspond au ski de pente raide

(de 40 à 50°) et le niveau 5 (ouvert) regroupe les courses de haut niveau (ski extrême), avec des pentes soutenues et longues (plus de 45 °) et/ou des passages à plus de 50°. La cotation d'une course peut évoluer en fonction de la raideur de la pente et de la qualité de la neige de surface (voir tableau ci-dessous tiré d'un topoguide écrit par Gérard Chantriaux).

Inclinaison	<20°	35°	40°	45°	50°	>55°
neige transformée	1	2	3	4	5	5.4
neige poudreuse	3	2	2	2	3	4
neige croûtée	5	4	3	3	4	5
neige dure	2	2	4	5	5.3	5.6
neige glacée	3	4	5	5.5	5.7	5.9

Contrairement à une course rocheuse, la difficulté d'une course à skis est largement fonction de la consistance de la neige et dès lors, les définitions sont données pour des conditions moyennes, mais il est certain que la descente d'un couloir n'est pas toujours de difficulté égale : la cotation du couloir Davin (coté AD l'été) est D+ pour des conditions normales et passe à TD (voire TD+) en neige gelée.

2.1.4.2. L'exposition

Il s'agit ici d'une estimation du danger (objectif) menaçant le skieur, outre le risque d'avalanches. Une pente de 35° peut être anodine, la même pente avec une barre rocheuse en dessous peut ébranler psychologiquement le skieur : une glissade ou une coulée peut l'entraîner dans une chute mortelle. La longueur de la pente, la présence de séracs, de parois rocheuses, etc. sont des facteurs fixes qui augmentent l'exposition de la course, indépendamment de sa difficulté. La qualité de neige influe à la fois sur la difficulté et sur l'exposition au cours de l'ascension ou de la descente : une pente à 30° en neige gelée peut représenter un grand danger pour le skieur en cas de glissade. On emploie plusieurs degrés pour qualifier le niveau d'exposition d'une course : *faible, modéré, assez forte, forte, très forte.* En fonction de son niveau technique, de son mental et du contexte (course pour le plaisir, pour la performance...), le skieur a intérêt à garder une marge de sécurité.

2.1.4.3. L'altitude

L'altitude est un paramètre important qui influe sur la température, sur l'enneigement et sur l'état de la neige. On distingue plusieurs étages en fonction de l'altitude.

- Au-dessous de 900 m : l'*étage collinéen* où la neige demeure peu de temps ; l'épaisseur est faible (quelques centimètres) mais des épisodes exceptionnels peuvent amener de grosses quantités de neige (par exemple, le 12 et 13 décembre 1989 il est tombé en moyenne 1 mètre de neige sur les Terres Froides dans le nord de l'Isère et dans le Grésivaudan).
- Entre 900 et 1 600 m : l'*étage montagnard* où la neige persiste pendant plusieurs mois selon le versant, le relief, la végétation... Traditionnellement c'est une zone d'habitat rural, consacrée essentiellement à l'élevage et à la sylviculture. On commence à y rencontrer un grand nombre de stations de ski (autour de Grenoble : Villard-de-Lans, Prapoutel, Chamrousse, col de Porte, l'Alpe-du-Grand-Serre, Vaujany, etc.).
- Entre 1 600 et 2 300 m : l'*étage subalpin*, où la neige est généralement présente environ la moitié de l'année (de décembre à mai). L'épaisseur peut être importante mais varie encore beaucoup en fonction de l'orientation, du relief, de l'altitude... traditionnellement, c'est une zone d'alpage, qui de nos jours est aussi l'aire de développement des stations de ski : les grandes stations du Dauphiné (Alpe-d'Huez, les Deux-Alpes), de Tarentaise (La Plagne, les Arcs, Tignes, Val-d'Isère, Val-Thorens, les Ménuires, Méribel, Courchevel) y ont étendu

leurs premières pistes de ski. C'est aussi une altitude agréable pour la pratique du ski de randonnée et des raquettes : de nombreux massifs (Chablais, Bornes, Aravis, Matheysine, Chartreuse, Vercors...) offrent des sommets intéressants, en général du mois de décembre à avril. Par rapport à l'étage supérieur la neige y évolue assez vite, surtout au printemps et dans les versants sud.

– Entre 2 300 et 3 000 m : l'*étage alpin* où l'on trouve de la neige en général du mois de novembre à juin. L'enneigement y est important (souvent plus de 3 mètres). C'est le haut domaine des stations de ski et l'aire de prédilection du skieur : quelques sommets des Préalpes, les massifs du Beaufortain, de Belledonne, du Queyras, du Mercantour proposent un joli choix de courses. Une évolution plus lente de la neige, une activité éolienne parfois importante (accumulation de neige soufflée, corniche...) caractérisent plus particulièrement cet étage, où l'on trouve un grand nombre de zones d'accumulation et de couloirs d'avalanche. Il est en général préférable d'attendre la fin de l'hiver ou le printemps pour commencer à réaliser ces courses. L'importance de l'enneigement les rend possibles jusqu'au mois de mai voire juin. Il n'y a pas de règle absolue sur le choix de la période la plus favorable : il faut surtout tenir compte des conditions nivo-météorologiques mais également d'autres critères (altitude du point de départ, raideur, route d'accès déneigée ou non, orientation de la pente, etc.). Ainsi certaines courses sont réalisables de novembre à mai : le pic Blanc du Galibier (2 955 m, Cerces) à partir de la route (1 980 m) du col du Lautaret est un exemple. Inversement, il est préférable d'attaquer le col de l'aiguille des Marmes (2 950 m, Oisans) à partir du mois d'avril étant donné la raideur des pentes dont le parcours exige une bonne stabilité. C'est évidemment un conseil d'ordre général qui doit être adopté en fonction du déroulement de la saison. Ainsi, certains hivers connaissent de bonnes conditions météorologiques qui permettent une pratique du ski sur quasiment toutes les pentes et sont suivis de printemps pourris rendant incertaines les sorties.

– Au-dessus de 3 000 m : l'*étage nival*, où la neige peut rester de manière permanente (névé, glacier) ou quasi-permanente. C'est le domaine de la haute montagne. Quelques stations de ski y étendent leurs dernières pistes et l'altitude permet parfois la pratique estivale du ski (Tignes, les Deux-Alpes...). Les massifs internes (Mont-Blanc, Vanoise, Grandes Rousses, Oisans) proposent une kyrielle de sommets prestigieux, souvent sur des parcours glaciaires. Il est préférable d'attendre le printemps pour attaquer les courses de haute montagne, même si certains sommets proches des remontées mécaniques (comme le mont Pourri, 3 779 m, depuis les Arcs 2 000) sont facilement accessibles, ainsi que le domaine hors-pistes de quelques stations de ski (par exemple, Chamonix : aiguille du Midi). L'enneigement permet de réaliser quelques courses très tard en saison, si l'on accepte de porter les skis sur plusieurs centaines de mètres de dénivellation.

2.1.4.4. L'orientation (au soleil)

L'orientation est un facteur important dans le choix d'une course, qui, même en plein hiver, influe sur l'épaisseur du manteau, la métamorphose de la neige... Ainsi, il peut exister plusieurs centaines de mètres d'écart entre un enneigement dans l'ubac (versant nord) et dans l'adret (versant sud). Les versants ensoleillés reçoivent plus de chaleur que les versants orientés au nord, qui peuvent rester complètement à l'ombre une partie de l'année : la neige transforme plus rapidement dans ces versants exposés au soleil. C'est aussi pour cela que les skieurs recherchent la poudreuse dans les versants orientés au nord. De ce fait, l'instabilité de certaines couches ou accumulations peut également y persister plus longtemps.

Par ailleurs, il existe des différences entre les versants est et ouest : les versants est sont les premiers concernés par le soleil, mais le soleil doit d'abord réchauffer l'air (en général refroidi durant la nuit) avant d'avoir une action efficace sur la neige ; les versants ouest bénéficient du réchauffement de l'air, qui accélère les effets du soleil. Ainsi au printemps, si la neige est transformée, des différences sensibles existent selon l'orientation : rapidement, la neige devient fondante dans les versants orientés à l'est, puis au sud, plus tardivement dans les versants ouest et nord. Cela est utile à avoir en tête quand il faut programmer un horaire de descente : plaisir de la descente et sécurité (la neige dure représente un danger en cas de chute, tandis qu'une neige profondément ramollie peut être la cause de coulée...) sont intimement liés. Mais il faut tenir compte également de l'altitude et du relief qui peuvent modifier profondément le dégel.

➠ Il faut particulièrement en tenir compte pour des pentes raides et des couloirs. Ainsi, si le col du Casset par le couloir Davin (3 261 m, D+, nord) et le Combeynot par sa face nord (3 155 m, D, nord) dans l'Oisans sont *a priori* assez semblables techniquement, il ne vaut mieux pas attaquer la descente dans le même créneau horaire : le couloir Davin, droit comme un I, encastré dans la paroi, reste très longtemps à l'ombre ; au début du mois de mai, on peut généralement entamer la descente vers midi. Le Combeynot offre un versant, qui est touché plus tôt par le soleil : 10 heures est une bonne heure pour attaquer sa descente au début du mois de mai. Le relief joue dans ce cas un rôle prépondérant à ne pas négliger.

En hiver, on peut s'attendre à des différences sensibles dans la qualité de neige : par exemple, les versants est à nord peuvent offrir de la bonne poudreuse, tandis que dans les versants sud à ouest, le skieur devra affronter de la neige croûtée. Inversement, les pentes bien exposées peuvent présenter de la neige bien transformée, tandis que dans les versants à l'ombre, la neige soufflée n'aura pas eu encore le temps de connaître une métamorphose suffisante au goût du skieur. Une fois encore, l'orientation n'est pas le seul facteur à prendre compte car la qualité de neige va dépendre aussi du relief, du vent, de l'altitude... Il n'y a pas à proprement parler une orientation particulièrement propice aux avalanches : selon les conditions nivo-météorologiques, toutes les pentes peuvent être avalancheuses. D'après W. Munter, les versants nord sont impliqués dans 56 % des accidents touchant des skieurs, environ 50 % dans une enquête récente du CAF [5]. Il est difficile de savoir quel crédit accorder à un tel chiffre : les pentes ombragées sont souvent les plus recherchées à cause de la poudreuse, peut-être sont-elles aussi les plus parcourues ? Ou bien le danger local lié à l'instabilité d'une accumulation y persiste plus longtemps ? Lorsque l'on choisit un itinéraire, il est rare de suivre une même orientation sur toute une course. Cela est particulièrement vrai dans la descente, durant laquelle on est amené à rechercher les pentes les plus sûres et avec la meilleure neige (ou la moins mauvaise).

2.2. Les dangers objectifs et subjectifs

En montagne, on parle de *danger subjectif* lorsqu'il est la conséquence d'une erreur ou d'une maladresse de la part du skieur lui-même ; un danger est dit *objectif* lorsqu'il a pour origine un élément du milieu montagnard. Dans cette distinction, il faut prendre garde de ne pas donner une valeur de partialité à l'adjectif 'subjectif' : en effet dans la langue française, un danger subjectif peut vouloir dire que le danger varie avec le jugement, les habitudes (comme lorsque l'on dit qu'un goût est subjectif) ou bien qu'il se rapporte au sujet pensant. C'est bien dans ce dernier sens qu'il faut comprendre son emploi ici. Ainsi une chute à skis est un danger subjectif car elle résulte d'une erreur technique tandis qu'une avalanche est un danger objectif (qui existe indépendamment du skieur) même si c'est une mauvaise estimation de la part du skieur qui en est quelquefois la cause (voir chapitre 6).



En descendant du Pic Blanc du Galibier, randonnée réputée pour l'initiation, deux randonneurs skiant trop près l'un de l'autre déclenchent une plaque ; plus de peur que de mal : la cassure ne fait que quelques centimètres. Les arabesques d'à-côté ne laissaient pas présager l'accident. Cliché C. Ancey.

2.2.1. Avalanche et coulée

Dans la majorité des avalanches concernant des skieurs, ce sont ces derniers qui en sont l'élément détonateur. A ce titre, et avec du recul, on peut considérer que bien des accidents auraient pu être évités avec une bonne connaissance de soi, du milieu montagnard, etc. On ne peut donc se résigner à toujours accepter l'avalanche comme une fatalité. S'il est toujours à peu près facile de dégager *a posteriori* la responsabilité humaine dans le concours de circonstances qu'est une avalanche, il est en revanche plus difficile de prétendre *a priori* ne pas commettre d'erreurs d'estimation. Combien d'entre nous sont passés à un cheveu de l'accident sans même s'en rendre compte ?

Beaucoup de pratiquants prennent conscience du danger une fois l'avalanche partie, cela est parfois trop tard ! Il y a en France, chaque année, en moyenne 25 morts par avalanche. Ce chiffre est faible en comparaison non seulement des autres causes de mortalité en montagne, mais également des milliers de sorties réalisées annuellement en hors-pistes, ski de randonnée… Il peut donc faussement laisser penser qu'en fin de compte, l'avalanche n'est qu'un danger mineur lié à la pratique de la montagne. Néanmoins il faut prendre garde au fait qu'il n'est certainement pas représentatif du nombre total d'accidents survenus et pour lesquels il n'y a pas eu de victimes, parce que soit les personnes n'ont pas été emportées, soit elles n'ont pas été ensevelies, soit elles ont pu être dégagées à temps sans qu'il y ait déclenchement de secours extérieurs. A titre d'exemple, une enquête récente menée sur 690 adhérents du CAF a montré que 20 % d'entre eux avaient été emportés au moins une fois par une avalanche [5-6].

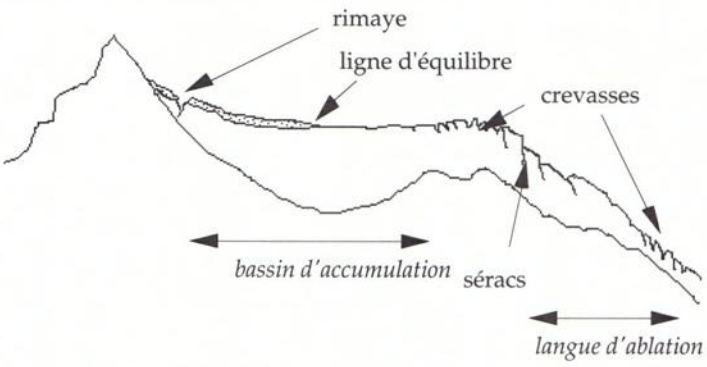
2.2.2. Parcours sur glacier : crevasses et séracs

Au-delà d'une certaine altitude (appelée *ligne d'équilibre*), le bilan annuel entre l'accumulation de neige et la fonte est positif : c'est le domaine de la neige permanente où l'on trouve névés et glaciers. Ces derniers résultent de la lente transformation en glace de la neige [7]. Lorsque le glacier prend sa source en altitude dans un vaste cirque ou bassin d'alimentation, d'importantes quantités de



Beauté et danger du ski sur glacier (descente du col d'Argentières, massif du Mont-Blanc). Cliché C. Ancey.

neige nourrissent le glacier. Sous l'action de la pesanteur, ce dernier s'écoule vers le bas de la vallée : le glacier des Bossons dans le massif du Mont-Blanc descend ainsi jusqu'à 1 300 mètres d'altitude.



➡ Figure 6.
Morphologie d'un glacier. C'est l'été que l'on peut le mieux observer et comprendre un glacier car il est le plus souvent à nu, la neige ne persistant qu'en altitude.

Cette lente descente s'accompagne d'un certain nombre de phénomènes annexes dus au mouvement de la glace :

- la *rimaye* est une grande crevasse qui se développe le long des parois (rocher ou glace) et qui marque la limite supérieure du glacier ;
- la *crevasse* est une fissure qui prend naissance lorsque la glace est localement soumise à un effort de traction supérieur à sa résistance. La surface du glacier se craquelle alors en crevasses dont la taille est très variable ;
- le *sérac* apparaît dans des zones de fracture intense ; la glace forme alors des murs de glace.

Le ski sur glacier offre des plaisirs (évolution dans un paysage grandiose) et des avantages (enneigement tardif) mais aussi de nombreux dangers [8] :

• le skieur peut chuter dans une crevasse : durant l'hiver et au printemps, au fil des chutes de neige, les crevasses sont plus ou moins recouvertes de neige. Parfois

invisibles sous le manteau neigeux, parfois plus ou moins apparentes avec des ponts de neige qui l'enjambent, les crevasses sont des pièges à redouter et qui ralentissent la progression du skieur à la montée comme à la descente. Leur taille est également extrêmement variable : quelquefois béantes, elles sont des obstacles infranchissables mais bien visibles ; d'autres fois, leurs faibles dimensions les rendent invisibles ou si des signes en surface indiquent leur présence, elles n'alarment pas le skieur. Les ponts de neige fragiles au-dessus d'une grosse crevasse ou de petites crevasses perfides sont les principales causes d'accident sur glacier ;

• le skieur peut dévisser et glisser dans une crevasse ou par-dessus un sérac. Localement des plaques de glace vive peuvent subsister ou apparaître sur les pentes raides, les arêtes... Une coulée peut de même entraîner le skieur dans une crevasse ;

• un sérac peut s'effondrer et se briser en blocs de glace qui dévalent rapidement la pente. Dans certains cas, une chute de sérac, même de faible ampleur, peut causer dans la zone qu'il surplombe le départ d'une avalanche. La rupture d'une tranche de sérac est due à l'avancée du glacier et non directement à des facteurs thermiques ; elle peut se produire à tout moment de la journée de manière imprévisible. Lorsqu'il passe au-dessous d'une zone de séracs (même située bien au-dessus de lui), le skieur doit se méfier, surtout s'il s'agit de formes audacieuses... et promptes à se rompre ;

• il faut noter aussi que selon certains, la présence de la glace sous le manteau neigeux influence les métamorphoses de la neige ; par exemple, le flux thermique de sol est dans ce cas nettement moindre. Selon certains, la formation de gobelets est ralentie sur les glaciers [8]. Il reste néanmoins difficile de préciser dans quel sens la présence d'un glacier influe sur la stabilité d'un manteau neigeux.

➠ Une fois les dangers exposés, il convient de rappeler les parades. Sur glacier, il faut se munir individuellement d'un baudrier et du minimum de matériel (une corde par petit groupe, mousquetons, prussile, voire piolet, auto-bloquants, broche à glace, sangles...). Le minimum de techniques (progression encordée, assurage, encordement) doit être parfaitement connu et on peut s'exercer avec profit à d'autres techniques plus pointues (remontée de corde, mouflage... voir par exemple [9-10]). La question de savoir quand il faut s'encorder est plus délicate, et beaucoup préfèrent garder la corde dans le sac ; à ce sujet, on dit toujours que le meilleur moyen de se fâcher avec un ami est de skier encordé avec lui. Mais il n'y a aucun problème si l'on fait les choses correctement : le premier réalise une trace la plus facile possible ; les suivants qui skient sans bâton, peuvent récupérer la corde si besoin est. En repassant durant l'été sur un glacier descendu au printemps à skis, on peut prendre peur en voyant la surface de type gruyère sur laquelle on est passé sans guère de soucis. Méfiance donc ! Et combien d'anecdotes racontées les soirs au refuge colportent des récits d'accidents souvent cocasses mais qui auraient pu plus mal se terminer. Sur des zones particulièrement crevassées, par temps de brouillard ou lorsque la neige est fraîche ou soufflée en surface et cache les crevasses, il est recommandé de s'encorder à la montée. A la descente, on peut dans certains cas estimer que la vitesse et la faible pression exercée par les skis sont suffisantes ; on prendra garde de ne pas skier serrés, de ne pas se regrouper trop près... De même, il est prudent de garder toujours un ski au pied quand on déchausse (pour enlever les peaux de phoque par exemple). Une astuce peut s'avérer utile en cas de chute en crevasse (surtout si elle étroite) : on place un mousqueton sur la sangle dorsale de son sac à dos, on le relie ensuite au mousqueton du baudrier par une boucle (environ 3 mètres en 8 mm) par-dessus l'épaule. Les opérations de sauvetage en sont ainsi facilitées : en effet si le skieur reste coincé dans une crevasse étroite, les sauveteurs n'ont aucune prise sur lui pour le tirer (hormis la tête) s'il ne possède pas cette cordelette.

Observer le terrain est en général suffisant. Les changements de pente (zones convexes), les changements de direction, un obstacle qui perturbe l'écoulement glaciaire sont souvent accompagnés de crevasses. Des petites fentes, une varia-

tion de couleur, un léger sillon sont quelquefois des indices de leur présence. Les traversées dans le sens de la largeur du glacier sont parfois dangereuses, car les skis se trouvent dans l'axe d'une éventuelle crevasse. Les séracs doivent être regardés avec méfiance et il faut évaluer leur fragilité. Certaines courses comme le Grand Combin (Valais) sont réputées pour leur exposition à ce danger. Les glaciers sont aussi le plus souvent accompagnés de moraines et de roches moutonnées. Remonter le long de la crête faîtière d'une moraine latérale, s'aider des contre-pentes (si la ligne de crête monte trop), descendre dans le sillon formé entre la moraine et la paroi évite de parcourir la langue d'ablation (nombreuses crevasses longitudinales) et assure la sécurité de la trace.

2.2.3. Obstacles naturels et les autres risques

Une barre rocheuse représente un danger en cas de chute du skieur (entraîné par une glissade, une avalanche, perdu dans le brouillard...). Il faut être particulièrement vigilant lorsqu'on est au-dessus d'un ressaut rocheux (éviter des conversions hasardeuses par exemple). Une corniche peut se rompre, si le skieur s'approche malencontreusement trop du vide, et l'entraîner dans une chute parfois vertigineuse.

2.3. Quelques règles simples

2.3.1. Choix du tracé

Le choix d'un itinéraire répond aux exigences suivantes (parfois contradictoires entre elles).

• *Minimisation du risque* : recherche des zones les plus sûres ou les moins exposées (avalanche, crevasse, ressaut, pente raide...).

• *Principe d'économie* : réduction des efforts inutiles. L'itinéraire le plus simple n'est pas forcément le moins fatigant. Inutile par exemple de se perdre dans la végétation (vernes, forêt dense) alors qu'on peut la contourner ou de s'aventurer dans un versant accidenté alors qu'on peut trouver en allant un peu plus loin une combe tranquille...

• *Recherche esthétique* : recherche de la progression la plus esthétique, la plus variée, offrant le plus beau point de vue...

• *Simplicité* : recherche du cheminement le plus logique. Il existe des lignes plus évidentes que d'autres : thalweg, crête, combe...

• *Facilité* : par temps de brouillard, il faut des points ou des lignes faciles à trouver ou à suivre, quitte à faire un long détour.

On a donné ici des critères fixes liés le plus souvent à la topographie. On peut aussi tenir compte des facteurs variables (nivologiques par exemple) avec plus ou moins de bonheur : ainsi si l'on s'attend à trouver de la neige fraîche, on peut délaisser le fond des combes pour les crêtes en général plus dégarnies. De toute manière, c'est sur le terrain que se fait le choix définitif (voir chapitre 10).

2.4. Composition du groupe

2.4.1. Partir seul

On sort en solitaire parfois par goût, souvent faute de compagnon... Il y a le (vrai) solitaire, celui qui part seul pour un itinéraire vierge et isolé, loin des sommets fréquemment courus. Il y a celui qui part sans compagnon, certes, mais qui réalise un sommet où il sait qu'il ne sera pas seul. Il y a encore l'amateur de couloirs extrêmes, qui réalise en solo des courses de haute difficulté... Il y a le skieur de piste qui tente l'aventure hors du domaine sécurisé. C'est une pratique qui, quoique le plus souvent déconseillée, permet de parcourir différemment la montagne; elle demande de l'expérience, car on ne peut commettre d'erreur : une mauvaise chute, une petite coulée peuvent prendre des conséquences dramatiques. Elle exige donc une bonne connaissance de soi, du milieu montagnard et de la tech-

nique. On ne skie pas seul comme on skie à deux, il faut se ménager une grande marge de sécurité pour aborder ce type de parcours avec sûreté. Au moindre doute sur la stabilité du manteau neigeux, il ne faut pas tenter de forcer le passage, mais passer ailleurs ou renoncer : pour ne pas s'exposer, ne pas s'imposer. Prévenir de son départ un proche est recommandé ; si l'on dispose d'une radio (par exemple les gardes-moniteurs, les pisteurs...), des appels fréquents à la base permettent de déclencher assez rapidement les secours en cas de silence prolongé.

2.4.2. Partir à plusieurs

La sortie d'une petite équipe est souvent ce qui est le plus agréable et le plus sûr. Le niveau technique et la forme physique sont le plus souvent homogènes ; les skieurs sortent par affinité. Si l'on emmène un débutant, il est plus commode de s'en occuper. Il est aisé facile d'assurer un minimum de sécurité : décision facile à prendre, et en cas d'accident, si les consignes de sécurité sont respectées, il y au pire un enseveli et au moins une personne pour le dégager, etc. Il faut absolument veiller à prendre individuellement son matériel de sécurité : ARVA, pelle, sonde (voir à ce sujet l'anecdote sur les pelles § 3.2.1.).

2.4.3. Partir en collective

Dès que le groupe commence à devenir important (plus de dix personnes), de nouveaux problèmes peuvent commencer à surgir (voir au chapitre 10 les anecdotes à ce sujet).

• Le groupe est souvent hétérogène : le rythme de progression est différent entre les premiers et les derniers, il faut plus de temps pour franchir des obstacles... Il ne faut pas oublier que c'est le plus lent qui impose son rythme au reste du groupe. On peut désigner un serre-file qui soutient les retardataires, les égarés, aide à réparer les problèmes techniques (fixations mal réglées, peaux de phoque...).

➠ Un randonneur, en raid dans les Écrins, s'éloigne à la descente de son groupe pour récupérer un gant qu'il a laissé filer malencontreusement. La visibilité étant médiocre, il saute une corniche et part sur plusieurs dizaines de mètres dans une coulée. Enseveli, il arrive néanmoins à se dégager. Il rejoint son groupe. Personne ne s'était aperçu de sa disparition.

• S'il n'y a guère de problème d'autorité au sein d'une équipe, il est nécessaire qu'un groupe important soit mené par un chef qui prenne les décisions (itinéraire, estimation du risque, conduite de la course, organisation du secours en cas d'accident...). Il est choisi pour son expérience, ses qualités de chef (organisation, communication, sens de la sécurité). Devant la loi, sa responsabilité peut être mise en cause en cas d'accident. S'il y a conflit de personnes, surtout lors de situations critiques (brouillard, risque d'avalanche...), la sécurité entière du groupe peut être mise en jeu (voir anecdotes au chapitre 10).

• La sécurité est plus difficile à assurer : surcharge importante exercée par un groupe lorsque ses membres ne respectent pas les distances de délestage, comportement anarchique (surtout à la descente, où chacun fait sa trace), difficulté à imposer des mesures de sécurité, lenteur et désordre dans les situations de crise...

• La présence du nombre amène un faux sentiment de sécurité, d'autant qu'elle incite à un certain "panurgisme" (se laisser conduire, pas d'initiative...).

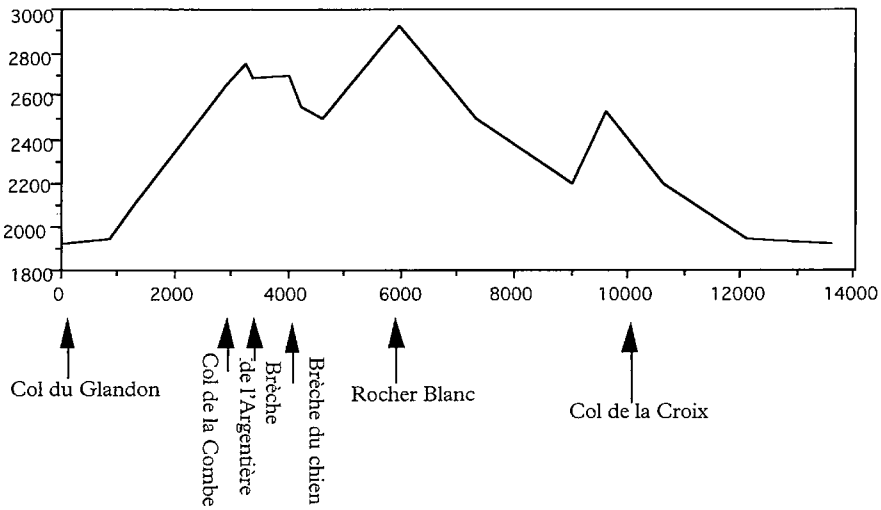
• Le chef de courses a plus de peine à prévoir un itinéraire, à calculer l'horaire, à connaître l'état de fraîcheur de ses troupes...

2.5. L'horaire

A quelle heure commencer une course, entamer une descente, s'engager dans un couloir ? Ce sont des questions délicates, dont la réponse doit amener à se poser une multitude d'autres questions qui précisent le contexte.

- Faudra-t-il faire la trace ? A la montée, si la neige est dure, la progression pourra être rapide (à moins de pentes très soutenues) ; s'il s'agit de neige profonde sans trace, l'effort du premier sera important et l'allure sera considérablement ralentie.
- La neige est-elle portante ? Quelle qualité de neige ? Croûtée, poudreuse, transformée ? Cela est important pour le traceur, mais également pour les autres (par exemple à la montée en neige pourrie, à la descente, pour ceux à qui une neige profonde pose des problèmes techniques).
- Y a-t-il des obstacles ? Cela peut freiner considérablement l'allure : traversée dans les vernes, passage d'un goulet, d'une corniche, d'une zone crevassée, d'un raidillon...
- Quel est le profil de la pente ? S'agit-il d'une montée régulière, est-elle entrecoupée de replat, de faux plat ou de traversée ? Y a-t-il des descentes ou des remontées intermédiaires ? Quelle est la dénivellation totale ?
- Dans quel contexte la course est-elle réalisée ? Allure sportive, allure adaptée au raid, allure "touristique" ?
- Quelles sont les conditions nivo-météorologiques ? Peut-on craindre du brouillard, une neige qui botte, un vent violent, un temps trop chaud ?
- Qui participe à la course ou à la descente ? Nombre, niveau technique, forme physique ? Combien de haltes sont nécessaires compte tenu du degré d'entraînement des participants ?
- Quels sont les impératifs horaires liés à la course ? A partir de quelle heure faut-il envisager la descente d'un couloir à l'ombre ? Avant quelle heure faut-il être passé dans telle pente très ensoleillée ?

Classiquement, on considère qu'une allure moyenne correspond à une dénivellation horaire de 300 m/h sur une pente à la montée, 800 m/h à la descente, et à une vitesse de 4 km/h sur du plat. On comprend dans ces chiffres les pauses (casse-croûte, crème solaire...). Selon le terrain et la neige, selon les personnes et le degré d'entraînement, ce rythme peut être bien plus important : un randonneur entraîné atteint facilement les 600 m/h, un randonneur sportif (compétiteur...) dépasse les 1 000 m/h. Dans certains cas (itinéraire complexe, groupe important...), il est utile de tracer un profil de la course pour bien gérer son temps.



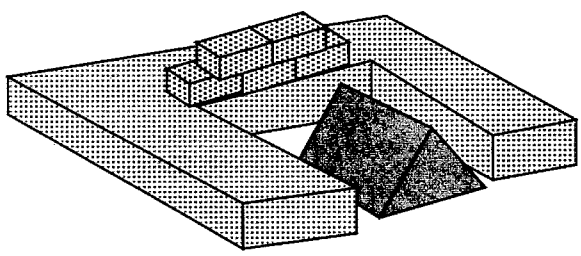
➟ Figure 7. L'exemple donné ici traite le cas de la traversée est-ouest des aiguilles d'Argentière, au-dessus du col du Glandon à la frontière entre la Savoie et l'Isère (voir aussi [11], course n° 41). Au départ du col (1 924), on commence par une traversée puis on suit le thalweg qui mène au col de la Combe (2 656). La fin est raide et, en fin de saison, déneigée (mauvais rochers) : elle peut donc nécessiter un peu de temps (déchausser les skis, voire crampons et corde pour les moins rassurés). Du col, on remonte à la brèche du Chien (2 750). De là deux possibilités : descendre à pied et continuer jusqu'à la brèche suivante en peaux de phoque ou bien, si la neige est dure (ce qui est sou-

vent le cas) enlever les peaux, descendre légèrement le couloir sur 50 mètres, prendre de la vitesse en restant bien sur la courbe de niveau jusqu'à la brèche de l'Argentière (2 700). Ainsi, on gagne du temps et de toute manière, il aurait fallu "déphoquer" à la dernière brèche. De là, on descend dans la combe Madame en tirant bien sur le flanc pour ne pas descendre trop bas. On monte ensuite au Rocher Blanc (2 927 m) sans problème. Du sommet, on se laisse glisser sur le glacier de la Combe jusqu'au pied du col de la Croix (2 529). Du col, on descend vers la combe de la Croix ; on franchit la première barre par la droite. On suit ensuite le fond du thalweg jusqu'à récupérer le chemin d'été (si la neige est insuffisante) ou par une traversée à flanc jusqu'au col du Glandon (légère remontée). La dénivelée totale est de 1 580 m, un passage délicat (le col de la Combe), deux arrêts pour les peaux de phoque : il faut compter en moyenne 5 heures de montée et 2 heures de descente et de pause. Cette course se fait généralement en fin de saison (fin mai à début juin) afin que la route du col du Glandon soit ouverte à la circulation. Un départ entre 5 h 30 et 6 h 00 paraît raisonnable et garantit toutes les chances de trouver une bonne neige. Certes la combe de la Croix est orientée plein est, mais elle est plate et la neige bien transformée à cette altitude. Le glacier, quant à lui, est orienté au nord et devrait être en bonne neige, peut-être un peu dure.

2.6. Le stationnement

2.6.1. Le raid

Le raid est considéré comme "la forme la plus complète de la pratique du ski de montagne"[3]. Raid "étoile" (on réalise les courses à partir d'un même lieu, qui sert de camp de base) ou raid "itinérant" (traversée, haute-route, tour d'un massif), il nécessite toute une organisation spécifique (logistique : transport, hébergement, technique : matériel, répartition des charges, entraînement...) par rapport à une course d'une journée. Avant le départ, on bénéficie des prévisions météorologiques et du BNA, mais une fois engagé, le groupe n'aura plus de moyens d'information extérieurs sur les conditions nivo-météorologiques, hormis si l'itinéraire passe par des refuges gardés. En cas de changement des conditions, il faut savoir analyser la situation et prendre la décision adéquate : renoncer, attendre, prendre une variante, continuer. Le raid peut se faire à partir de refuges gardés ou non. Au printemps, il est souvent obligatoire de réserver en téléphonant (la plupart des refuges en sont désormais pourvus) au gardien. Dans les traversées non équipées de refuges, ou pour les adeptes de l'autonomie totale, on peut choisir le bivouac sous tente ou igloo. Il existe plusieurs modèles de tente prévus à cet usage : faciles à monter, résistants au vent, légers (environ 1 kg par personne), isolants (humidité, froid), transportables (une fois montées)... Par fort vent, on peut protéger sa tente en l'enterrant (prendre garde à ce qu'elle ne soit pas ensevelie en cas de transport de neige par le vent). Une alternative existe aussi : la construction d'igloo, qui peut constituer un agréable moyen de bivouac et un abri de fortune confortable par temps froid ou mauvais [12].



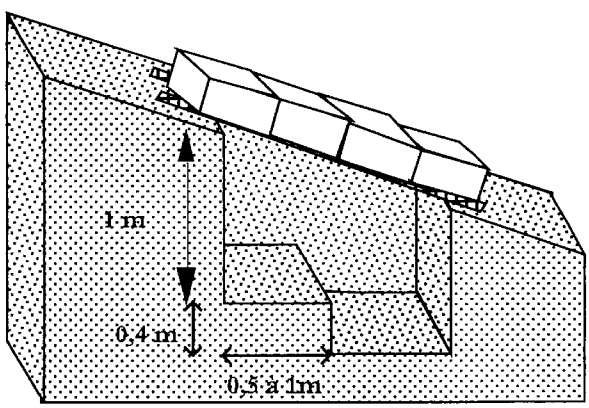
➡ Figure 8.
Protection de la tente contre le vent.

2.6.2. L'abri de fortune

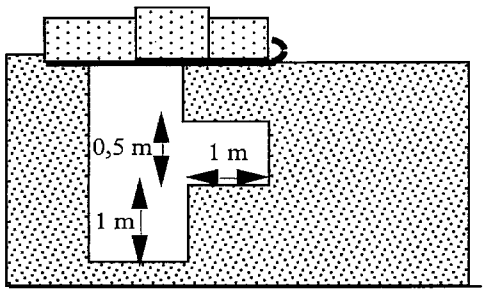
En parlant d'igloo, on songe souvent à l'habitat esquimau. En fait, il existe une multitude de variantes. Nous donnons ici quelques indications sur les abris creusés. Le principe consiste à utiliser le pouvoir isolant de la neige en creusant une cavité dans la neige ; si l'épaisseur des parois est suffisante (au moins 40 cm de neige), la température à l'intérieur de l'abri sera beaucoup plus clémente (proche de 0 °C) que la température extérieure. On aménage également une tranchée, appelée *fosse à froid*, qui sert à piéger l'air froid (plus dense que l'air chaud).

3. Cette citation est due au guide Jean-Louis Georges.

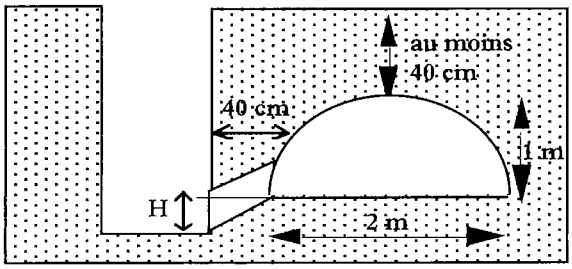
Pour creuser un abri, il faut une épaisseur de neige suffisante (au moins 1,50 m) ; une sonde permet de déterminer les zones propices (en général, les fonds de combe sont bien garnis). Les neiges fortement humidifiées rendent impossible la construction d'igloo tandis que la neige fraîche nécessite d'être tassée. En cas de mauvais temps, il faut choisir convenablement le site en évitant les trajectoires d'éventuelles avalanches. Il existe plusieurs variantes selon le temps dont on dispose, le nombre de personnes, le contexte (bivouac, abri de fortune), la qualité de neige...



➡ Figure 9.
Schéma de réalisation du trou dans la neige (banquette et fosse à froid).



➡ Figures 10 et 11.
Deux types d'abri : banquette et igloo creusés dans la neige.
C'est la tranchée qui sert de fosse à froid.

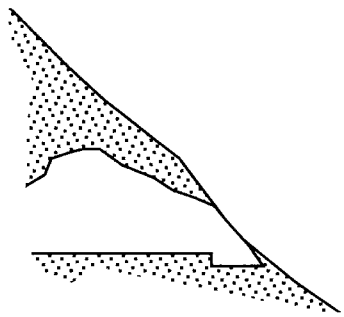


☞ *Trou dans la neige* : c'est la réalisation la plus simple, il faut environ 1 heure pour dégager l'espace nécessaire. On aménage une fosse à froid d'au moins 40 cm de profondeur. Les dimensions de la banquette sont au goût de son architecte. On construit un toit en plaçant les paires de ski en travers (ancrées dans la neige), une couverture de survie ou une bâche et des blocs de neige pour servir d'isolation.

☞ *Banquette* : c'est une version un peu plus sophistiquée du trou. On creuse une tranchée d'environ 1,5 à 2 m de profondeur. Le déblai de neige sert à épaissir le manteau neigeux. On aménage aussi une fosse à froid et on dispose un toit. Il faut au moins deux heures à deux pour construire cet abri.

☞ *Abri sous neige* : la réalisation est nettement plus longue et nécessite au moins 4 heures (voire plus si la neige est dure) pour 4 personnes. Il faut prévoir des vêtements imperméables et de rechange. La première étape consiste à creuser une tranchée (environ 2 mètres de profondeur) ; pendant que deux skieurs creusent, les deux autres étalent et tassent la neige avec leurs skis (au moins 1

heure). Un escalier permet de se déplacer plus facilement. Durant la deuxième étape, la plus pénible et humide, on creuse le tunnel d'accès (à la pelle, au piolet...) d'une quarantaine de centimètre de diamètre, puis on commence à dégager l'espace intérieur (1 heure). Une seule personne peut travailler à cette tâche et il faut se relayer périodiquement pour garder un bon rythme et reprendre des forces ; les deux autres évacuent la neige dégagée par dessus. La hauteur H de la banquette doit être choisie de sorte qu'elle soit au-dessus de l'entrée extérieure afin de mieux garder l'air chaud. Il faut encore deux bonnes heures (suivant la neige) pour aménager un espace vivable à quatre. La hauteur à l'intérieur de l'abri doit permettre la position agenouillée. La température est toujours proche de 0 °C.



➡ Figure 12.
Cavité creusée dans une pente.

☞ *Cavité* : On peut creuser une cavité dans la pente (raidillon, contre-pente, congère...) un peu comme une grotte. Si la neige est dure, il faut l'attaquer au piolet. C'est une technique utilisée par exemple dans les pentes raides en Himalaya. L'isolation est complétée par des blocs de neige à l'entrée.

3. Le matériel de sécurité

3.1. L'ARVA*

3.1.1. Principes

L'ARVA (appareil de recherches de victimes d'avalanche) est un appareil émetteur/récepteur gros comme un paquet de cigarettes, d'un poids de l'ordre de 200 g, qui permet une localisation immédiate d'une personne ensevelie par ses compagnons. C'est le seul moyen permettant une opération de secours immédiate et en totale autonomie. Il doit être considéré comme un élément indispensable de l'équipement du montagnard. Quel que soit le modèle d'ARVA utilisé, il n'est pas d'un grand secours si l'on ne possède pas également une pelle.

Pendant des années deux types d'appareil, fonctionnant sur des fréquences incompatibles entre elles, ont cohabité : basse fréquence (2 275 Hz, notamment les Pieps 1 et 2) et haute fréquence (457 kHz comme le Barryvox suisse). Par la suite, les fabricants se sont attachés à produire des appareils bi-fréquence, puis la mono-fréquence haute. Aujourd'hui, la situation est la suivante[4] :

- de nombreux montagnards sont encore équipés d'appareils bi-fréquence (ARVA 4 000, Ortovox F2, Pieps DF) ;
- il subsiste même de fervents partisans du Pieps 2. Ce type d'appareil doit être proscrit : même s'il semble encore fonctionner, ce n'est parfois qu'une dangereuse illusion car il peut subir une forte réduction de sa portée utile. De plus, il est totalement incompatible avec les appareils à haute fréquence. La remarque vaut pour tous les appareils fonctionnant exclusivement sur 2 275 kHz ;
- chacun des cinq principaux pays de l'arc alpin produit son propre modèle d'appareil mono-fréquence haute : ARVA 8 000 et 9 000 (France), Ortovox F1 (Allemagne), Barryvox (Suisse), Pieps 457 (Autriche) et Fitre (Italie). On trouve aussi sur le marché des appareils slovaques (Berdin), japonais (AB 15) et américains (Skadi).

*Ce texte de J.-P. Zuanon, est tiré en partie de "ARVA, Mode d'emploi" [13].

4. Sur d'autres systèmes (Recco, balise), voir le chapitre 11.

On ne peut parler dans le détail des mérites respectifs de ces différents appareils, dont aucun n'est parfait (bruit de fond, maniement plus ou moins difficile, fragilité de certaines pièces). Les portées théoriques annoncées par les fabricants (parfois supérieures à une centaine de mètres) et établies en laboratoire n'ont pas grand-chose à voir avec les portées réelles, qui sont généralement de l'ordre de 30 ou 40 mètres. Le fait qu'un appareil ait une grande portée théorique ne constitue pas nécessairement un avantage : on perçoit plus rapidement un premier signal mais la variation n'est pas toujours significative entre 100 et 50 mètres. En outre, si l'on perçoit rapidement un premier signal, cela signifie que l'on a ensuite une surface plus importante à balayer. Plus que la portée maximale, le critère dans le choix d'un appareil doit être sa fiabilité : certains appareils cessent parfois d'émettre et se remettent en route après un petit coup sur le boîtier.

Haut parleur ou écouteur? L'un et l'autre présentent avantages et inconvénients : l'écouteur est fragile, mais une fois qu'on l'a installé dans l'oreille, on ne s'en soucie plus. On peut éventuellement utiliser un casque de baladeur, qui permet de travailler avec les deux oreilles. Le haut-parleur est plus solide mais, par définition plus bruyant, il risque de perturber d'autres chercheurs proches. Son utilisation peut être difficile en cas de fort vent. Il faut signaler des aides à la recherche (diodes lumineuses indiquant la direction) dans la dernière génération d'ARVA.

3.1.2. Méthodes de recherche

Il existe deux méthodes de recherche : la méthode traditionnelle avec déplacement du chercheur selon des axes perpendiculaires successifs (dite méthode de la croix) et la méthode dite directionnelle, où l'on se dirige en décrivant une courbe irrégulière correspondant aux lignes de champ électromagnétique de l'émetteur. Il est difficile de se prononcer sur la supériorité de l'une ou l'autre. L'important est d'en posséder parfaitement l'une des deux. Relevons néanmoins que des novices sont parfois plus efficaces avec la méthode directionnelle, relativement intuitive. En outre, la méthode directionnelle implique des déplacements relativement longs, souvent pénibles en terrain raide et difficile (tel le dépôt d'une avalanche). Au contraire, la méthode en croix permet de contourner plus facilement les obstacles et elle n'implique pas de déplacements pénibles. Elle permet ainsi d'arriver relativement en forme au moment où il faut creuser.

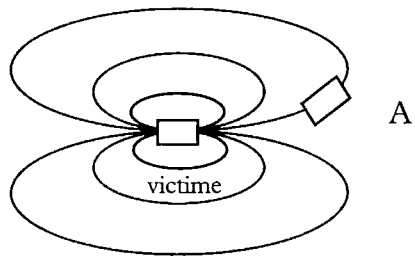
Ces deux techniques reposent sur le même principe : plus on se rapproche de l'appareil enfoui, plus le son est fort. Il est indispensable d'être très attentif aux variations d'intensité du signal. Pour éviter tout phénomène de saturation, il convient de travailler avec le minimum d'intensité audible. Une bonne technique de recherche suppose toujours que l'on maîtrise parfaitement l'utilisation du potentiomètre. Conséquence directe : une bonne recherche "à l'oreille" doit se faire en silence. Certains individus manquant de finesse auditive ne sont guère sensibles à la notion de variation d'intensité du signal. Dans ce cas, ils peuvent avoir recours au système visuel Visovox (potentiomètre à aiguille).

Cas particulier : comment faire lorsqu'il y a plusieurs appareils enfouis ? On perçoit alors plusieurs signaux et c'est une situation peu confortable. Toutefois, il est exceptionnel que ces signaux aient exactement la même intensité et la même amplitude. Il suffit donc de se déplacer de quelques pas pour se rendre compte que l'un d'eux augmente d'intensité. Il faut alors privilégier ce seul signal et ne plus prêter attention aux autres.

Recherche directionnelle

Le principe est simple : il s'agit de remonter les lignes de champ. Lorsque l'ARVA du chercheur est parallèle à la ligne de champ comme en A, le son est maximum. Cette intensité diminue si l'on tourne l'appareil sur lui-même. Pour

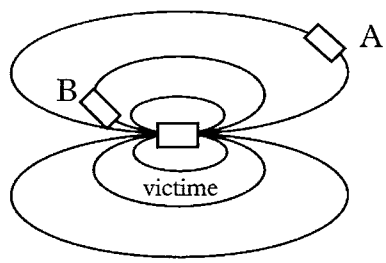
arriver à la victime, il faut donc suivre la direction donnée par le son maximum. Lorsqu'il y a perception du premier signal, on tourne l'appareil devant soi sur un plan horizontal pour déterminer la direction dans laquelle le son est maximal. On marche environ 4-5 mètres dans cette direction, sans changer la position de l'appareil. On s'arrête de nouveau, on fait le point, en réduisant l'intensité du son. Lorsque, le potentiomètre étant positionné sur 0-2 mètres, le son commence à décroître alors qu'on avance, cela signifie qu'on est aux environs immédiats de la victime. On passe alors à la phase finale de la localisation.



➡ Figure 13.
Lignes de champs émises par l'ARVA.

Remarques :

– Le terme de recherche directionnelle est employé de façon impropre : on ne va pas directement sur la victime[4]. Le fait de suivre des lignes de champ peut entraîner des trajectoires *a priori* aberrantes : il faut faire confiance à son oreille et ne pas se laisser influencer. Il y a des cas où l'on semble s'éloigner de l'appareil caché (comme en A), et d'autres où l'on s'en rapproche pratiquement en ligne droite, comme en B. Il est important de bien connaître ce phénomène pour ne pas être désorienté.



➡ Figure 14.
Principe de la méthode directionnelle.

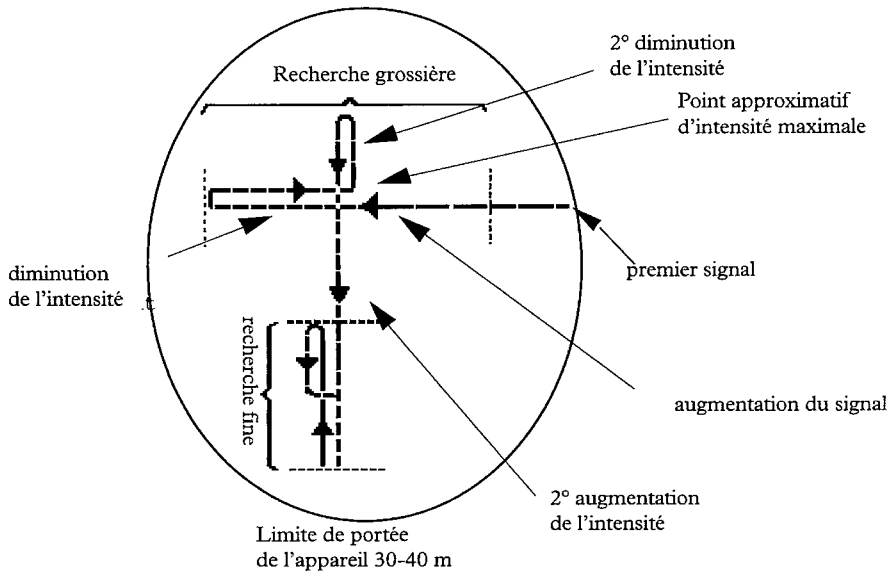
– Il faut toujours bien dissocier les deux phases : recherche du son maximal et progression. Cette dernière doit se faire sans arrêt ni hésitation.
– Au départ, il se peut qu'on parte dans la mauvaise direction. L'extinction rapide du signal signifie qu'il faut revenir sur ses pas et repartir à 180°.
– Il se peut que l'on perçoive mal le son maximal et que l'on ait de la difficulté à déterminer la bonne direction (oreille ou appareil déficient). Dans ce cas, il faut déterminer les positions dans lesquelles, à gauche et à droite, le son disparaît et prendre la direction donnée par la bissectrice de l'angle ainsi formé.

Recherche classique par angles droits successifs (recherche en croix)

A la réception du premier signal, le chercheur continue tout droit. Le signal croît, passe par un maximum puis décroît et disparaît. Pour gagner du temps, il n'est pas nécessaire d'aller jusqu'à l'extinction du signal. Dès que celui-ci décroît, on revient en arrière en baissant le potentiomètre jusqu'au minimum audible. On repasse par le point d'intensité maximale (éventuellement défini par un nouveau dépassement). De ce point, partir à angle droit par rapport à la direction de marche précédente. On se rend compte très vite si l'on est parti du bon côté (intensité croissante) ou du mauvais côté (perte rapide du signal). On applique alors la même technique que précédemment, toujours en baissant le seuil de

4. Les Suisses l'appellent plus justement *méthode pseudo-directionnelle.*

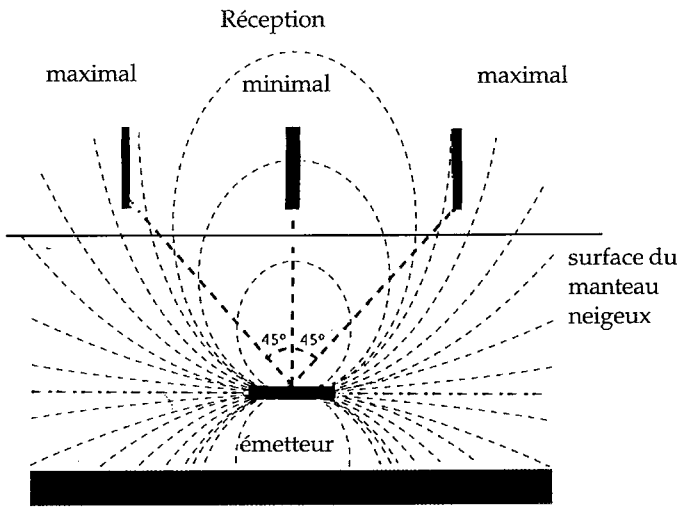
réception et ainsi de suite jusqu'à un volume minimal, ce qui correspond généralement à une petite zone de recherche d'un mètre carré ou moins.



➟ Figure 15. Recherche par angles droits.

Recherche finale

Quelle que soit la méthode utilisée, la recherche finale se fait toujours en croix. Aux environs immédiats de la victime, l'ARVA doit être placé au ras de la neige (poser un genou au sol pour plus de facilité) et déplacé parallèlement à lui-même sur 3 mètres environ. Du point correspondant à l'intensité maximale, on recommence à la perpendiculaire et toujours sans bouger l'appareil. Le nouveau point d'intensité maximale est à peu de chose près à l'aplomb de la victime.



➟ Figure 16.
Cas où l'ARVA se situe au milieu des deux extrema. Un cas analogue se produit lorsque l'appareil est placé verticalement.

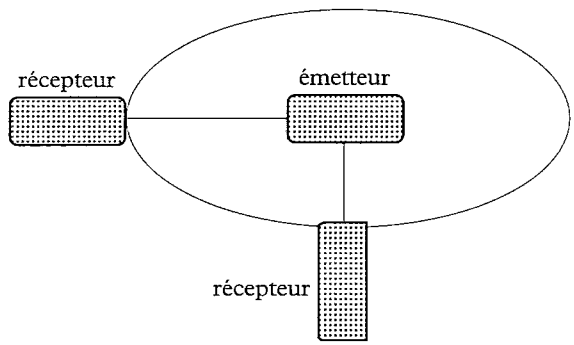
Il existe parfois deux points d'intensité maximale. La victime se trouve alors à la verticale du point situé au milieu. Si l'on ne décrit pas une croix de trois mètres d'amplitude, on risque fort de manquer le deuxième point d'intensité maximale, lorsqu'il existe... et de creuser inutilement là où il ne faut pas. Cette recherche acoustique peut être complétée et facilitée par des moyens visuels comme le Visovox (Ortovox) déjà mentionné ou l'Opti-Finder (Pieps-Motronic). Le nouvel Ortovox F1 plus, tout comme l'ARVA 8 000, possède une

diode lumineuse qui clignote avec d'autant plus d'intensité que l'on est plus près de la victime.

3.1.3. Précautions à prendre

L'ARVA est un appareil fragile et il faut en prendre le plus grand soin. Il faut en changer les piles régulièrement : on doit les enlever à chaque fin de saison et les remplacer de façon systématique, même si l'appareil n'a pas beaucoup servi. N'utiliser que des piles alcalines. Les piles rechargeables sont déconseillées car elles subissent une perte presque instantanée de puissance. Il est préférable d'utiliser des appareils disposant de système de test de charge des piles. Comme n'importe quel appareil, l'ARVA s'use et il faut le remplacer à intervalles réguliers. Il faut en surveiller les fonctions car il arrive qu'un appareil marche correctement en émission et mal en réception et inversement. Il est indispensable que chacun connaisse parfaitement les caractéristiques et le maniement de l'appareil dont il dispose. Si l'on se trouve en groupe, il est conseillé de faire le point sur les différents appareils présents (surtout s'il s'agit d'appareils prêtés ou loués). Les dispositifs de mise en route, de passage émission-réception, le fonctionnement du potentiomètre, l'utilisation de l'écouteur (quand il y en a un), la signification de certaines diodes lumineuses varient d'un modèle à l'autre. Ces petits problèmes anecdotiques en situation normale, peuvent poser de graves problèmes en situation de crise.

Dans un groupe utilisant plusieurs types d'appareils, la portée à considérer en cas de recherche est celle de l'appareil le moins performant. Elle peut être réduite avec l'usure des piles. Il faut enfin savoir qu'elle varie considérablement selon la position respective des appareils émetteur et récepteur. Il est également important de ne pas oublier que, dans le cas de deux appareils de modèles différents en présence, la portée utile est réduite de façon parfois sensible.



→ Figure 17.
La portée est la plus grande quand les appareils émetteur et récepteur sont parallèles à leur axe longitudinal et devient la plus faible lorsqu'ils sont placés selon un axe perpendiculaire.

3.1.4. Entraînement

On peut le scinder en trois phases : se familiariser avec l'appareil (travail à vue), mettre en application une méthode de recherche (ou les deux), simuler l'organisation de secours.

Travail à vue

Il faut d'abord faire prendre conscience aux participants des variations de portée en fonction du type d'ARVA, de l'état des piles et de la position des appareils. On place donc successivement sur le sol, bien en vue et dans la même position, tous les types d'appareils dont on dispose en émission. Pour chaque appareil, les élèves vont se placer sur une ligne située à une soixantaine de mètres et avancent avec leur propre ARVA en réception (potentiomètre au maximum). Chacun s'arrête dès la réception du premier signal et on compare les positions. On tourne ensuite l'appareil émetteur de 90° et on recommence, en continuant à avancer. Cela permet à chacun de prendre conscience de la grande différence

de portée que l'on peut obtenir. L'atelier suivant permet de mieux comprendre ce que recouvre la notion d'intensité maximale. Un ARVA est posé au sol, toujours en vue, et chacun s'en approche et en jouant sur les différentes positions du potentiomètre. Chacun des élèves utilise ensuite les deux techniques de recherche fine, directionnelle et en croix. Bien insister sur l'importance du jeu sur les variations d'intensité. Quand cela est possible, il est intéressant de faire une démonstration en terrain plat avec les yeux fermés. Lorsque ces deux techniques sont bien acquises, on peut passer à la recherche finale.

Recherche d'appareils cachés

Il est conseillé de mettre l'appareil dans un sac plastique étanche ou dans un sac à dos. Attention : dans le feu de l'action, on cache parfois un appareil éteint ou en réception, ce qui transforme l'exercice en laborieuse séance de terrassement.

On commence par cacher un seul appareil. Ne pas le poser en surface mais l'enfouir profondément (30 à 50 cm). C'est une bonne façon d'insister sur l'importance de la pelle. Cet exercice est plus profitable en petits groupes (4 à 6). Chacun des participants fait la recherche à son tour et marque l'endroit qu'il a déterminé. En général, toutes ces marques sont concentrées dans un cercle de quelques dizaines de centimètres de diamètre, ce qui contribue à donner une meilleure confiance à chacun. On complique ensuite les choses en cachant deux ou plusieurs appareils.

L'efficacité dépendant beaucoup d'une pratique répétée, la recherche finale étant par ailleurs la phase durant laquelle on risque de perdre le plus de temps, on a tout intérêt à grouper les participants deux par deux (un couple chercheur/cacheur) pour qu'ils procèdent à la recherche finale. On inverse ensuite les rôles. En peu de temps et sur peu d'espace, on peut réaliser de nombreux exercices. Si l'on manque de temps, c'est cette dernière phase qu'il est important de privilégier.

Travail sur une avalanche

Il peut s'agir d'une avalanche réelle ou artificiellement délimitée mais il est important que le terrain soit relativement raide et pose de réels problèmes de déplacement. Après avoir dissimulé un certain nombre d'ARVA, on désigne un groupe de 4 ou 5 personnes que l'on place arbitrairement en haut, au milieu ou au bas de la coulée. On chronomètre l'opération. Les autres élèves assistent en spectateurs avant de devenir acteurs à leur tour. Chaque exercice fait ensuite l'objet d'une critique collective : absence de responsable désigné, confusion des rôles (normalement le responsable surveille mais ne participe pas aux recherches), manque de méthode, dysfonctionnement dans l'organisation des recherches, attention concentrée sur un seul appareil au détriment des autres... Cette méthode est d'autant plus efficace, car plus proche de la réalité qu'un exercice théorique.

L'ensemble de cet enseignement nécessite une bonne demi-journée en fonction des conditions et du nombre de participants.

3.2. Pelles et sondes

3.2.1. Une anecdote

Un groupe de dix personnes entreprend une course à skis dans le massif des aiguilles d'Arves. Ils avaient emporté le minimum de matériel de sécurité : un ARVA chacun et trois pelles pour l'ensemble. Évidemment, nouvelle démonstration de la loi de l'"emmerdement maximum" (ou de Murphy ou encore de la tartine beurrée) : une avalanche fut déclenchée et emporta trois skieurs dont l'un de ceux qui portaient une pelle. La décision fut rapide : on envoya un skieur prévenir les secours dans la vallée et les autres se mirent à chercher les victimes, mais sans savoir encore que la loi de Murphy avait encore frappé. En effet, une fois la victime localisée, on essaya de la déneiger. On chercha les pelles : il n'y avait

qu'une ! L'une était ensevelie avec son propriétaire, l'autre dans le sac du skieur parti chercher les secours. On est passé près du drame.

3.2.2. L'équipement

Le skieur hors-pistes et le randonneur doivent impérativement se munir individuellement du matériel suivant :

- une pelle : il en existe plusieurs modèles (plastique, aluminium) plus ou moins solides et efficaces (préhension, capacité...). Pour déblayer 1 m³, il faut 1 heure (selon la consistance de la neige) à la main et une dizaine de minutes avec une pelle ;
- une sonde : il existe des bâtons de ski qui servent aussi de sondes, ou bien des embouts à visser (sondes de 3 m).

La pelle, outil indispensable du sauvetage, peut rendre également de précieux services : creusement d'une tranchée pour le sondage stratigraphique, le coin suisse, réalisation d'abri ou assurage en couloir ou sur glacier (corps mort), etc.

3.3. Le ballon avalanche

Pour mémoire, il faut signaler l'apparition[5] d'un nouveau produit venu d'Allemagne : le ballon avalanche ABS (avalanche balloon system) est un sac d'une capacité de plusieurs dizaines de litres, qui en temps normal reste replié dans un sac, et se gonfle en cas d'avalanche (à condition que le skieur déclenche le système), permettant ainsi, en principe, au porteur de rester en surface. Le poids de l'ensemble est de 7 kg et est commercialisé en 1998 au prix de 7 000 F [15].

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] C. Rey : *Orientation sans visibilité à skis*, La Montagne et Alpinisme (1987) 34-39.
[2] C. Baudevin : *Pratique de l'orientation en montagne*, La Montagne et Alpinisme (1976) 228-235.
[3] J.-P. Bernard : *Ne perdez pas la boussole*, Montagnes Magazine 71 pp. 98-101 ; 73 pp. 80-82.
[4] A. Martzolf et E. Pahaut : *Attention... L'échelle de risque d'avalanche a changé*, Neige et Avalanches 64 (1993) 11-14 ; l'échelle a été légèrement modifiée dans quelques commentaires au printemps 1994 : note CEN du 18/05/94. Voir E. Pahaut : *L'échelle européenne de risque d'avalanche*, Neige et Avalanches 68 (1994) 26-27.
[5] J.-P. Zuanon : *Enquête "sécurité en montagne hivernale"*, Rapport interne (CAF, juin 1994).
[6] C. Forget : *Ces rescapés restés ignorés*, Neige et Avalanches 64 (1993) 14-19.
[7] L. Reynaud : *La vie des glaciers*, La montagne et Alpinisme 1 (1993) 14-19.
[8] B. Schmitt : *Neige et avalanches en terrain glaciaire*, La Montagne et Alpinisme 1 (1993) 37-43.
[9] E. Decamp : *Alpinisme et Escalade* (1986, Didier Richard, Grenoble) 155 p.
[10] B. Gardent, rubrique PhotoTech, mensuellement dans le magazine Alpinisme et Randonnée (Alpirando).
[11] J. P. Bonfort et V. Shashani : *78 courses autour de Grenoble* (1983, Didier Richard, Grenoble) 160 p.
[12] C. et P. Traynard : *Ski de Montagne* (1974, Arthaud, Grenoble) 230 p.
[13] J. P. Zuanon : *ARVA, Mode d'emploi*, Rapport interne (juin 1994, CAF), version provisoire d'une brochure publiée sous l'égide de l'ANENA : J. P. Zuanon, C. Rey, V. Place et F. Sivardière, *Arva mode d'emploi*, (1996, ANENA, Grenoble).
[14] A. Bertrand : *Les cent plus belles courses à skis du Dauphiné* (1985, Denoël, Paris) 239 p.
[15] F. Sivardière et J. P. Zuanon : *Le ballon avalanche ABS : pour ou contre ?*, Neige et Avalanches 72 (1995) 8-10.

5. En fait l'idée n'est pas nouvelle et a connu de multiples avatars ; signalons par exemple au début des années soixante-dix le ballon Holder, qui, relié au skieur par un fil, devait se gonfler en cas d'avalanche et ainsi permettre de retrouver son propriétaire.

Chapitre 10
CONDUITE DE LA COURSE

L'objet de ce chapitre est d'esquisser un tableau des connaissances pratiques nécessaires à la bonne conduite d'une course en montagne. Il s'adresse à tous les pratiquants, skieurs de randonnée, de hors-pistes, surfeurs, randonneurs à raquettes, etc. même si le plus souvent notre plume, guidée par l'habitude, semble ne s'adresser qu'aux skieurs. L'accent a surtout été mis sur le risque d'avalanches. Dans un premier temps, on rappelle les règles élémentaires de sécurité. Puis l'estimation pratique du risque sur le terrain est développée. Enfin une dernière partie traite de plusieurs accidents et essaye d'en tirer une morale.

1. LA CONDUITE DU SKIEUR À LA MONTÉE, À LA DESCENTE

1.1. Règles permanentes de sécurité

*1.1.1. Le port de l'ARVA**

Tout le groupe doit être équipé individuellement d'ARVA, de pelles, et si possible de sondes (ou de bâtons-sondes). Les ARVA doivent être mis en fonctionnement de façon systématique dès le départ de la course. Si cette règle n'est pas respectée, on se retrouvera tôt ou tard en situation dangereuse avec des appareils éteints. Une excellente solution consiste à porter l'ARVA en émission, le plus près possible du corps et en bandoulière. Il est ainsi protégé du froid et des chocs et on n'a pas à l'enlever ni à le manipuler chaque fois que l'on enlève un vêtement. A la rigueur, on peut le mettre dans la poche kangourou de la salopette. Le port autour du cou est à proscrire (risque de strangulation). *A fortiori*, il ne faut pas laisser son ARVA dans une poche de veste (risque d'oubli quand on se déshabille) ou, pire, au fond d'un sac à dos. Si ce dernier est arraché lors d'une avalanche, c'est lui qu'on retrouvera et non la victime.

Le contrôle de fonctionnement des ARVA doit être effectué systématiquement avant chaque départ. L'idéal est de vérifier d'abord que tous les ARVA reçoivent bien : le responsable se place en émission à 20 m ; tous les autres membres du groupe sont en position réception. Ensuite, le responsable commute son ARVA en position réception et fait passer à sa hauteur les membres un par un (l'intervalle à respecter est de l'ordre de 4 m). On peut également organiser à la faveur d'une halte un exercice "tous (sauf un) en réception" ; c'est une bonne façon de s'assurer que tout le groupe est rapidement opérationnel. L'ARVA doit rester allumé pendant toute la course, et n'être débranché qu'à la fin.

1.1.2. Conduire une sortie de ski

Une sortie, hors des pistes ou à skis de randonnée, requiert un minimum de compétence pour être entreprise avec une sécurité raisonnable. La frontière entre comportements sûr et dangereux est mince et peu perceptible ; ainsi, il faut faire remarquer que, de manière fâcheuse, le skieur s'enferme progressivement au fil des sorties dans une dangereuse routine. Insidieusement, son inexpérience se déguise en expérience, puisque pendant des années de pratique, aucun accident n'a sanctionné ses erreurs répétées. Comme le montrent les récits d'accident (cf. § 3), l'avalanche touche aussi bien le "jeune citadin" en vacances (souvent considéré comme un inconscient) que le montagnard confir-

* Par J.-P. ZUANON

mé, sans qu'une quelconque fatalité puisse être invoquée : ainsi sur les 23 victimes d'avalanche en Suisse pour l'année 1992/93, 10 faisaient partie de groupes conduits par des responsables avertis (guide, chef de caravane...) [1].

Pour assurer sa sécurité, le skieur doit développer et travailler sa connaissance du milieu et pouvoir l'appliquer sur le terrain. Connaître les dangers et savoir estimer un risque doivent entrer dans son savoir-faire au même titre que la technique du ski alpin. L'objet de ce chapitre est de faire le pont entre la connaissance théorique du milieu (abordée dans la première partie) et l'application sur le terrain. Inversement, percevoir ses défauts et faire sa critique (malgré parfois des années d'expérience) sont des exercices salutaires qui permettent d'éviter par la suite des erreurs grossières.

1.2. L'ascension*

1.2.1. Itinéraire

L'itinéraire est prévu avec le plus de précision possible par le chef de course avant le départ. Sur le terrain, des éléments nouveaux peuvent néanmoins l'amener à modifier ses choix initiaux : trace sûre déjà faite, qualité de neige inattendue, évolution imprévue des conditions nivo-météorologiques, nombre trop important de skieurs sur une même pente, etc. Le skieur de tête doit réaliser sa trace au mieux, selon les conditions de neige (épaisseur, qualité...) et le terrain (pente, obstacles, replats éventuels pour les virages...). Il doit aussi tenir compte des pentes qui le dominent, et de celles sur lesquelles il risque d'être entraîné. Il doit garder à l'esprit qu'il faut ménager le manteau neigeux en cas de neige récente (par exemple éviter pentes raides, ruptures de pente, accumulations...). Tout cela est difficile à concilier avec la réalisation d'une bonne trace : pente constante et sans à-coups, raideur adaptée à la forme physique des participants, minimum de virages raides ou de conversions. Peu de traces satisfont à ces critères, mais par bonheur, tout traceur est perfectible, pourvu qu'il veuille bien s'améliorer.

1.2.2. Précautions

Si l'ARVA est l'outil indispensable de la sécurité du montagnard en hiver, il ne doit pas être considéré par le pratiquant comme la seule mesure de sécurité face aux avalanches. En la matière, mieux vaut prévenir que guérir. En l'occurrence, il ne s'agit pas de prendre systématiquement des mesures draconiennes, mais de savoir prendre les dispositions adéquates en fonction de la situation rencontrée (doute sur la stabilité du manteau neigeux, risque local marqué d'avalanches, configuration suspecte du terrain). Un certain nombre de *principes* sont alors à appliquer :

- respecter les distances entre les skieurs (de dix à plusieurs centaines de mètres, selon les circonstances), pour éviter les surcharges, et n'exposer si possible qu'une personne à la fois ;
- surveiller la ou les personnes exposées ;
- retirer les lanières des skis ainsi que les dragonnes des bâtons ;
- vérifier que l'ARVA est bien protégé par des vêtements.

Certains de ces principes deviennent très difficiles à appliquer en cas de mauvaise visibilité, et on renoncera alors d'autant plus rapidement.

1.3. La descente

1.3.1. Itinéraire

Les principes de sécurité énoncés pour la montée restent applicables pour la descente. Il faut en outre garder en mémoire que la surcharge imposée au manteau neigeux (ainsi que la vitesse de cette sollicitation) est plus importante durant la descente : une godille serrée ou une chute entraîne des surcharges brusques de plusieurs centaines de kilogrammes.

* Par Christophe Ancey, Alain Duclos et Claude Rey.

En hors-piste, la proximité du domaine sécurisé ne doit pas faire oublier l'existence du risque d'avalanche aux skieurs, dont l'expérience montagnarde est souvent réduite (voir avalanche de Moriond, ch. 5, § 3.2.). Dès que l'on s'éloigne du hors-piste de proximité, l'itinéraire doit être soigneusement étudié. Dans tous les cas, le port d'un ARVA devrait s'imposer. Rappelons que la présence de traces, même nombreuses, ne constitue pas une garantie de sécurité.

1.3.2. Précautions

Quelques principes de sécurité, appliqués de manière systématique même dans une situation normale (apparemment) sans risques, permettent de réduire les conséquences d'une avalanche imprévue. En cas de doute, des précautions supplémentaires doivent être prises. Une descente s'organise, en fonction du terrain, en une succession de tronçons, ponctués de pauses permettant de regrouper les skieurs, de se reposer, et surtout d'observer le tronçon suivant (conditions de neige, dangers, relief...) [2]. Le type de progression adopté dépend de cette analyse visuelle. En cas de doute, un sondage ou un essai de coin suisse permet de mieux appréhender la stabilité du manteau neigeux (voir paragraphe suivant).

On choisit le plus souvent une *progression enchaînée* où le responsable (ou un des skieurs) part le premier, suivi à intervalle régulier par les autres membres du groupe. La distance entre skieurs est de plusieurs dizaines de mètres. En général, chacun effectue sa propre trace, plus au moins parallèle et proche de la première trace. Avec des débutants, on peut être amené à faire une trace unique, surtout dans le cas de neige profonde ou mauvaise, pour faciliter leur descente (damage de la trace, déclenchement du virage imposé, choix des passages...).

En cas de pentes suspectes ou délicates, les skieurs doivent opter pour une *progression fractionnée.* Après avoir examiné le tronçon, arrêté son choix sur un point de regroupement judicieux, et donné ses instructions aux membres du groupe, le responsable fait la première trace, qui sert de référence aux autres skieurs. Une pente particulièrement inquiétante, révélée par l'observation du terrain, de la neige, et les tests courants (voir ch. 6) peut, exceptionnellement, s'avérer incontournable. Alors, le responsable effectue une trace qui doit impérativement être suivie par les autres. Les virages sont larges et sans à-coups. Les conversions ou le chasse-neige sont préférables aux godilles hasardeuses.

Le *point de regroupement* doit être choisi hors d'atteinte d'une éventuelle avalanche ; il doit permettre de rester en contact visuel et à portée de voix des autres participants. Cela peut être difficile à réaliser pour des profils de terrain convexes ou avec des ruptures de pente, surtout par mauvais temps. Ainsi, par fort vent, la voix a une portée réduite à quelques mètres. Il est parfois impossible de regrouper les membres en un seul point (en zone glaciaire par exemple) ; il faut donc s'adapter à chaque situation.

2. L'ÉVALUATION DU RISQUE D'AVALANCHE*

L'objet de ce paragraphe est de faire partager des expériences, de livrer quelques indices, de proposer quelques conseils afin d'aider le skieur à mieux apprécier le risque d'avalanche. Il est très délicat de "se mouiller" quand il y a danger de mort. Les idées exposées dans les lignes qui suivent sont forcément incomplètes, parfois discutables. Nous souhaitons en tous cas qu'elles stimulent réflexions et observations.

2.1. Situations nivologiques

Simultanément au développement de la pratique de la montagne hivernale, des règles de prudence ont été formulées quant au risque d'avalanche. Avec l'avènement de la nivologie et les études en laboratoire, ces règles ont souvent été

* Par Alain DUCLOS en collaboration avec Claude REY.

remises en cause, parfois avec raison. Elles avaient toutefois été dictées par le bon sens. Aussi, plutôt que de les ignorer, nous avons préféré formuler trois d'entre elles pour les discuter ensuite. Il sera donc question successivement de "règle des trois jours", d'épaisseur de neige récente et du rôle du froid dans la stabilisation. Nous préciserons enfin quelques situations nivologiques particulièrement menaçantes.

2.1.1. Des règles empiriques et leurs nuances

① *La probabilité de déclenchement reste particulièrement élevée pendant les trois jours qui suivent la fin d'une chute de neige ("règle des trois jours").*

On a cru à cette règle, certainement avec une foi caricaturale, puis on l'a contestée, avec une vigueur peut-être exagérée. Pourtant, si on observe ce qui se passe sur les domaines skiables, on constate une correspondance étroite entre l'activité avalancheuse et les périodes de précipitations ou bien encore de transport de neige. Les opérations de déclenchement préventif sont systématiquement mises en œuvre lorsque ces phénomènes se produisent, et elles donnent le plus souvent lieu à des résultats positifs. La majorité des avalanches observées en dehors de ces périodes sont dues au réchauffement. Exceptionnellement, des avalanches avec départ en plaque sont déclenchées à l'explosif en dehors des périodes de précipitations, de transport de neige par le vent ou de réchauffement; dans de telles circonstances, les déclenchements par skieurs sont encore plus rares.

Que ce soit en hors-piste ou en randonnée, lorsqu'une plaque ancienne recouverte de neige fraîche est déclenchée par des skieurs, on entend souvent expliquer : « ils n'avaient pas vu la plaque car elle était dissimulée sous la neige récente ! ». Le passage des skieurs sur la plaque avant la dernière chute de neige aurait-il suffi à la déclencher ? L'expérience montre souvent que ce n'est pas le cas. Ces observations relevées dans différents contextes mettent en évidence que la présence de neige récente en surface du manteau neigeux est un facteur aggravant du risque d'avalanche. D'une part, cette nouvelle couche constitue une vive incitation à la fréquentation des pentes. D'autre part, elle représente une surcharge supplémentaire pour le manteau neigeux ancien, auquel elle est plus ou moins liée, sans participer à sa consolidation. Enfin, une couche de neige tendre étant souvent facile à mettre en mouvement avec une légère sollicitation (passage à skis), elle peut à son tour exercer des contraintes importantes sur les couches plus anciennes et déstabiliser ainsi l'ensemble du manteau neigeux. On trouverait là une explication au déclenchement de plaques dures... recouvertes de neige récente. La question du délai de stabilisation après le dépôt de neige récente reste néanmoins posée. Nous soulignons seulement que ce délai peut dépasser une semaine, particulièrement en début d'hiver, lorsque les nouvelles couches de neige reposent directement sur une couche de gobelets ou de grains à faces planes.

☞ La neige récente constitue un facteur supplémentaire d'instabilité tant qu'elle reste tendre (le skieur s'y enfonce d'au moins plusieurs centimètres). Sans que l'on puisse jamais indiquer de chiffre précis, il est bien établi que les journées qui suivent une chute de neige (ou une suraccumulation par transport) sont particulièrement dangereuses. Alors... faut-il ne plus skier en poudreuse ? Non, bien sûr, mais il faut collecter le plus souvent possible des informations sur l'épaisseur de la neige récente et sur sa qualité. On doit aussi chercher à apprécier sa liaison avec le reste du manteau neigeux, ce qui est difficile (par exemple, existe-t-il une couche fragile à la base de la neige récente ?). La nature des premières couches de cet ancien manteau doit aussi être examinée.



Une modeste épaisseur de neige récente (ici, 35 cm déposés en 10 jours faiblement neigeux) suffit pour permettre le déclenchement de vastes plaques. Cliché A. Duclos.

② *La probabilité de déclenchement s'accroît quand l'épaisseur de neige augmente.*

Cette règle semble évidente au premier abord. Elle perd pourtant son sens si l'on se remémore tous les épisodes durant lesquels, malgré d'importantes quantités de neige, aucune avalanche ne s'est produite et au contraire, ceux durant lesquels des départs en plaque se sont produits avec de faibles épaisseurs (photographie ci-dessus). On a vu par exemple des tirs à l'explosif rester sans résultat dans des pentes chargées de près de deux mètres de neige récente et, par ailleurs, le passage d'un seul skieur provoquer le déclenchement de plaques avec seulement vingt centimètres de neige récente. Alors, pourquoi sommes-nous tous enclins à supposer une relation entre épaisseur de neige et risque d'avalanche ?

L'épaisseur de neige est un des facteurs qui déterminent la masse de neige susceptible d'être mise en mouvement. Elle conditionne donc l'écoulement potentiel de l'avalanche. Or, lorsqu'un écoulement est important, son côté spectaculaire et les dégâts matériels qu'il engendre marquent les mémoires. L'association "avalanche-quantité de neige" est souvent justifiée en ce qui concerne l'activité avalancheuse naturelle ; elle est beaucoup plus contestable en ce qui concerne les déclenchements accidentels. Soulignons quand même que, dans le cas de figure où le déclenchement se produit, on préférera un faible volume de neige en mouvement à plusieurs milliers de mètres cubes. Néanmoins, si les dégâts matériels sont le plus souvent engendrés par des avalanches majeures (dommages sur des habitations ou des voies de communication), une avalanche peut être fatale à des skieurs dès qu'elle est capable de recouvrir leur tête ou de les bousculer dans une crevasse. De très faibles quantités de neige en mouvement peuvent parvenir à ce résultat.

☞ L'épaisseur de neige n'est que l'un des facteurs qui déterminent la probabilité de déclenchement d'une avalanche. Son rôle semble difficile à établir en ce qui concerne les situations de déclenchements accidentels. Des observations régulières effectuées dans des pentes avalancheuses ont néanmoins montré que, lorsqu'une pente est instable, c'est souvent en sollicitant la zone la plus chargée que l'on déclenche l'avalanche. La rupture par traction peut alors se produire à

une grande distance de la zone sollicitée (plusieurs centaines de mètres). C'est pourquoi il est indispensable de s'interroger en permanence sur l'épaisseur de neige récente sur laquelle on évolue : le repérage des éventuelles zones de suraccumulation constitue toujours un indication précieuse. Enfin, on peut se poser la question d'une éventuelle "épaisseur critique" de neige récente au-dessus de laquelle les départs spontanés seraient de plus en plus probables... mais les déclenchements provoqués de moins en moins vraisemblables.

③ *Le froid consolide la neige.*

Un point sur lequel tout le monde semblait d'accord tant que le ski de randonnée se pratiquait surtout au printemps et que l'on ignorait l'essentiel des métamorphoses de la neige sèche. On admet en effet que la cohésion de regel est la plus solide qui soit, mais qu'elle n'intervient que dans la mesure où il y a eu fonte auparavant. Si au contraire la neige est restée sèche, le froid peut conduire à une situation instable, car un gradient de température moyen ou fort induit la formation des grains à faces planes ou de gobelets. On doit alors tenir compte de l'effet de ces grains sur la stabilité du manteau neigeux.

L'expérience montre cependant qu'ils ne sont pas systématiquement dangereux. Leur rôle aggravant dans l'instabilité est incontestable lorsqu'ils se trouvent enfouis dans le manteau neigeux; il est probablement maximum lorsque la couche fragile ainsi constituée se situe directement sous la couche de neige récente. En revanche, il semble qu'une couche de neige de surface affectée dans son ensemble par une métamorphose de gradient de température moyen ou fort perde progressivement, en même temps que sa cohésion, sa capacité à être déclenchée en plaque. Imaginons cette poudreuse du mois de janvier tombée il y a environ dix jours... Dans toutes les pentes ombragées, elle est restée tendre et agréable à skier, mais sa consistance a changé : sa densité s'est accrue et sa cohésion a diminué. Les sollicitations exercées par le skieurs sont amorties. Le risque de déclenchement accidentel est moins important que durant les jours qui ont suivi directement la chute de neige. Ce risque redeviendra fort, mais seulement après la prochaine chute de neige.

☞ Le froid consolide la neige qui a été humidifiée auparavant : c'est certain. Le froid stabilise la neige de surface lorsqu'il persiste : c'est probable. Le froid augmente l'instabilité des chutes de neige à venir : il faudra s'en souvenir. Reste l'effet du froid sur les couches plus profondes du manteau neigeux : il est vrai que la formation de grains anguleux sous une plaque constituée peut faire naître au fil du temps une instabilité qui n'existait pas auparavant. A surveiller... Inversement, il faut garder en tête qu'un froid vif n'est pas toujours nécessaire à l'établissement d'un gradient de température localement fort : ainsi on peut observer la formation de grains à faces planes au-dessus d'une croûte de regel recouverte de neige récente dont la température n'était que de quelques degrés au-dessous de zéro [3-5].

2.1.2. Cinq types de manteaux neigeux particulièrement suspects.

Au fil de cet ouvrage, il a été très souvent question de profil stratigraphique, de diagramme des résistances, et de chiffres précis. Mais les skieurs évoluent dépourvus d'appareils de mesures en poche et de repères statistiques en tête. En revanche, ils savent reconnaître à la main, au ski, ou au bâton, une neige tendre, dure, fragile, compacte, légère, etc. Or ces caractéristiques de la neige jouent un grand rôle dans la stabilité indépendamment des types de grains. C'est pourquoi les structures de manteaux neigeux que nous présentons maintenant sont décrites avant tout par la qualité des couches qui les composent. Leur présentation suit approximativement un ordre chronologique, reflet des situations que l'on est susceptible de rencontrer au cours d'une saison. Les avalanches de fonte ne sont pas abordées ici.

La figure 1 illustre une situation classique : dès la fin de l'automne ou le début de l'hiver, les premières précipitations (de l'ordre de 15 à 30 cm de neige) ont été suivies d'une longue période de beau temps sec ; une couche de gobelets ou de grains à faces planes s'est alors formée sur les versants suffisamment ombragés et élevés. Les chutes de neige suivantes seront particulièrement instables. Les accidents consécutifs à ce scénario sont nombreux, notamment en hors-piste.

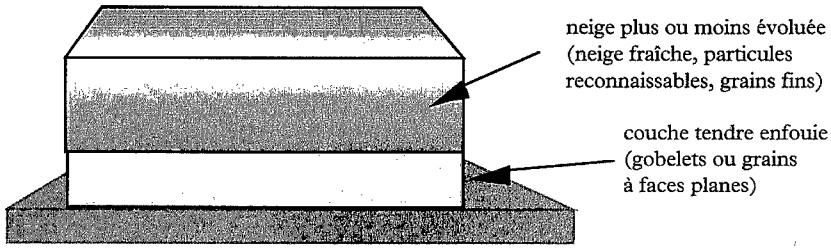


Figure 1. Situation de début de saison : classique mais redoutable.

La figure 2 montre la présence d'une couche tendre et mince (couche fragile) sous la couche de neige récente ; elle correspond à une situation qui fonctionne très bien, notamment si la neige récente a cette qualité particulière que nous avons appelée *qualité critique* (cf. ch. 5). Si, au contraire, la neige de surface a une bonne cohésion de feutrage ou si elle est dépourvue de cohésion, il semble qu'un phénomène d'amortissement puisse empêcher le début de la rupture dans la couche fragile par passage de skieur. Dans le cas contraire, la rupture par cisaillement, qui se produit au sein de la couche fragile, conduit au déclenchement de ce qui est appelé une *plaque friable.*

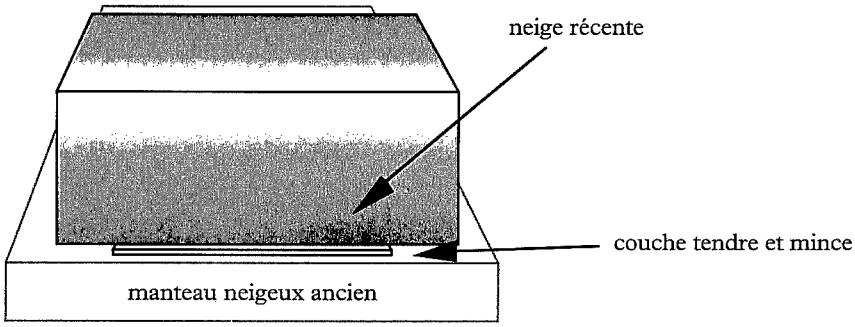


Figure 2. Couche tendre et mince sous la neige récente : le piège !

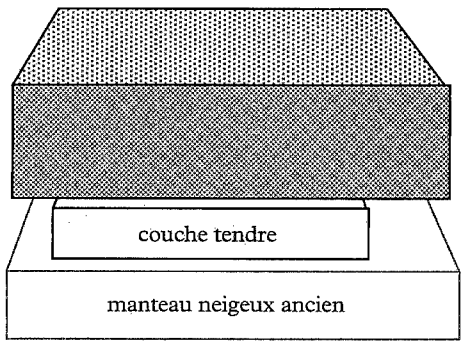


Figure 3.
Couche dure sur couche tendre : un danger à relativiser.

La figure 3 (photographie page 230), avec une couche dure posée sur une couche tendre, peut s'appliquer à la *plaque à vent* classique ; l'instabilité dépend ici largement de la topographie locale ainsi que de l'épaisseur et de la cohésion de la plaque dure. Rappelons en effet qu'une plaque dure est constituée d'une neige dont la masse volumique atteint au minimum 300 kg/m^3, d'où un poids



Couche de neige récente (on y enfonce le poing) sur couche de neige plus compacte (on y enfonce 4 doigts) sur couche de neige tendre (on y passe la main) : situation typiquement instable. Cliché A. Duclos.

d'environ 135 tonnes pour une plaque de 30 m × 30 m avec une épaisseur moyenne de 0,5 m. Il est vrai que le départ naturel d'une plaque peut être provoqué par l'augmentation de la quantité de neige qui la constitue, jusqu'à un poids critique. Le déclenchement accidentel d'une plaque de neige dure provoqué par un skieur (gardons à l'esprit le rapport entre son poids et celui de la plaque) est moins plausible. Notons que dans ce cas, la notion de surcharge par un, trois… dix skieurs, reprend tout son sens. Nous avons remarqué par ailleurs que le manteau neigeux est parfois très différent entre l'endroit où la rupture a pris naissance à la suite du passage d'un skieur et celui où se produit la cassure la plus épaisse. Dans ces conditions, une plaque dure et épaisse peut se déclencher alors que le skieur évolue sur une plaque tendre et mince.

La figure 4 et la photographie page 231 montrent une situation qui est souvent observée lors d'accidents en ski hors-piste. Une couche de neige récente épaisse d'au moins 20 cm surmonte une couche de neige plus compacte et rigide (généralement grains fins). L'ensemble repose sur une couche tendre (grains à faces planes ou gobelets). La rupture par cisaillement se produit au sein de la couche tendre. La couche de neige récente de surface joue un rôle déterminant : avant la chute de neige, la couche de neige dure résistait bien au passage des skieurs.

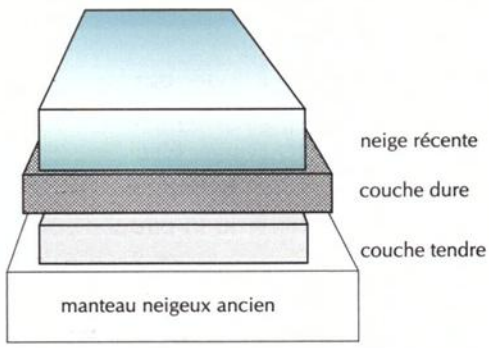


Figure 4.
Couche dure entre la neige récente et la couche tendre : forte instabilité.



La neige récente peut donner lieu au départ de vastes plaques friables.
Cliché A. Duclos.

La figure 5, avec la présence d'une couche dure et mince entre la neige récente et la couche fragile sous-jacente, illustre une situation instable dont une partie de l'explication reste intuitive. D'un point de vue "mécanique", le rôle de la croûte rigide peu épaisse sous la neige récente peut être compris de deux manières. D'une part, on admet que les croûtes à la fois rigides et fines empêchent l'imbrication de la couche de neige récente avec le manteau neigeux plus ancien; d'autre part, on imagine bien que ces croûtes sont susceptibles de se rompre facilement si elles reposent sur une couche de neige fragile, et de contribuer ainsi à la rupture.

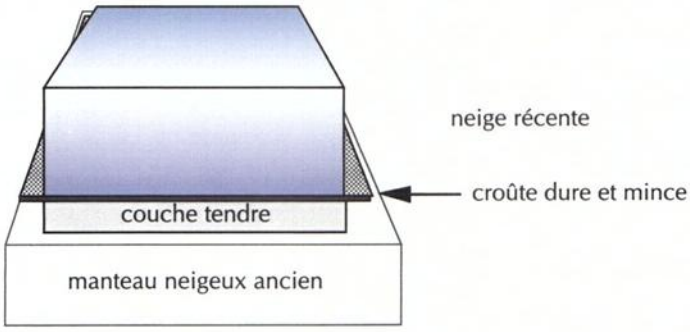


Figure 5.
Croûte dure et mince enfouie : deux pièges en un...

D'un point de vue thermodynamique, il a été montré que le gradient de température est localement plus important de part et d'autre d'une croûte [4] ; cet effet est probablement plus marqué pour les croûtes de regel. Ceci donne lieu à la formation de couches de grains anguleux, d'abord très minces, de part et d'autre de la croûte. Nous retrouvons alors la situation de la couche de neige récente sur la couche fragile mince. Dans ce cas, la rupture par cisaillement se produit juste au-dessus de la croûte rigide. Cette situation semble relativement fréquente au printemps, consécutivement à des chutes de neige tardives[1].

1. Des chutes de neige précédées de neige roulée peuvent produire un effet similaire.

2.2. Situations météorologiques

Les caractéristiques mécaniques d'un manteau neigeux sont largement influencées par les conditions météorologiques : précipitations, vent, température, nébulosité. Ces paramètres varient en fonction de la situation météorologique, mais aussi localement selon les caractéristiques géographiques et topographiques. Le rôle de celles-ci sera envisagé dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Précipitations

Les précipitations neigeuses sont toujours suspectes. Il convient de bien déterminer la cohésion de la neige fraîche :

- s'il y a feutrage : peu de danger à moins d'épaisseurs considérables et de "plan de glissement" très favorable. Attention ! l'évolution est très rapide sous l'effet des agents météorologiques ;
- s'il y a frittage faible (c'est pour ce type de neige que l'on parle de "qualité critique") : le danger est maximum si la couche en question repose sur une couche fragile ;
- s'il y a frittage fort : il y a formation de plaques sensibles aux surcharges importantes. Attention à la surcharge ! Certaines de ces plaques partent naturellement du simple fait de l'accroissement de leur poids, consécutif à l'accumulation de neige. Il va de soi que, lors de situations relativement exceptionnelles, un skieur de 70 kg peut mettre en mouvement une plaque pesant plusieurs dizaines de tonnes ;
- s'il y a absence de cohésion : il y a peu de danger *a priori*, mais l'évolution peut être rapide vers une cohésion de frittage faible.

Dans le cas des précipitations pluvieuses, il faut distinguer :

- la pluie sur de la neige récente : cela donne lieu assez systématiquement à des avalanches de fonte ;
- la pluie sur un manteau neigeux déjà ancien : l'activité avalancheuse induite dépend étroitement des quantités de précipitations et de l'allure du manteau neigeux. L'eau peut en effet ruisseler à la surface du manteau neigeux, l'imbiber, ou le traverser par des cheminées de percolation (voir ch. 5).

2.2.2. Vent

Du point de vue du skieur, le vent a deux types d'action sur la neige qui se dépose dans une pente :

- d'une part, le vent est à l'origine d'une répartition inégale de la neige. Des précipitations qui, sans vent, auraient donné lieu à une couche de neige d'épaisseur relativement régulière, provoquent, avec vent, des accumulations qui peuvent être importantes. Par ailleurs, le vent sans précipitations peut donner lieu à des accumulations si la neige de surface est transportable (si elle a assez peu de cohésion) ;
- d'autre part, la neige accumulée par le vent peut avoir des qualités très diverses. Elle est parfois poudreuse (elle ressemble alors à de la neige déposée sans vent). Elle peut aussi être constituée de neige évoluée, dotée d'une cohésion plus ou moins importante. C'est seulement dans ce dernier cas que le skieur repère facilement une accumulation due au vent. La qualité de la neige dépend probablement du rapport entre la vitesse du vent et l'intensité des précipitations : un vent modéré pendant des précipitations abondantes provoquerait la formation d'accumulations de neige poudreuse (neige légère constituée de cristaux de neige fraîche ou de particules reconnaissables) ; le transport par le vent d'une neige ayant déjà évolué au sol donnerait lieu à la formation d'accumulations de neige dure (essentiellement des

grains fins). Toutes les situations peuvent évidemment être rencontrées entre ces deux extrêmes ; certaines d'entre elles donnent lieu à des neiges particulièrement difficiles à skier.

En quoi ces deux types d'action influencent-ils la stabilité du manteau neigeux ?

• Epaisseur de neige : même si cela n'est pas systématique, l'augmentation de l'épaisseur de neige dans une pente induit généralement une augmentation du risque (§ 2.1.1.). Pour des accumulations épaisses de 40 à 60 cm, c'est souvent lorsque le skieur passe à l'endroit le plus chargé qu'il déclenche l'avalanche (en l'absence de vent, l'épaisseur de neige n'aurait probablement pas été suffisante pour permettre l'instabilité). Le vent favorise donc la formation de plaques *suffisamment épaisses* pour être instables.

• Qualité de la neige : l'expérience montre qu'une large gamme de types de neige est susceptible de donner lieu à des avalanches de plaques. Rien, pour l'instant, ne nous permet d'affirmer que les qualités de neige issues de l'action du vent sont plus propices au déclenchement que les qualités de neige déposée par temps calme.

Il n'en reste pas moins que, probablement, la majorité des plaques déclenchées accidentellement ont des causes imputables aux effets du vent. Le skieur doit donc être particulièrement attentif et tenir compte des paramètres suivants.

• *Vitesse du vent* : lorsque le vent a soufflé avec force selon une direction constante, les zones de reprise et de suraccumulation sont généralement distinctes et relativement faciles à repérer, notamment en fonction de la topographie. En revanche, lorsque le vent est faible à modéré, des accumulations sont aussi susceptibles de se former, mais elles sont plus discrètes et il reste très difficile de prévoir leur localisation. Par conséquent, il est plus simple d'évaluer le risque d'avalanche induit par des suraccumulations après un épisode de vent violent et constant en direction qu'après une période de précipitations peu ventées. Dans le premier cas, les suraccumulations sont importantes et relativement faciles à localiser, à la fois *de visu* et par déduction. Dans le second cas, le danger doit être considéré comme plus sournois.

• *Direction du vent* : il faut tenir compte du fait que l'orientation du vent peut changer au cours d'un événement perturbé (variation dans le temps) ainsi que d'un endroit à l'autre, même sur de courtes distances (variation dans l'espace). Il est donc dangereux dans tous les cas d'avoir des certitudes quant à la localisation des zones de reprise et des zones de suraccumulations.

• *Précipitations associées* : les zones de suraccumulation semblent particulièrement difficiles à identifier lorsque le vent a soufflé pendant les précipitations. La qualité de la neige déposée peut alors être homogène, quelle que soit son épaisseur.

• *Environnement topographique* : de très faible ruptures de pente suffisent à provoquer la formation d'accumulations dues au vent. La localisation de ces accumulations est facile à prévoir au voisinage des crêtes les plus marquées, si celles-ci sont orientées perpendiculairement à la direction du vent ; on distingue alors nettement le versant *au vent* du versant *sous le vent*. Dans le cas contraire, ou dès que l'on s'éloigne d'une crête, la localisation des accumulations devient très délicate (voir ch. 2) : on observe qu'une épaule ou un talweg peu marqué suffit à provoquer localement des accumulations de neige susceptibles de donner lieu à des avalanches de plaques. Lorsque l'incidence du vent est perpendiculaire à l'orientation générale de la pente, les zones érodées et les zones fortement chargées peuvent être à la fois proches et difficilement discernables.

2.2.3. Température de l'air

Lorsque les températures sont basses (c'est-à-dire négatives)[2], on note que :

– avant les précipitations : les températures basses favorisent les métamorphoses de gradient moyen ou fort en surface du manteau neigeux, parti-

2. Voir aussi § 2.1.1.

culièrement en ce qui concerne les fines couches de neige récente. La couche de grains à faces planes ou de gobelets ainsi constituée représente un plan de glissement (couche fragile) très favorable au déclenchement des couches de neige à venir ;

- après les précipitations : les températures basses favorisant l'instauration d'un gradient de température moyen ou fort au sein de la couche de neige de surface, celle-ci perd de la cohésion en même temps que se forment les grains à faces planes. Simultanément, il semble que la probabilité de déclenchement accidentel d'avalanche de plaque diminue. Skier dans une couche de 30 à 40 cm de grains à faces planes serait moins dangereux que de skier dans la même épaisseur de neige fraîche, évoluant vers du grain fin.

Lorsque les températures sont moyennes (proches de 0 °C), les métamorphoses de faible gradient sont favorisées. Il y a donc une *prise de cohésion* de la neige fraîchement tombée. Cette neige, qui avait dans un premier temps peu de cohésion, évolue alors vers la qualité de neige critique qui nous semble si favorable au déclenchement accidentel des avalanches de plaques. L'exemple typique est celui d'une chute de neige au mois de mars ou d'avril, suivie d'un retour rapide du beau temps. Les versants ombragés conservent une neige relativement légère et agréable à skier, mais qui a acquis suffisamment de cohésion pour propager une rupture.

Lorsque les températures sont élevées (supérieures à 0 °C), il y a début de fonte et on note soit l'apparition d'une cohésion capillaire, soit la perte de cohésion par excès d'eau liquide, avec éventuellement l'apparition ultérieure d'une cohésion de regel. Le rôle de chacun de ces phénomènes est variable en fonction du type de grain concerné et de l'épaisseur affectée.

- Sur de la neige fraîche : juste après la chute de neige, il semble qu'une légère humidification de la surface bloque les déclenchements qui étaient faciles à provoquer avant les premiers rayons de soleil. Dans un second temps, en revanche, il y a rapidement départ spontané de la neige récente sur toutes les pentes suffisamment raides. Ces purges peuvent se produire avec des épaisseurs de neige de seulement quelques centimètres. Elles ne doivent jamais être négligées car leurs conséquences sont parfois graves : on n'échappe pas facilement à une coulée de fonte !
- Sur un manteau neigeux ancien bien stabilisé : les températures élevées ne peuvent intervenir sur l'activité avalancheuse que par la fonte, ou éventuellement en permettant la formation d'une croûte de regel qui jouera ultérieurement un rôle néfaste. Au cours d'une première phase, la fonte permet de goûter le plaisir du ski sur une neige de très bonne qualité ("neige de printemps"). Ensuite, l'épaisseur de neige imbibée d'eau augmente sans que sa stabilité ne soit affectée. Enfin, au-delà d'une certaine épaisseur (probablement fonction de la stratigraphie), ou éventuellement d'un seuil de teneur en eau liquide (délicat à estimer), le risque dans les pentes suffisamment inclinées devient tout simplement énorme.

☞ En conclusion, on peut retenir le schéma suivant :

Humidification légère de la neige fraîche ⇨ stabilisation précaire mais immédiate.

Humidification prolongée de la neige fraîche (quelques heures) ⇨ purges de nombreuses pentes.

Humidification prolongée d'une vieille neige (quelques jours) ⇨ avalanches de fonte difficilement prévisibles.

Humidification sur quelques cm en surface ⇨ fine croûte de regel en cas de refroidissement.

Humidification sur plus d'une dizaine de cm ⇨ croûte de regel épaisse en cas de refroidissement important.



Activité avalancheuse exceptionnelle : encore des plaques ! Cliché A. Duclos.

2.2.4. Nébulosité

En conditionnant l'intensité du rayonnement, la nébulosité relativise le rôle de la température des masses d'air. Ainsi, si l'isotherme 0 °C correspond à peu près à l'altitude de regel par nuit couverte, elle s'en distingue très nettement par ciel clair. Par ailleurs, il semble qu'à l'intérieur d'un nuage bas et épais, de type cumulus ou strato-cumulus, le réchauffement est souvent plus intense et les avalanches de fonte favorisées.

2.3. Situation géographique

Les notions d'altitude, d'exposition et d'inclinaison de la pente constituent généralement les premières bases du raisonnement suivi par le skieur qui cherche à prévoir la localisation du risque d'avalanche (elles permettent aussi de s'interroger sur la localisation des neiges les plus agréables à skier). Viennent ensuite les particularités de relief (situations topographiques) que nous évoquerons dans le paragraphe suivant. Nous essayons ici de préciser dans quelle mesure les paramètres géographiques influent sur la formation des types de manteaux neigeux que nous avons présentés comme particulièrement instables (§ 2.1.).

2.3.1. Altitude

L'altitude est l'un des paramètres qui déterminent les facteurs météorologiques locaux : force et direction du vent, forme et quantité de précipitations, température, etc. Malheureusement, la relation entre l'altitude et ces facteurs n'est pas régulière. En ce qui concerne les précipitations, par exemple, il arrive qu'elles soient plus abondantes aux altitudes modestes que sur les pentes qui les dominent (notamment au passage d'un front froid). Par situation de foehn, en revanche, plus on descend sur le versant sous le vent et plus les précipitations sont réduites. La relation entre l'altitude et la température est plus simple : à moins d'inversions de température, liées typiquement à des conditions anticycloniques hivernales (voir ch. 2), la température décroît au fur et à mesure que l'on s'élève.

Les métamorphoses de la neige, et par conséquent, la stabilité du manteau neigeux, dépendent donc en grande partie de l'altitude. Par exemple, sur les pentes

peu élevées, les avalanches de fonte sont plus fréquentes ; la stabilisation est généralement plus rapide. Les pentes en altitude sont plus propices aux départs en plaque de neige froide ; les métamorphoses qui s'y produisent conduisent souvent à la formation de couches de neige fragile. Néanmoins, ces généralités doivent être nuancées. Ainsi, les croûtes de regel, qui ne se forment généralement que dans une certaine tranche d'altitude, constituent parfois (lorsqu'elles sont enfouies) un facteur favorable au déclenchement des avalanches. Dans ce cas (et pour une orientation donnée) les avalanches ne se produiront qu'au-delà d'une certaine altitude.

Exemple : c'est le début de l'hiver. Après les premières chutes de neige, une période de beau temps chaud s'installe pour une dizaine de jours, puis de nouvelles précipitations interviennent. Une poudreuse de rêve s'est déposée, même à basse altitude où elle repose sur une épaisse croûte de regel. En l'occurrence, tout tient bien, mais qu'en est-il plus haut ? Si on observe des pentes d'orientation constante, plus on monte et plus l'épaisseur de la croûte diminue. On s'achemine donc vers une zone d'instabilité potentielle qui correspond au manteau neigeux de type "croûte dure et mince enfouie" (voir § 2.1.). Vive méfiance donc à cette altitude. Mais que se passe-t-il encore plus haut ? Ici, le réchauffement n'a pas été suffisant pour permettre la fonte puis la formation de la croûte de regel. La neige récente a pu mieux se lier à la couche plus ancienne et les déclenchements de plaques qui avaient été observés aux altitudes inférieures ne se produisent pas à ce niveau.

2.3.2. Exposition

On retrouve ici la même approche que dans le raisonnement avec l'altitude. L'exposition intervient sur la quantité de neige puisqu'elle détermine l'incidence du vent ; elle intervient également sur les métamorphoses de la neige puisqu'elle conditionne l'exposition au rayonnement solaire et l'échauffement du manteau neigeux. Ici, une difficulté doit être mentionnée en ce qui concerne la position du soleil et le déroulement des saisons : le soleil ne se lève pas et ne se couche pas au même endroit le 1er janvier, le 1er février, le 1er mars... Ainsi, un couloir exposé nord-ouest, qui ne voit pas le soleil jusqu'à la fin du mois de mars, peut devenir très sensible aux avalanches de fonte après cette date. Alors seulement les rayons du soleil l'atteignent (en fin d'après-midi), à un moment où la température de l'air est encore élevée. Les avalanches qui s'y produisent peuvent être énormes, compte tenu des importantes quantités de neige accumulées jusqu'à cette date. Il n'en reste pas moins vrai que les purges naturelles qui interviennent sur les versants exposés au soleil assainissent rapidement la situation.

Anecdote : c'est la fin du mois d'août : une période de fortes précipitations s'est achevée vendredi passé. On prévoit pour le mardi suivant une course de neige assez raide en altitude, dans le massif du Mont-Blanc. Où aller ? Que penser de la face sud des Grandes Jorasses ? Une fois sur place, les conditions sont telles qu'on peut les imaginer : neige bien transformée et stabilité parfaite dès le Rognon de la Bouteille à 3 300 m. Le rêve ! Pourtant, des alpinistes qui avaient tenté l'ascension le samedi ont raconté leur panique quand les avalanches descendaient sans interruption autour d'eux. Ils enfonçaient alors jusqu'au genou dans la neige fraîche. Le mardi où il faisait bon cramponner en versant sud sur cette neige transformée, le bulletin météorologique de Chamonix annonçait encore un risque important d'avalanche de plaque en versant nord.

2.3.3. Inclinaison de la pente

L'inclinaison de la pente intervient à deux niveaux : elle joue d'une part directement sur la stabilité à cause de la résistance que le manteau neigeux doit opposer à la pesanteur, d'autre part sur les conditions météorologiques locales au même titre que l'altitude et l'orientation.

• *Rôle de la pesanteur* : les pentes fortes (supérieures à 45°) se purgent le plus souvent naturellement pendant la chute de neige ou les quelques heures qui suivent. Les pentes faibles (inférieures à 20°) ne bougent quasiment jamais et le danger ne peut venir que des pentes qui les dominent. Les pentes "moyennes" restent donc les plus exposées. C'est pourquoi il faut parfois préférer une ascension directe dans un couloir raide à une trace plus douce dans des contre-pentes moins inclinées. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que les pentes où nous skions n'excèdent que rarement 45°, ce qui veut dire que les pentes considérées comme fortes par le skieur n'ont pas toujours été purgées naturellement. En situation critique, à la descente, il est donc préférable de choisir les pentes les plus faibles si on souhaite limiter les risques de déclenchement.

• *Incidence sur les conditions météorologiques locales* : l'inclinaison joue un rôle évident sur l'incidence du rayonnement. S'il s'agit du rayonnement reçu pendant la journée, on constate qu'une pente s'échauffe d'autant plus vite qu'elle est perpendiculaire au rayonnement. En plein hiver, une pente sud-ouest se transformera donc d'autant plus vite qu'elle est plus inclinée. S'il s'agit du rayonnement émis pendant la nuit, il semble qu'il est d'autant plus intense que la pente est plus faible. Ceci expliquerait que, lorsque les conditions de regel sont "limite", la croûte en surface résiste beaucoup mieux à la pression des skis sur les vastes étendues peu inclinées que sur les pentes fortes.

2.3.4. Situations topographiques

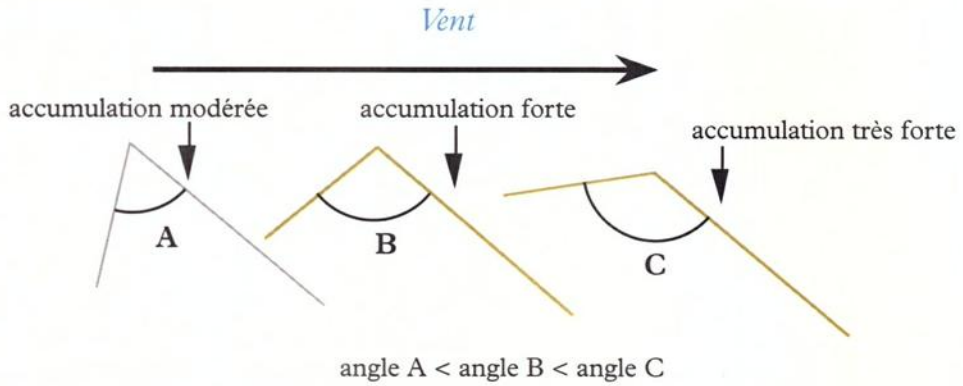
Dans certains services des pistes, les artificiers qui ont plus de trois années d'ancienneté ont droit à une prime dite "d'artificier confirmé". Cette prime ne sanctionne pas, comme on pourrait le croire, une habileté à manipuler les explosifs. Elle récompense plutôt le "coup d'œil" de l'artificier qui place sa charge judicieusement : il est parvenu à déclencher l'avalanche parce que la dynamite a explosé au bon endroit ; il est probable (dans certaines situations) que rien n'aurait bougé si la dynamite avait été placée plus loin. Pourquoi ces différences à quelques mètres près ? Lorsqu'il y a eu transport de neige par le vent, il est vraisemblable qu'une partie de la réponse se trouve dans la localisation des suraccumulations ; dans tous les cas, les paramètres topographiques semblent jouer un rôle déterminant.

2.3.5. Arêtes sommitales

Cette particularité topographique est évoquée en premier lieu parce que c'est probablement la plus simple à observer. Si, globalement, son effet sur la répartition de la neige transportée par le vent est admis, certaines nuances méritent d'être précisées. La présence de suraccumulations de neige dans le versant sous le vent d'une arête est indéniable. En revanche, nous ne sommes pas encore en mesure de préciser jusqu'à quelle distance de l'arête ces suraccumulations peuvent s'étendre. De récentes observations[3] nous incitent à proposer seulement 25 à 30 m [6]. Par ailleurs, nous avons observé que la neige qui constitue les accumulations peut être de qualité très variable (entre la neige poudreuse à 60 kg/m^3 et la neige dure à 300 kg/m^3). Le skieur ne sera donc que rarement sûr de la localisation des suraccumulations, même en observant attentivement le relief et la qualité de la neige de surface. La forme du relief exposé face au vent (en aval de l'arête) joue un rôle important. Par exemple, plus la pente au vent est inclinée, plus la zone de reprise est réduite et moins la quantité de neige déposée sous le vent est importante (figure 6). A quelques dizaines de mètres près, on peut déclencher une importante avalanche de plaque derrière un replat, alors que rien ne se produit derrière une arête plus aiguë. Enfin, n'oublions jamais que, même si l'on raisonne souvent en termes de "versant au vent" et de "versant sous le vent", le vent

3. N.D.L.R. : observations sur le site du Seuil (Valfréjus, Savoie).

change généralement de direction au cours d'un épisode perturbé (dans les Alpes du Nord, on passe fréquemment de sud-ouest à nord-ouest). Ceci signifie qu'un versant "sous le vent" aujourd'hui était peut-être "au vent" avant-hier.



angle A < angle B < angle C

Figure 6. Pour des conditions de neige et de vent identiques, l'importance des suraccumulations dépend de la forme du versant "au vent".

2.3.6. Cols

L'effet d'un col s'apparente à ce qui est énoncé ci-dessus (effet d'arête). Il s'y ajoute une accélération de la vitesse du vent au passage du col. Les quantités de neige accumulées sous le vent dominant peuvent donc être particulièrement importantes. Pourtant, elles ne sont pas systématiquement instables : on trouve parfois au printemps des épaisseurs de neige supérieures à 10 m derrière certains cols, sur des pentes fortes, sans qu'aucune avalanche ne se produise... La prudence s'impose tout de même (photographie ci-dessous).

Outre la présence des suraccumulations, le danger au passage des cols peut être lié à la configuration du terrain : la superposition des suraccumulations successives provoque toujours un nouveau modelé. Lorsque la forme de celui-ci devient convexe, il se prête particulièrement bien au déclenchement des avalanches. L'analyse du skieur doit alors être la même que dans les autres situations



La sensibilité des cols à l'activité avalancheuse est indéniable. Cliché A. Duclos.



Avalanche de plaque de neige récente. D'après le témoin, le skieur emporté a été fauché par l'avalanche au niveau signalé par le pisteur situé en amont. Cliché A. Duclos.

de ce type : compte tenu de la forme du terrain, est-il judicieux de s'engager sur un manteau neigeux ayant telles caractéristiques (celui-ci ayant été observé auparavant) ? On peut là aussi, à quelques mètres près, trouver une topographie moins sensible et des suraccumulations moins importantes.

2.3.7. Épaules et talwegs dans le sens de la ligne de pente

Lorsque la situation nivologique est délicate, doit-on emprunter plutôt les épaules ou plutôt les talwegs ? Doit-on skier plutôt sur les bosses ou plutôt dans les creux ? Les réponses à ces questions sont rarement claires et jamais unanimes. Deux points de vue doivent être considérés : celui de la stabilité proprement dite d'une part, et celui du risque engendré en cas de départ ou de déclenchement d'autre part. Du point de vue de la stabilité, il faut choisir entre les épaules qui sont le siège privilégié de tensions au sein du manteau neigeux, et les talwegs qui sont *a priori* les zones les plus chargés de neige. Du point de vue du risque engendré par le skieur, on doit aussi évaluer les possibilités de s'échapper de l'avalanche. Si cette éventualité est possible sur une crête, le risque de rester piégé est maximum dans les creux. Dans tous les cas, aucune réponse ne peut être fournie sans une observation au préalable du manteau neigeux. Si la neige a été transportée par le vent au cours des derniers événements nivo-météorologiques perturbés, il est probablement plus sûr d'évoluer sur les épaules (parce que ce sont les zones les moins chargées) ; au contraire, si la neige récente s'est déposée uniformément, on suppose que les talwegs doivent être choisis (parce qu'il est moins probable de provoquer des déclenchements dans les zones de compression). En règle générale, il semble que les grandes pentes striées d'épaules et de talwegs sont particulièrement sournoises. N'avez-vous jamais rencontré une pente qui, de loin, semble peu enneigée parce que l'on aperçoit des taches d'herbe ? Il est possible que, dans chaque talweg, une plaque se déclenche à la première sollicitation.

2.3.8. Convexités et concavités perpendiculaires à la ligne de pente

Au niveau des ruptures de pente (zones convexes), le manteau neigeux est soumis à des forces de traction. On peut alors assimiler l'effet des skis sur une

couche de neige à celui d'un coup de ciseaux sur un textile tendu : la rupture s'amorce devant les spatules puis file très rapidement. Lorsque le manteau neigeux est instable, les zones convexes sont donc particulièrement sensibles. Les pentes concaves, réputées plus stables que les pentes convexes, sont néanmoins plus délicates à négocier. Dans ce cas, si la neige est tendre, le skieur peut fragiliser la zone de compression qui constitue un appui pour la pente en amont. La rupture par traction intervient alors nettement en amont du skieur et l'ensemble de la pente se met en mouvement (photographie page 239). Méfions-nous donc aussi des pentes concaves !

Enfin, rappelons que de nombreuses avalanches accidentelles sont déclenchées à distance : la première rupture visible peut apparaître à plusieurs centaines de mètres du skieur qui a provoqué le phénomène. Dans ces cas, l'endroit où le skieur exerce la contrainte (pour cette situation nivologique précise) importe peu : une fois le phénomène déclenché, la rupture par traction se produit de toute façon à l'endroit le plus sensible (généralement une zone convexe). Si cet endroit est en aval du skieur : tant mieux !

Anecdote : j'ai réalisé pendant plusieurs saisons des mesures sur la neige dans la partie supérieure d'un couloir avalancheux. Je descendais donc quotidiennement sur ce site, à pied et dans le sens de la pente, tout en notant les hauteurs de neige indiquées par des perches graduées. Ce 2 mars, la zone d'accumulation est particulièrement chargée. Dans la pente inclinée en moyenne à 30°, la convexité du relief m'incite à la plus grande prudence. J'essaye de me faire aussi léger que possible en constatant (mesures à l'appui !) que la suraccumulation sur laquelle je progresse atteint 70 cm. Pas assez léger toutefois puisque, après avoir perçu une sensation d'effondrement, je m'aperçois que la pente de neige s'est décrochée à une dizaine de mètres de moi en aval. L'épaisseur de neige récente au niveau de la cassure n'était que de 20 cm ; la convexité y était peut-être un peu plus accentuée... J'ai eu la nette impression qu'après la rupture que j'avais provoquée, la cassure visible s'était produite à l'endroit où la couche de neige récente était la plus fragile : de faible épaisseur et soumise à de fortes tensions. J'ai vécu plusieurs fois, depuis cette date, une expérience similaire.

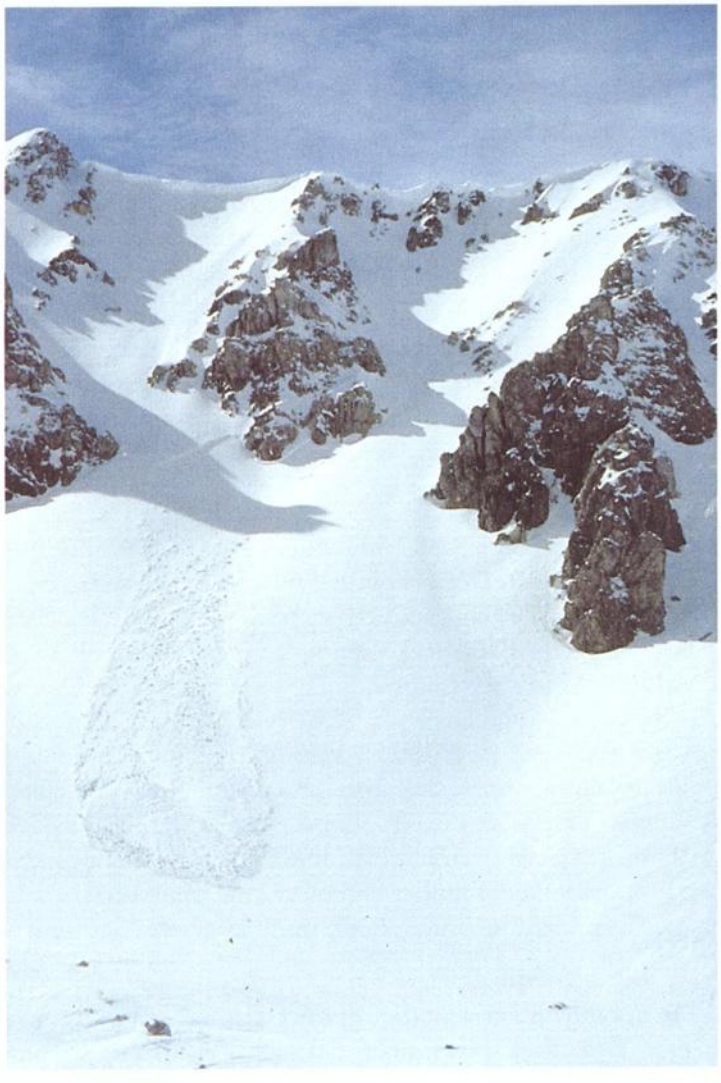
2.3.9. Versant globalement uniforme : zones de reprise et de suraccumulation

Les phénomènes liés au transport de neige par le vent qui se produisent de part et d'autre d'une arête sont relativement bien connus. Ils ne concernent toutefois qu'une infime partie des pentes sur lesquelles nous skions. On comprend en effet qu'un versant au vent de 500 m de dénivelée ne va pas être uniformément déneigé et qu'un même versant sous le vent ne va pas être également chargé de neige accumulée. Quant à déclarer que les plaques à vent ne sont pas dangereuses...

Anecdote : samedi 18 décembre, c'est l'ouverture de la station à la clientèle. Depuis que les pisteurs travaillent sur le domaine skiable, c'est-à-dire une dizaine de jours, le mauvais temps s'acharne sur la région sous la forme de perturbations de nord-ouest. Le vent du nord a soufflé assez fort pendant cette période et les parties hautes des pentes nord, sous les crêtes, sont manifestement déneigées. Aucune opération de déclenchement préventif des avalanches n'a donc été prévue dans ces secteurs. Heureusement, aujourd'hui il fait beau. Nos clients profitent donc des pistes puis, peu à peu, investissent le secteur hors piste vierge de traces. A 15 heures c'est l'alerte : une plaque de neige a été déclenchée accidentellement en versant nord à environ 2 400 m d'altitude, un peu plus de 50 m de dénivelée sous la crête (photographie du haut, page 241).



Le bon jour, la bonne heure… et quelques coups de ski bien placés. Cliché S. Dupraz.



De nombreux départs naturels au pied des barres rocheuses. Cliché A. Duclos.

Sur une pente relativement uniforme, il est extrêmement difficile (impossible ?) de prévoir la localisation des zones les plus instables, que l'instabilité soit imputable en premier lieu à la topographie ou à la présence de suraccumulations. Les zones sensibles d'un point de vue topographique doivent donc être évitées *a priori*, tandis que la localisation des suraccumulations doit être appréciée par un sondage rapide – mais fréquent – des couches de surface du manteau neigeux, avec le bâton de ski par exemple.

2.3.10. Barres rocheuses

En observant l'activité avalancheuse naturelle, on remarque souvent de nombreux départs de plaque au pied des barres rocheuses (photographie du bas, page 241). Ce phénomène est probablement dû aux quantités relativement importantes de neige qui se déposent à ces endroits ; il peut dépendre aussi de la qualité de la neige accumulée, qui a été travaillée par les turbulences le long des rochers. Ce sont en tous cas des zones qu'il semble préférable d'éviter, à moins de longer scrupuleusement le pied des barres et de ne provoquer d'éventuels déclenchements qu'en aval de sa position.

2.4. Les signes précurseurs et les indices

2.4.1. Activité avalancheuse observée

C'est un indice important, mais dont l'interprétation nécessite quelques précautions :

- une observation des traces d'avalanches ne livre pas d'informations sur la chronologie. Elle perd beaucoup de sa valeur si elle n'est pas accompagnée d'une connaissance suivie de l'endroit et s'il est impossible d'établir une relation avec une date ou avec une situation météorologique. Elle renseigne néanmoins sur la sensibilité d'un site et sera prise en compte si l'analyse du manteau neigeux conduit à la méfiance ;
- l'observation des événements passés n'informe le plus souvent que sur l'activité avalancheuse naturelle. Or l'activité avalancheuse accidentelle potentielle est en général beaucoup plus étendue, d'un point de vue géographique et chronologique ;
- les avalanches observées sur une zone caractérisée par son altitude, son inclinaison et son orientation, incitent bien sûr à la plus grande méfiance pour les endroits dont les caractéristiques sont similaires. Elles ne dispensent pas d'une analyse sérieuse pour les sites qui s'en distinguent.

2.4.2. La neige

Nous avons insisté tout au long de ce chapitre sur l'importance de la connaissance du manteau neigeux. Il ne faut pas confondre, cependant, "balade à peaux de phoques" et "stage de nivologie". Il est exclu de passer la journée une pelle à la main et de faire un trou à chaque changement de pente : ce qui est trop contraignant ne se fera pas.

Lors de l'exposé sur les manteaux neigeux les plus instables, nous avons parlé surtout d'épaisseur de neige récente, de couche mince dure ou fragile sous la neige récente... bref, des couches les plus superficielles du manteau neigeux. Même si l'ensemble des situations à risque ne sont pas détectées par cette analyse de surface, elle permet néanmoins de déceler leur immense majorité. Dans cet esprit, un sondage régulier au bâton, une main plongée de temps en temps dans la neige, un trou réalisé en deux minutes fournissent des renseignements utiles.

2.4.3. Les bruits

Beaucoup d'entre nous ont entendu, ou entendu ceux qui ont entendu des bruits. Pour les uns, c'est un coup de fusil, pour les autres, un son étouffé et

sourd. Quelques uns ont plutôt perçu un effondrement sans se souvenir s'il a été vraiment associé à un son. Dans tous les cas, il s'est passé quelque chose induit par la discontinuité entre les couches de neige. La plus grande méfiance s'impose donc. Ces sensations ressenties sur des endroits plats doivent aussi mettre en alerte : les pentes ne seront pas abordées sans examen préalable.

3. Cas traités et exemples*

3.1. Les différentes erreurs rencontrées

On relate ici un certain nombre d'anecdotes qui ont été pour la majorité soit racontées par leurs protagonistes ou des témoins, soit tirées de comptes rendus officiels d'accident[4]. Nous tirons une morale de chacune de ces histoires. Le montagnard peut beaucoup s'instruire à la lecture des récits relatés ici, car s'il peut acquérir au fil des sorties une expérience de la neige, il lui sera plus difficile d'avoir une expérience directe des avalanches, qui sont des phénomènes trop rares à son échelle. Il peut dès lors tirer grandement profit de l'analyse d'accidents, qui vont constituer indirectement un champ d'expériences.

A posteriori, il semble toujours possible de dégager les circonstances, les causes et les responsabilités de l'accident. Dans la majorité des cas, il s'agit d'erreurs humaines qui sont à l'origine du déclenchement et non la fatalité. Le problème de la prévisibilité se pose alors pour le montagnard : dans des conditions similaires, pourra-t-il à temps prévoir avec justesse le risque ? Il faut aussi noter que la plupart des accidents ont eu lieu alors que le risque d'avalanches était annoncé comme élevé par les services météorologiques. Par la suite, les anecdotes sont classées un peu arbitrairement : nous avons essayé de séparer les erreurs d'appréciation de celles dues à une méconnaissance. On relate un certain nombre d'accidents arrivés à des professionnels, car il est également très instructif de voir comment des guides extrêmement compétents ont pu se laisser piéger.

3.2. Erreur d'appréciation, facteur humain

3.2.1. Perception du danger

Au mois de mai, un groupe d'onze personnes mené par deux guides entreprend un raid dans le massif du Grand-Paradis (Italie). L'étape du jour est l'ascension du Grand Serraz (3 552 m) à partir du refuge Vittorio Sella (2 584 m). Après une période de fort mauvais temps accompagné en altitude par d'importantes chutes de neige, le beau temps est revenu depuis 2 jours, quoique de nombreux bancs de nuages soient encore présents. Tôt le matin, le groupe part. Il gèle à peine au refuge. Les guides savent qu'il est tombé beaucoup de neige, mais n'ont pu obtenir plus d'informations. La vigilance et la prudence sont donc de rigueur.

Un peu au-dessus du refuge, vers 3 000 m d'altitude, le groupe atteint une pente raide (35-40°) haute d'environ 150 mètres de dénivelée, entrecoupée d'une barre rocheuse. Les deux guides se concertent pour définir le meilleur itinéraire. Il y a beaucoup de neige fraîche, on enfonce le bâton de ski jusqu'à la garde. Ils décident que l'un d'eux essayera de passer au moins raide, à gauche de la grande pente évidente, par un couloir où le danger est certainement moindre. Si le couloir s'avère raisonnablement sûr, les autres skieurs pourront alors s'engager un par un dans la pente car cela ne surchargera pas trop le manteau et en cas d'accident, les dix autres personnes pourront intervenir dans un bref délai pour secourir la victime. Certes, cela ralentit la progression, mais la sécurité est à ce prix-là. A ce moment arrive un groupe de sept personnes, au pas rapide et assuré, en ordre serré. Ils ne prennent aucune précaution particulière et gravissent rapidement la pente raide. Les deux guides en profitent pour

* Cette partie a été écrite par Christophe Ancey.

4. Un grand nombre de récits sont tirés des rapports annuels "Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen" (neige et avalanches dans les Alpes suisses), publiés par l'IFENA et qui constituent une exceptionnelle source d'informations [1].

faire une pause casse-croûte, tout en surveillant la progression des autres randonneurs. Rien n'est parti. La pente semble tenir. Faut-il dès lors opter pour une pente visiblement plus dangereuse mais où la trace avait été faite par sept skieurs groupés, ou tracer comme prévu à l'origine dans une pente présumée moins dangereuse ? C'est la première solution qui est retenue, mais en engageant seulement un à deux skieurs à la fois [7].

La morale de cette histoire sans accident pourrait être la suivante.

– Conscients de leurs capacités physiques, les sept skieurs étaient trop confiants en eux. Ce jour-là, une distance de délestage, un choix de pente moins raide et de moindre importance voire le renoncement, s'imposait ! L'importance de l'accumulation de neige fraîche (au moins 1,20 m), la raideur (supérieure à 35°) et l'ampleur de la pente, la configuration du terrain, tout portait à rendre catastrophique l'effet d'une éventuelle avalanche. Néanmoins, il semble que les sept skieurs n'ont perçu aucun risque. Parce qu'ils sont passés et que leur surcharge n'a rien provoqué, on peut être amené à croire que le danger n'existait pas. Il existe, mais c'est l'estimation du risque qui est délicate : quelle est la surcharge qui ce jour-là était suffisante pour provoquer l'accident ? Un skieur, deux... huit skieurs ? Certes, la frontière est floue mais on ne peut systématiquement jouer à la roulette russe en montagne, même si elle pardonne beaucoup !

– L'effet d'une avalanche dans cette pente a été négligé par les skieurs : en cas de déclenchement, les sept skieurs étaient emportés et ensevelis. Leur unique chance de survie aurait résidé alors dans l'intervention du premier groupe. Étant donné la déclivité, la présence d'une barre rocheuse, la masse de neige mobilisable, on pouvait s'attendre à un dépôt important, rendant difficile un sauvetage.

3.2.2. Diminution de l'attention et excès de confiance

C'est au début du mois de mai. Voilà plus d'une semaine qu'il fait beau sur toutes les Alpes. L'isotherme 0 °C est remontée très haut (jusque vers 3 000 m), et la plupart des pentes se sont purgées. Le manteau neigeux, même en altitude, s'est humidifié et stabilisé. Le risque est estimé à 2 sur l'échelle de risque du BNA de Savoie et passe à 3 en cours de journée (à cause du réchauffement). Un groupe de cinq excellents skieurs accompagnés par un guide de haute montagne effectue un petit raid aux confins de la Tarentaise, sur la frontière franco-italienne. Partant du refuge de Benevolo (2 285 m), les randonneurs atteignent le col de Rhêmes-Calabre (3 076 m) au pied de la pointe de Bazel. Puis ils entament la descente sur le refuge du Prariond. L'itinéraire choisi n'est pas une classique, il est complexe et raide, emprunte des couloirs au milieu de barres rocheuses. Sur ce versant sud, la neige commence à devenir fondante en surface et la descente s'annonce excellente. Le guide entame le premier la descente, ses clients le suivent à distance. Le groupe passe sans problème toutes les difficultés et arrive juste au-dessus du refuge du Prariond qu'un court raidillon et une traversée tranquille séparent encore du groupe. A ce moment-là, un des clients interpelle le guide pour lui signaler un risque de plaque, mais ce dernier, sans même regarder, décide que c'est sûr et répond : « Non, aucun risque ! ». Néanmoins au dernier moment, suivant un vieux principe sécuritaire qui a fait ses preuves, le guide impose une distance d'une trentaine de mètres entre lui et ses clients. Dès qu'il passe la rupture de pente au-dessus du raidillon, il déclenche une coulée qui, à la cassure, est large d'une quinzaine de mètres et épaisse d'une trentaine de centimètres. Il parvient aussitôt à s'en échapper. Par chance personne ne l'a accompagné [8] !

Plusieurs commentaires sont à faire.

– Le guide focalise sur les difficultés rencontrées dans le haut du versant, dont le passage est aléatoire. Il relâche son attention dans le bas de la pente, qui ne présente guère plus de difficultés : l'arrivée au refuge lui fait entrevoir la fin de la course.

– Malgré la mise en garde de son client, un skieur et montagnard averti, le guide décide qu'il n'y a "aucun risque". Plusieurs éléments le confortent dans son avis instantané : la neige est bien stabilisée surtout en versant sud car voilà plus de huit jours qu'il fait grand beau, il est accompagné par cinq excellents skieurs, il a passé toutes les pentes raides du haut... il ne perçoit plus le danger. C'est donc une faute d'ordre psychologique (persistance dans l'erreur) qui est la cause de l'accident, non une méconnaissance du milieu.

– Malgré l'avertissement du client, le guide n'écoute pas, ne regarde même pas. Le client ne conteste pas sa décision, car il fait confiance, en fin de compte, à l'autorité du guide. C'est un problème fréquent : celui qui sait (ou qui croit savoir) n'écoute pas l'avis de celui qui sait moins, qui est plus jeune... Inversement, on a tendance à faire confiance au chef, à celui qui décide, celui que l'on suit. L'aspect relationnel peut donc aussi apparaître dans cette erreur de jugement.

– C'est un vieux principe sécuritaire, une fois de plus, qui évite qu'un skieur soit emporté.

3.2.3. La pression

« La vie d'un aspirant-guide/moniteur de ski est parfois bien dure et monotone » devait se dire le héros de cette histoire, qui passait son hiver à enseigner le ski sur les boulevards à son goût trop civilisés d'une station du Briançonnais. Les mêmes gestes, les mêmes paroles, les mêmes pistes, les mêmes touristes... Enfin un jour, il arrive à trouver quelques skieurs à qui, péniblement, il vend "de la poudreuse". Le voilà donc engagé à la journée pour faire découvrir l'enchantement du ski loin des pistes, quand une neige poudreuse et légère scintille partout et invite le skieur à y laisser quelques délicates arabesques.

Attaquant la descente, le groupe arrive sur une crête dominant un versant parcouru par trois couloirs parallèles. Déception du guide devant le premier couloir : toute la neige fraîche a coulé et laissé place à une croûte dure moins excitante. Il suit la crête jusqu'au débouché du deuxième couloir. Ô désespoir, le sort s'acharne : la poudreuse a également disparu. Inquiet, il gagne rapidement le dernier couloir. Une neige de rêve y repose et attend quelque artiste qui veuille bien y apposer sa signature. « Oui, mais... » se dit l'aspirant, « s'il y a une activité naturelle dans les autres couloirs, ça craint ici franchement! ». Il se gratte le menton, réfléchit, s'enhardit en pensant à la promesse faite à ses clients. Il décide de s'encorder et d'aller voir comment cela se passe dans le couloir. Il fait un virage, s'arrête, entreprend un deuxième virage. Rien ne se passe. Il saute. Rien ne bouge. Il arrive en bout de corde. Que faire? Un arbre incongru semble posé juste au-dessous de lui, est-ce cette verdure rabougrie qui le rassure? Il se décorde et décide de repartir. Il effectue un virage. Toute la pente part et l'entraîne. Il essaye de se raccrocher à l'arbre en un vain et ultime effort. Il est emporté, chahuté, tiraillé, bousculé, retourné puis tout s'arrête. Il est vivant, enfin, il lui semble qu'il est vivant. Il peut même se lever, il s'époussette, il regarde autour de lui : il a descendu plus de 150 m de dénivelée sans dommage. Plus haut, il aperçoit la tête de ses clients mi-inquiets, mi-étonnés. Il remonte la pente si vite descendue et ces derniers le congratulent : « Ah, on voit que vous maîtrisez bien les avalanches! » [7].

La morale de cette anecdote cocasse est la suivante.

– Dès qu'il y a activité naturelle sur un terrain donné, il faut s'attendre à un risque accidentel élevé pour une pente de même exposition, de même déclivité, de même altitude, *a fortiori* voisine! La prudence conseille d'aller voir ailleurs.

– Penser que le danger dans une pente est essentiellement circonscrit à la partie supérieure est une erreur qui conduit à beaucoup d'accidents. S'encorder et tester une pente se révèlent utiles pour casser une corniche; dans les autres cas, cette technique est douteuse.

– Ce n'est pas, une fois encore, la méconnaissance qui est la cause de l'accident, mais bien le raisonnement du décideur. La pression (tenir son engagement face à ses premiers clients, désir de sortir de sa routine) conduit l'aspirant à une décision opposée à celle que lui dicte sa connaissance technique.

3.2.4. Erreur légitime d'appréciation

Durant un stage de nivologie de la FFME, des skieurs effectuent une course dans le Chablais. Il a neigé abondamment les jours précédents (environ 50 cm) et un vent violent a accompagné les précipitations. L'isotherme 0 °C est redescendue assez bas et la limite pluie/neige située d'abord vers 2 000 m, a fortement chuté. De nombreuses et épaisses accumulations de neige sont probables et rendent la situation inquiétante.

Le groupe évolue vers 2 500 m d'altitude sur une ligne de crêtes, ourlée d'une corniche majestueuse surplombant des pentes raides. La question est de savoir si un itinéraire de descente dans ce versant est possible. L'importance de la corniche et la présomption sur l'existence d'accumulations importantes laissent mal augurer les chances d'une telle entreprise. Néanmoins, les skieurs essayent de voir si la pente se purge d'elle-même en ébranlant la corniche sommitale. L'un des membres du groupe s'encorde et casse à l'aide des skis quelques beaux morceaux de corniche, qui provoquent des coulées conséquentes mais non la grosse avalanche que l'on redoute. On réitère l'expérience un peu plus loin. Une nouvelle avalanche part, dévale un peu plus d'une centaine de mètres de dénivelée puis s'arrête. Décidément, il faut croire que le manteau est plus stable qu'il ne le semble *a priori*. Le groupe entreprend alors la descente dans la zone parcourue par la dernière avalanche, puis enchaîne dans une neige poudreuse fort appropriée à la godille. Il arrive sur le haut d'un raidillon, qui marque le début de la forêt (vers 2 000 m). Du haut de ce court passage (environ 25 m de hauteur) qui s'adoucit rapidement, on aperçoit les premiers arbres ; derrière une dernière rupture de pente, le fond de la combe est visible.

A la première rupture de pente, les skieurs s'arrêtent pour examiner le terrain. Rassurés par les premiers tests, ils n'ont pas d'inquiétudes particulières. Néanmoins, par principe sécuritaire, un seul s'engage, fait un virage, puis un deuxième, saute, cisaille avec ses skis le manteau sans que rien ne bouge. Le deuxième skieur se met alors en mouvement, le premier se dirige vers les arbres en contrebas. Soudain, c'est l'avalanche : elle est déclenchée sur plus de quatre cents mètres de largeur et cinquante centimètres d'épaisseur. En un instant, toute la pente se met en mouvement. Le premier skieur parvient jusqu'à un arbre, auquel il s'accroche désespérément. Il sait que c'est le dernier "fil" auquel tient sa vie. Il subit la pression de la neige qui l'enveloppe, le tiraille, le violente, l'engloutit comme un torrent en crue. Enfin, de nouveau, il a la tête à l'air libre. Il respire tandis que l'avalanche suit son inexorable cours. Deux mètres au-dessus de lui, accroché à une branche de l'arbre se tient son compagnon sain et sauf [7] !

Les leçons à tirer de cette histoire sont les points suivants.

– Il est dangereux d'extrapoler une situation à partir d'une autre. Dans ce cas-ci, on peut a posteriori, expliquer les raisons du déclenchement : au cours de la dernière précipitation de neige, il avait plu dans un premier temps assez haut (jusque vers 2 000 m), puis la limite pluie/neige était redescendue. La strate humidifiée en surface avait eu le temps de geler entre deux précipitations : on avait donc au-dessous de 2 000 m une croûte de regel, qui n'existait pas à des altitudes supérieures. Ce fut justement cette croûte qui servit de plan de glissement à l'avalanche.

– La perception du risque par les skieurs a été biaisée par plusieurs facteurs :

– le début de l'itinéraire constitué d'une zone de crêtes (corniche, versant raide, forte accumulation) constituait apparemment la zone la plus favorable aux déclenchements d'avalanches. La faible activité avalancheuse ce jour-là laissait penser que le risque était encore plus faible en bas ;

– sur le lieu de l'accident, on note l'apparition de la forêt, qui est, consciemment ou non, rassurante pour le skieur. La dénivellation entre le court raidillon et le fond de la combe est faible (une cinquantaine de mètres). Il est dès lors légi-

time de penser que le risque est faible, mais ce raisonnement est malheureusement (et insidieusement) lacunaire : il aurait fallu sonder pour connaître l'existence de la croûte de regel. Il est de plus difficile d'imaginer que l'avalanche puisse prendre une telle ampleur ;

– la descente en poudreuse apportait un peu de griserie, qui a vite fait oublier l'inquiétude des premiers instants avant d'attaquer la descente. Les skieurs ont pris mécaniquement des mesures préventives (l'espacement), c'est ce qui les a sauvés ;

– leur raisonnement a intégré le schéma classique selon lequel seules les pentes sous le vent sont dangereuses à causes des plaques à vent. Il n'y a pas eu d'avalanches dans la zone de crêtes, donc pas de plaques à vent, donc *a fortiori* dans les zones en contrebas, qui plus est, boisées. On voit dès lors combien un schéma trop réducteur sur la plaque à vent influe dangereusement sur l'évaluation du risque.

3.2.5. Mauvais point de regroupement

A la fin mars, un guide emmène trois clients dans le vallon de Réchy (val d'Anniviers, Valais) à partir des remontées mécaniques de la station de Grimentz. Un soleil radieux brille et les conditions de neige sont idéales malgré le faible enneigement : 15 cm de neige poudreuse reposent sur un fond dur ; cette dernière couche résulte des précipitations de la semaine précédente (quatre jours auparavant). Le bulletin de prévision du risque d'avalanches annonce un risque modéré et local de glissement de plaques au-dessus de 2 000 sur les versants nord-est à nord-ouest. Avant d'attaquer la pente raide (40 à 45°, orientée au nord) sous le roc de Tsa vers 2 700 m, le guide sonde avec son bâton le manteau neigeux, déclenche quelques virages vigoureux pour éprouver la pente. Tout semble correct. Il impose à ses clients des consignes de sécurité : un seul skieur doit s'engager dans la descente. Il entame sa descente et s'arrête vers un éperon rocheux 120 mètres au-dessous de la ligne de crêtes pour un premier regroupement. Le second skieur attaque à son tour la descente et rejoint le guide. Le troisième fait de même, mais au moment où il atteint les deux autres skieurs, une avalanche part.

La rupture s'est produite au niveau des premiers virages, une vingtaine de mètres sous la ligne de crête ; elle affecte sur une largeur d'environ 200 mètres un ensemble de couches d'épaisseur variant entre 50 et 90 cm reposant sur de la vieille neige (remontant au mois de décembre). Le scénario est identique à celui décrit au chapitre 5 (§ 3.2.). Les trois skieurs tentent une fuite latérale mais l'avalanche les emporte sur environ deux cents mètres de dénivellation. Le quatrième skieur, posté en guetteur, descend aussitôt vers la station prévenir les secours. Le guide, quoique complètement enseveli, arrive à se ménager un espace suffisant et à alerter par radio la police cantonale de Sion. Les secours arrivent cinquante minutes après le départ de l'avalanche, dégagent le guide et un des clients à moitié enseveli. Après une dizaine de minutes, un chien trouve la dernière victime enfouie sous 80 cm de neige. Elle décède à l'hôpital, probablement de la suite de ses blessures [1].

La morale de cet accident dramatique pourraît être la suivante.

– Le test du bâton, même accompagné de sauts à skis dans le haut de la pente, n'a que peu de valeur pour un diagnostic fin du manteau ; dans ce cas, il a mené le guide à une confiance excessive et malheureusement illusoire : le bâton s'est enfoncé dans la couche de neige fraîche jusqu'à buter contre la croûte sous-jacente. Le plan de glissement de l'avalanche était malheureusement au-dessous de la croûte.

– Trop confiant, le guide a choisi le point de regroupement en pleine pente. Plusieurs facteurs peuvent légitimer un tel choix : pente d'ampleur (300 m de dénivellation), présence rassurante d'un éperon rocheux, volonté de rester à portée de ses clients, bonnes conditions apparentes de neige (BNA, test du bâton)... *A posteriori*, il semble que cela soit la surcharge due aux trois skieurs qui provoque l'avalanche, donc un mauvais emplacement du point d'arrêt. Quoi qu'il en soit, à supposer que la surcharge ne soit pas la cause, le point de regroupement était dans une zone exposée.

– Bien que le guide ait pris les mesures adéquates dans la descente, ces dernières ont été malheureusement insuffisantes. Le port d'ARVA et la promptitude des secours ont néanmoins limité les conséquences de l'avalanche.

3.2.6. Un essai malheureux

A la mi-mars, une section de l'armée suisse participe à un exercice au-dessus de l'Oberalpass, près du sommet du Rossbodenstock (2 835 m). Les jours précédents, l'isotherme s'est maintenue assez haut (2 300 m) avec des précipitations faibles de neige (20 cm) ; le jour de la course, un violent vent de sud a débouché le ciel, chassé les nuages et vers midi, le temps est beau. Le bulletin nivo-météorologique annonce un risque marqué de départs en plaque au-dessus de 1 800 m dans la région du Gotthard. Le premier jour, les 32 militaires accompagnés de deux guides atteignent le Pazolastock (2 739 m), puis longent la ligne de crête, et traversent jusqu'à la cabane Aldus (2 506 m). Le lendemain, ils prévoient l'ascension du Rossbodenstock, et durant la montée, une analyse du manteau neigeux, par sondage stratigraphique et coin suisse, est programmée. Partant du refuge, ils remontent en direction du nord-ouest la pente descendue la veille jusqu'à la ligne de crête. Au niveau d'un petit col, le Martschallücke à 2 688 m, un artificier monte au point coté 2 737 et lance à la main une charge explosive dans l'autre versant orienté au nord : rien ne se passe. Le tir étant négatif, la section monte au sommet du Rossbodenstock en suivant sa crête. Après la pause, elle descend en contrebas vers une plate-forme située sur le flanc sud-est de la montagne à 2 700 m, juste au-dessous du pas de l'Älpetlilücke. Les deux guides commencent l'instruction de nivologie. L'un des guides désigne l'emplacement des tests (coin suisse) et sondages dans un panneau du petit col, orienté au nord-est et sur un autre orienté à l'ouest. Les pentes sont certes raides (35°), mais courtes (moins de 50 mètres) et de l'avis des deux guides et du lieutenant sans gros danger. Le coin suisse indique une assez bonne stabilité du manteau (degré f, cf. chapitre 6). Par la suite, on décide de tenter une variante du test : au lieu d'une personne sautant d'en haut sur le coin, ce sont deux militaires qui vont s'élancer.

Brusquement, au moment du double saut, le manteau se fissure au-dessus du coin sur une épaisseur voisine de 80 cm et une grosse coulée emporte cinq militaires. Les deux sauteurs surnagent tant bien que mal dans la coulée. La grande pente dans l'immédiat voisinage se purge à son tour spontanément : la seconde avalanche est un phénomène d'ampleur, mais heureusement aucun des skieurs n'est emporté. Quand tout s'arrête, les victimes sont aussitôt recherchées à l'aide des ARVA. En quelques minutes, on les localise et on les dégage mais elles sont sans connaissances. Malgré leur évacuation dans les plus brefs délais par hélicoptère, elles ne survivront pas [1].

En conclusion, on peut faire les remarques suivantes.

- Visiblement, toutes les mesures de sécurité ont été prises dans le choix du site ; néanmoins certains facteurs ont joué dans le déclenchement de la coulée : le manteau neigeux a fortement été travaillé et il est probable que la tranchée nécessaire au coin suisse l'ait fragilisé ; par ailleurs, le test a été fait juste sous une crête, derrière laquelle le vent a déposé environ 70-80 cm de neige contre une vingtaine de centimètres dans le versant nord situé cent mètres plus loin.

– Il se peut que le guide ait redouté une concentration de suraccumulations dans les versants orientés au nord car le vent venait du sud ; dans la configuration de terrain, ce sont les pentes orientées de l'est au nord-est qui étaient les plus chargées.

– L'accident montre une nouvelle fois qu'une coulée suffit à tuer malgré l'importance et la rapidité des moyens mis en œuvre durant le sauvetage. Il donne aussi un exemple d'avalanche secondaire importante déclenchée par un phénomène mineur.

– Pourquoi le manteau a-t-il cédé durant la variante et non durant le test, qui indiquait une bonne stabilité (degré f) ? L'impulsion donnée au coin a été plus importante : deux sauts simultanés et 3 skieurs dans l'immédiat voisinage du coin... Il se peut aussi qu'il y ait eu un effet retardateur comme le mentionne l'expertise juridique suisse : « Un tel processus se déroule le plus souvent en quelques secondes, mais il y a aussi des cas particuliers, comme dans le cas présent, où cela se produit seulement après plusieurs minutes. Ces exceptions se rencontrent exclusivement avec des manteaux neigeux déjà à peu près consolidés, et qui montrent une ou plusieurs couches fragiles propices au glissement (par exemple, sur une pente avec, dans les couches supérieures, un dépôt compact de neige transportée par le vent et reposant sur une couche de gobelets ou de regel). »

3.2.7. Un accident imprévisible

Au début février, un guide amène un couple faire l'ascension du Staldenhorn (2 262 m) par son versant nord-est. Le temps est beau et doux. Deux jours auparavant, il est tombé une quinzaine de centimètres de neige au-dessus de 1 400 m ; un vent modéré mais parfois violent a soufflé localement. Le bulletin nivo-météorologique annonce un risque local d'avalanches au-dessus de 2 000 m. Le guide a pris connaissance de ce bulletin, et la veille alors qu'il effectuait une randonnée avec les mêmes clients à quelques kilomètres de là, il a sondé le manteau neigeux, entre autres en réalisant un bloc norvégien. A la lumière de ces essais, il a apprécié le risque d'avalanches comme faible.

Le guide et ses clients partent en milieu de matinée de la vallée et montent en direction du Staldenhorn. Le guide regarde attentivement le relief, il ne voit aucun signe qui lui indique une activité avalancheuse présente ou passée, ce qui confirme son jugement de la veille. Vers 2 060 m, les skieurs abordent un raidillon et mettent leurs cales de montée ; la neige est croûtée en surface. En attendant ses clients, le guide réalise un essai de bloc norvégien près d'une grande dalle rocheuse. Ce nouveau test confirme la conviction du guide. Il examine encore la neige de surface quelques dizaines de mètres plus haut. Sans inquiétude, le guide poursuit sa route vers un col, ses clients le suivent à une centaine de mètres. Alors qu'il a déjà atteint le raide plan incliné sous le col (38°), une avalanche se déclenche sur 150 mètres de large. Le couple est aussitôt emporté jusqu'au pied de la pente. Le guide remarque un point noir sur le cône de dépôt, il creuse et dégage la tête de son client. Sans perdre de temps, il appelle par radio les secours et commence à rechercher sa cliente à l'aide de son ARVA. Très rapidement, il la localise et commence à pelleter, bientôt aidé par les sauveteurs arrivés en hélicoptère. Ils retrouvent la victime sous 2,5 m de neige : elle est sans connaissance. L'équipe de secours tente en vain de la réanimer et malgré son évacuation vers l'hôpital de Lausanne, elle ne pourra être sauvée [1].

La conclusion de ce malheureux accident est résumée par les points suivants.

– Le guide a pris toutes les mesures de sécurité, malheureusement son appréciation du risque était fausse : juste sous la couche de neige récente mais soufflée par le vent (une vingtaine de centimètres), reposait une couche fragile (givre de surface) sur une épaisse couche de grains fins (une cinquantaine de centimètres). C'est cette couche mince qui a servi de première couche de glissement, l'instabilité a gagné par la suite les couches inférieures ; une couche de gobelets a servi de deuxième surface de glissement. Une analyse par coin suisse ou bloc norvégien donnait un bon niveau de stabilité (degré e.2, voir profil au ch. 6). Dans de telles circonstances, ce qui advint par la suite semble imprévisible.

– L'accident est un nouvel exemple de l'instabilité d'accumulation de neige soufflée, surtout dans des pentes raides (38°). L'accident a lieu par température douce (+5 °C à 2 000 m) juste au-dessous de la ligne crête.

3.3. Méconnaissance du milieu

3.3.1. Collective

Une collective importante (plus de trente personnes) entreprenait une course malgré des conditions météorologiques incertaines. Au cours de l'ascension, l'homme de tête qui réalisait la trace, commença à avoir des doutes sérieux sur la stabilité du manteau et il préféra renoncer. Il n'est ni facile ni agréable de renoncer : se lever si tôt, faire tant de kilomètres en voiture pour manquer un sommet si proche... Une partie du groupe était donc d'avis de continuer et un nouveau traceur reprit la montée. Un peu plus loin, ce fut l'accident. La pente se mit en mouvement, il s'en suivit un tohu-bohu pire qu'une mêlée de rugby, puis tout s'arrêta, se figea ; la voix humaine des rescapés encore abasourdis avait du mal à percer le silence retrouvé... Chacun se souleva, compta ses membres, chercha son matériel, retrouva ses esprits. Un homme se manifesta pour calmer l'agitation de ses compagnons et pour savoir s'il y avait des victimes. Chacun regarda alors si ses proches collègues étaient là. Il semblait bien que tout le monde était présent. En dernière vérification, on mit les ARVA en position *recherche* afin de le lever le doute. Stupeur ! On entendit clairement un bip-bip : pas de doute, il y avait une personne ensevelie. Tout le groupe s'activa alors pour déneiger la victime rapidement localisée. On dégagea sa tête pour lui permettre de respirer. Aussitôt, l'un des sauveteurs s'écria : « Ciel, ma femme ! » [7].

La morale de cette drôle d'histoire est multiple.

– On cède facilement à la tension nerveuse voire à la panique au moment de l'accident ou après, ce qui a tendance à ralentir ou étouffer une activité intellectuelle normale. Retrouver son sang-froid est un élément important dans la prise de décision.

– Dès que l'on amène un groupe nombreux, des problèmes surgissent : hétérogénéité du groupe (technique, expérience, forme physique...), difficulté à respecter un horaire, des consignes de sécurité, une décision, etc., conflit entre personnes, "panurgisme" (suivre aveuglément le chef)... Cela peut être le scénario catastrophe comme l'affectionnent les films du même genre, où un individu arrive à insuffler un vent de panique sur le reste du groupe, ou bien ralentit trop ses compagnons mettant ainsi tous les autres en danger car il ne faut pas l'oublier : c'est l'élément le plus faible qui conditionne l'efficacité, la rapidité ou la cohésion au sein du groupe. Remarque pratique : lors de déplacement de collectivités, il est préférable d'avoir une feuille avec le nom des participants et faire un appel si besoin est.

– Le fait que la plupart des personnes aient été emportées indique que les mesures de sécurité dans la progression étaient insuffisantes.

3.3.2. Quand le danger vient des autres

Au début du mois de février, une soixantaine de personnes (en 6 groupes) réalisent le Piz Ucello (2 724 m) au nord de San Bernardino (est du Tessin). Le temps est revenu au beau fixe après des chutes de neige moyennes (une trentaine de centimètres au-dessus de 1 600 m cinq jours auparavant) puis faibles (quelques centimètres par jour). Le bulletin annonce un risque local marqué. Le groupe le plus important est composé de 32 skieurs accompagnés par deux responsables et a déjà réalisé la veille une course dans le même secteur. Les responsables ont même pris le soin de sonder sur un replat vers 2 100 m le manteau neigeux épais d'une soixantaine de centimètres et l'ont jugé stable. Les premiers de ce groupe arrivent au sommet et attaquent la descente après une pause d'une demi-heure tandis que leurs camarades et les autres groupes continent de monter dans la pente sommitale.

Sous le sommet la pente est soutenue mais sans excès (32°) et orientée à l'est ; entre 5 et 10 personnes entament la descente vers midi quand une plaque

de neige est déclenchée sous la ligne de crête (sur une largeur de 300 mètres et une épaisseur moyenne de 30 cm) et emporte 23 skieurs qui se trouvaient dans la montée. Aussitôt la plupart des skieurs qui ont assisté en témoins impuissants au drame organisent une opération de secours avec les ARVA, tandis que d'autres vont chercher des renforts extérieurs. En moins de vingt minutes, on dégage plusieurs personnes dont une victime ensevelie sous 1,5 m de neige, qui ne survivra pas. La plus grande confusion règne, car on ne sait pas le nombre exact de personnes emportées et les sauveteurs continuent leur opération jusqu'à la tombée de la nuit. C'est seulement après cette interruption qu'on a pu savoir à partir des témoignages recueillis qu'il ne manquait plus personne [1].

La morale de cette histoire pourrait être la suivante.

– La seule victime de l'avalanche était en train de soigner son pied au moment où elle a été emportée par une avalanche déclenchée plus haut par des skieurs à la descente. Dans ce cas-ci, le danger est dû au comportement anarchique (irresponsable ?) d'un groupe trop important.

– Cet accident est caractérisé par la confusion : comportement individualiste au sein du gros groupe (certains étaient dans la montée, les uns restaient au sommet et les autres attaquaient la descente), absence de coordination malgré la présence de deux responsables, confusion pendant et après l'accident (23 personnes emportées !).

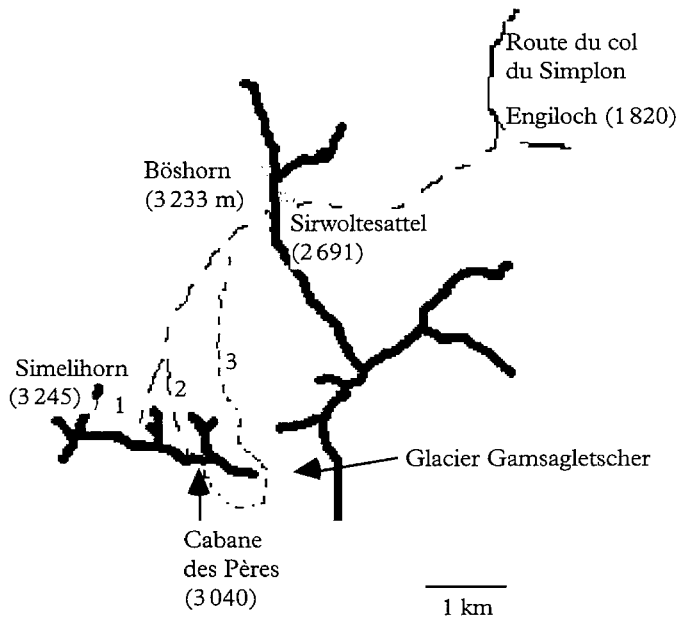
– Les responsables du groupe avaient pourtant pris la précaution de réaliser la veille un sondage, mais dans un lieu non représentatif (trop bas, plat...). Le bulletin n'a pas suffisamment mis en éveil la méfiance de ces responsables.

– C'est le port de l'ARVA qui a évité un bilan plus lourd.

➡ Voir profil figure 12 au chapitre 6.

3.3.3. Une tragique erreur d'itinéraire

A la fin du mois de décembre, un groupe de 5 jeunes gens accompagnés par un responsable expérimenté d'un club alpin réalise une boucle de deux jours à partir d'Engiloch en direction du col Simelipass (3 022) dans la région du col du Simplon. Un temps froid (-16 °C à 3 000 m), ensoleillé et sec est revenu après quelques précipitations. L'enneigement est nettement déficitaire en comparaison des années précédentes : moins d'un mètre de neige à 3 000 m. Un vent de sud-ouest a soufflé violemment les jours précédents et d'importantes accumulations se sont formées dans les versants ombragés. Le bulletin nivo-météorologique annonce un risque local marqué. Partis en début de matinée, les skieurs passent le Sirwoltesattel et se dirigent vers le pied d'un couloir menant à un col coté 3 026 m à gauche du col initialement prévu. Le responsable s'est-il trompé d'itinéraire ou a-t-il délibérément choisi cette variante, ou encore espère-t-il de là suivre l'arête pour atteindre la cabane des Pères au Simplon, lieu du bivouac ?



➟ Figure 7.
Accident au Simelihorn. L'itinéraire classique de montée à la cabane des Pères au Simplon passe par le Gamsagletscher (itinéraire 3). Le responsable du groupe prévoyait de passer par le col du Simeli (3 022 m, itinéraire 2), mais a suivi l'itinéraire 1. L'avalanche les a surpris juste au-dessous de la ligne de crête.

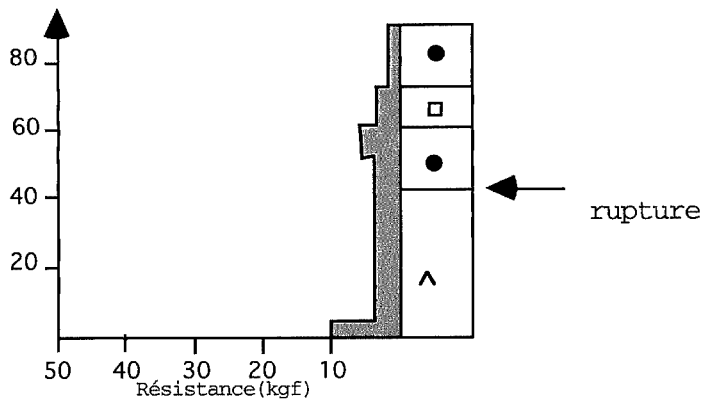
Malheureusement, une petite avalanche concernant les dernières couches de neige (60 cm de grains fins sur une couche de gobelets à la base du manteau neigeux) les surprend vers 2 950 m alors qu'ils remontent la pente raide (40°, orientée au nord) et emporte tout le groupe. Quatre des six skieurs sont totalement ensevelis et deux seulement à moitié ensevelis ; ces derniers arrivent à se dégager et commencent à rechercher leurs camarades. Deux sont retrouvés morts. L'un des deux survivants est très fatigué ; il meurt rapidement de froid et d'épuisement. Son compagnon désemparé va chercher des secours, mais plutôt que de rejoindre la cabane (équipée d'un radiotéléphone) qui est seulement à une centaine de mètres au-dessus de lui (en dénivellation), il redescend par l'itinéraire de montée. Les sauveteurs, prévenus seulement le lendemain du drame par le directeur du camp de vacances, trouveront son corps tout près de la route d'Engiloch : sans skis, il est tombé mort de froid et d'épuisement [1].

Le récit reconstitué de cette histoire tragique mène aux remarques suivantes.

– Le choix de l'itinéraire préparé par le responsable seul est étrange, l'itinéraire logique (décrit sur la carte de Visp) passe par le glacier Gamsa. Il a néanmoins préféré la variante par le col de Simeli. Sur le terrain, il a opté pour un autre couloir, plus enneigé que la pente menant au col de Simeli. Est-ce l'enneigement insuffisant dans cette pente qui l'a conduit à choisir ce couloir secondaire qu'il semblait possible de remonter à skis ou bien une confusion entre les deux cols distants de cinq cents mètres ?

– Le bulletin nivo-météorologique était pourtant très clair sur l'existence d'accumulations dangereuses dans les versants orientés à l'est et au nord au-dessus de 2 300 m. A-t-il été consulté par le chef du groupe ? Ce dernier a-t-il mal interprété les avertissements du message ou sous-estimé le risque en ce début d'hiver peu enneigé ? Pourquoi n'a-t-il pris aucune précaution dans le couloir ? Un simple sondage au pied du couloir l'aurait renseigné sur l'état du manteau neigeux, qui était manifestement instable (tout le manteau avait une résistance au battage inférieure à 5 kgf).

– La gravité de l'accident est le résultat d'une succession d'erreurs graves (malgré l'expérience du cadre), accentuée encore par l'absence de précautions et de moyens radio.



➡ Figure 8.
Profil simplifié à l'endroit de la fracture. Le décrochement a affecté les 60 premiers centimètres composés essentiellement de grains fins (quelques faces planes). Le plan de glissement s'est fait à l'interface gobelets/grains fins [1].

3.3.4. Problème d'ARVA

A la mi-février, deux amis prévoyaient de faire un raid autour de la Rosablanche (Valais), mais les conditions nivo-météorologiques n'étant guère favorables, ils ont opté pour de petites courses à la journée. La température est douce pour la saison (à 2 500 m, -2 °C) et les jours précédents, un vent violent a soufflé et de nombreuses accumulations sont à craindre surtout dans les versants orientés au nord et à l'est, comme l'indique le bulletin nivo-météorologique. Le risque est annoncé comme modéré. Les deux hommes partent en direction de la cabane Saint Laurent, puis comptent rejoindre la station de Tortin (au nord-est de Verbier). Prudents, les deux skieurs s'espacent d'une dizaine de mètres. En attaquant un raidillon au-dessus du refuge, vers 2 680 m, le skieur de tête déclenche une coulée sur une vingtaine de mètres de largeur. Malgré la faible dimension du glissement, les skieurs ne parviennent pas à fuir latéralement (les peaux de phoque empêchent un mouvement rapide).

Le skieur de queue à moitié enseveli se dégage rapidement et commence aussitôt à rechercher avec son ARVA son camarade. Il ne réussit pas à le localiser. Il redescend alors au refuge prévenir les secours, et il emprunte l'appareil d'un aspirant-guide, qui, quant à lui, part chercher au plus vite les secours dans la vallée. Retourné sur les lieux de l'accident, le skieur se met aussitôt à la recherche de son ami à l'aide du deuxième ARVA. Il le localise rapidement sous une cinquantaine de centimètres de neige et le dégage mais ne connaissant pas les mesures de premiers secours à prodiguer à la victime inconsciente, il attend une trentaine de minutes les sauveteurs. Malgré son évacuation à l'hôpital de Sion, la victime meurt quatre heures après [1].

Quelques remarques sont à faire en conclusion de ce malheureux accident.

– Pourquoi le skieur n'est-il pas arrivé à localiser son camarade avec son ARVA juste après l'accident? ARVA en panne? Problèmes de piles? Mauvaise technique de recherche ou inexpérience? Panique? Volonté plus ou moins consciente d'aller chercher de l'aide au refuge? On ne sait pas exactement pourquoi la localisation n'a pas pu être réalisée dans un premier temps, mais il est certain que la perte de temps engendrée (plus d'une heure) a contribué à la mort du premier skieur, ainsi que probablement l'absence de premiers soins (respiration artificielle) jusqu'à l'arrivée des secours.

– Quoique très prudents, ces skieurs ont été touchés par un malheureux concours de circonstances, fatal pour l'un d'eux, qui suffit à mettre en lumière la mince frontière entre un incident bénin et un accident tragique. Prévoir, s'entraîner en conditions réelles à un sauvetage (chute en crevasse, avalanche...) n'est jamais inutile, permet d'acquérir des réflexes utiles, et de mettre en évidence d'éventuels problèmes (techniques, lacunes...).

3.3.5. Inexpérience ou fatalité ?

Au début du mois de mars, dans le cadre d'une classe d'hiver, dix écoliers de Lausanne accompagnés par deux étudiants et un professeur partent réaliser une petite excursion à skis en début d'après-midi à partir de l'hospice du Saint Bernard (2469 m.). Les conditions météorologiques ne sont pas bonnes : un épais brouillard a succédé à de faibles chutes de neige ventées (10 à 20 cm). Le vent du sud continue de souffler, parfois violemment et les températures sont élevées (+6 °C à 2000 m). Le bulletin nivo-météorologique annonce un risque fort d'avalanches. Le groupe scolaire suit la route du "mont d'Hiver" réputée sans risques, courte (guère plus de 30 minutes pour la faire), facile et à l'abri du vent; il s'agit d'une petite combe, juste au-dessus de l'hospice, en terrain faiblement incliné et peu accidenté, que le directeur leur a recommandée. Un premier groupe mené par l'un des prieurs de l'hospice les a précédés d'une demi-heure et la trace est donc tout faite. Au bout de 250 mètres, le deuxième groupe croise le premier qui est en train de redescendre. Quelques instants après, une avalanche part spontanément des flancs du petit mont Mort (2818 m), suit un vague couloir avant de se répandre sur le vaste replat au-dessus de la combe où cheminent les 13 skieurs. Elle parcourt une longueur supérieure à un kilomètre.

Un des étudiants, qui était serre-file, parvient aussitôt à se dégager, porte secours à son collègue enseveli à ses côtés et à une fillette dont les cris percent l'épais brouillard. Puis plus rien ne semble émerger de la masse gluante de neige. Il plante son bâton pour marquer le lieu de l'accident et descend à pied jusqu'à l'hospice. Le prieur a également entendu le bruit de l'avalanche, il en informe le père supérieur mais ne croit pas que le groupe a pu être enseveli tant la route lui semble être sûre. L'étudiant a dû se tromper, il ne doit s'agir que d'une coulée des flancs de la combe et l'étudiant a dû par la suite perdre le contact avec les autres participants à cause du manque de visibilité...

Une quarantaine de minutes après l'accident, le prieur incrédule accompagné du père supérieur, d'un collègue et d'un chien d'avalanche arrivent au bâton laissé par l'étudiant. C'est seulement à ce moment-là, en retrouvant le deuxième étudiant et la fillette, qu'ils réalisent l'ampleur de l'avalanche. Le chien localise aussitôt quelques victimes, qu'ils dégagent sans pourtant pouvoir leur prodiguer les premiers soins (ils n'avaient pas de formation de secouriste). Une heure après l'accident, les secours en montagne sont alertés, mais les conditions météorologiques (vent, neige, brouillard) empêchent l'hélicoptère d'atteindre les lieux du drame; dès lors, les secouristes tentent sans succès de monter en chenillettes depuis la vallée dans des conditions particulièrement difficiles et périlleuses. Entre temps, les personnes sur place sont arrivées avec le chien et à l'aide des sondes à retrouver tout le monde : on comptera 7 morts [1].

Face à un tel drame, quelques remarques sont à faire :

– le groupe a été surpris au cours d'une petite excursion par une avalanche exceptionnelle. De mémoire d'homme, aucune trace d'avalanche n'a été vue dans la combe que les prêtres tiennent pour particulièrement sûre, ce qui explique l'incrédulité du prieur. Mais le danger zéro n'existe pas en montagne et des avalanches exceptionnelles peuvent toucher de manière surprenante une zone que l'on pense à l'abri, tout autant qu'une petite coulée suffit à tuer... Dans les conditions nivo-météorologiques exécrables qui régnaient alors sur le Valais et le danger clairement annoncé dans le bulletin, le risque a été totalement sous-estimé;

– l'inexpérience du professeur, l'absence de matériels (ni ARVA, ni pelle, ni radio) sont des facteurs qui ont conduit au drame. Pourquoi avoir organisé cette petite sortie dans de telles conditions (brouillard, neige...) ?

3.3.6. Deux avalanches consécutives

Au début du mois de février, deux jeunes skieurs âgés de 16 ans, font du ski hors-pistes hors du domaine sécurisé de Rosswald (région du Simplon). Les deux jours précédents, le temps s'est rapidement détérioré avec le passage d'une dépression active du nord-ouest et depuis la veille, la neige tombe au-dessus de 600 m. Le cumul atteint déjà les 50 cm. Le bulletin nivo-météorologique du matin annonce un risque fort d'avalanches de neige au-dessus de 1 200 m, surtout près des crêtes et dans les versants ombragés et met en garde contre les accumulations de neige soufflée dans des pentes raides. En début d'après-midi, les deux skieurs qui connaissent fort bien la station, quittent les pistes vers 2 100 m pour attaquer une descente au milieu d'une forêt très clairsemée dans une combe orientée au nord-ouest.

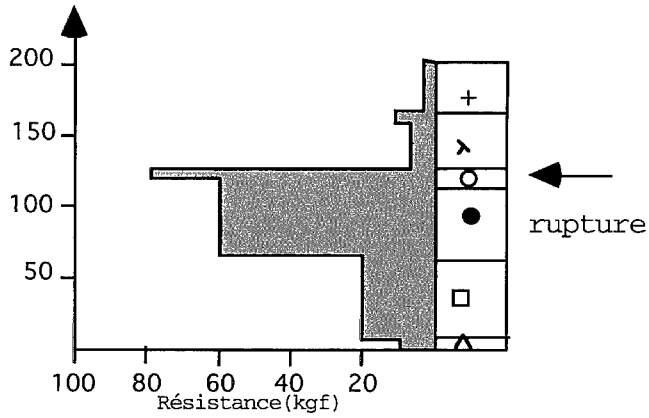
Dans le haut de la pente, l'un des skieurs déclenche une avalanche juste après une chute dans la neige profonde. Il est entraîné, mais par chance reste en surface. Aussitôt son camarade qui a assisté impuissant à l'accident, lui porte secours. Tous deux décident de remonter la combe empruntée par l'avalanche. Mais celle-ci en entraînant la neige en surface a mis à nu une vieille croûte de regel : dans la remontée, les deux adolescents glissent sur la surface verglacée et redescendent tout le couloir (d'inclinaison voisine de 30°). Le deuxième skieur, spectateur du précédent accident, se retrouve au-dessus du culot de la première avalanche. Paralysé, il appelle son camarade qu'il a vu continuer à glisser en contrebas, puis qu'il a perdu de vue à cause du brouillard. Aucune réponse. Il décide de monter une nouvelle fois la pente pour rejoindre les pistes de ski et prévenir au plus vite les secours. Il sort du couloir emprunté par l'avalanche, et avance péniblement dans la neige fraîche. Une cinquantaine de mètres au-dessus, il déclenche une toute petite plaque qui l'emporte sur 20 mètres. Il se libère assez facilement de la masse de neige, reprend sa marche et atteint les pistes. Il s'est écoulé une heure depuis le déclenchement de la première avalanche. Les secours sont déclenchés, mais le mauvais temps interdit l'emploi de l'hélicoptère.

L'accès direct du couloir par le haut ou par les côtés est jugé trop dangereux par les secouristes tant pour eux-mêmes que pour le blessé qu'il faut récupérer. Gênés par la nuit tombante et un brouillard épais, les sauveteurs descendent prudemment encordés par le haut. Toute la nuit et toute la matinée, ils cherchent, sondent, emmènent des chiens d'avalanche. Le blessé a probablement dû tenter de remonter et être emporté par une nouvelle avalanche, car un gros culot est perceptible. Vers midi le temps s'améliore et l'hélicoptère peut enfin décoller et faire une reconnaissance du site. Par ailleurs, des militaires sont appelés en renfort. C'est seulement en fin d'après-midi que le corps de l'adolescent est repéré sous deux mètres de neige par un sondeur. D'après les indices retrouvés, le skieur a dû être enseveli par une seconde avalanche au cours de sa remontée [1].

A propos de ce tragique accident, on peut faire plusieurs remarques.

– Le ski hors-pistes, ainsi que d'autres pratiques (surf, monoski), incite un grand nombre de personnes à sortir du domaine sécurisé des stations. La proximité (rassurante) des pistes, la méconnaissance du milieu montagnard, une confiance excessive dans sa technique, la recherche du plaisir, de la liberté mêlée à la fuite des contraintes (port de l'ARVA, consignes de sécurité...), la mode du "fun" sont autant de facteurs qui sont à l'origine des accidents dans le domaine hors-pistes des stations de ski. Bien des adeptes du hors-pistes, surtout dans la jeune génération, ignorent les règles élémentaires : s'informer (auprès du service des pistes, en lisant les panneaux d'information ou en téléphonant au kiosque de Météo-France), se méfier (combien pensent pouvoir surfer sur l'avalanche par imitation du *génie de la glisse* dans la trilogie Apocalypse Snow ?), etc. Quant au port d'ARVA, il est trop souvent négligé.

– Sans matériel spécifique, les jeunes gens se sont aventurés malgré une situation avalancheuse manifeste et annoncée, malgré le mauvais temps. Sans doute, le fait qu'ils connaissaient parfaitement la station, la joie de skier dans la profonde (première chute de neige depuis plusieurs semaines), la proximité des pistes leur ont fait sous-estimer le risque d'avalanches. Le bilan est le résultat d'une succession de circonstances défavorables. Il montre une fois de plus que les opérations de secours extérieurs arrivent malheureusement souvent trop tard, même lorsque les secouristes sont situés à proximité.



➟ Figure 9.
Profil simplifié de Rosswald. Le décrochement a affecté la neige fraîche dans son intégralité (épaisseur supérieure 70 cm), le glissement se faisant sur la croûte de regel [1].

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] IFENA : *Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen*, Rapport (1988-93, IFENA, n° 52-56).
[2] J. COUDRAY : *La glisse... Plaisir et sécurité*, Neige et Avalanches **59** (1992) 17-20.
[3] B. JAMIESON : *Snow slab layers and stability : a summary of some recent research and experience*, The Avalanche Review **12** (1994) 1-2.
[4] S. C. COLBECK : *The layer of snow cover*, Review of Geophysics **29** (1991) 81-96.
[5] A. DUCLOS : *Avalanches accidentelles : plaques ou poudre ?*, Neige et Avalanches **68** (1994) 2-6.
[6] A. DUCLOS : *Plaques à vent : nouvelles données*, Neige et Avalanche 72 (1995) 2-7.
[7] C. REY, communication personnelle (1994)

Chapitre 11
ASPECTS MÉDICAUX*

Les aspects médicaux liés à la pratique des activités en milieu neigeux relèvent le plus souvent d'accidents (chutes à skis, avalanches, chutes en crevasse). Dans cet environnement particulier, le froid, les effets de l'altitude, la fatigue et l'isolement tendent à aggraver le pronostic du traumatisme initial. Progresser à skis, à raquettes ou à pied en sécurité requiert des connaissances et une expérience renforcée par la pratique régulière. Etre en mesure de prévenir les accidents, d'apporter les premiers soins, de donner l'alerte nécessite une volonté d'acquérir :

- un bagage en secourisme, pour intervenir en cas d'accident notamment dans les secours en avalanche ;
- une pratique régulière des soins de traumatologie ;
- des notions de médecine courante pour utiliser efficacement une trousse médicale.

Ces connaissances doivent s'étendre à la pathologie du froid et aux moyens de prévenir gelures et hypothermies, à la pathologie provoquée par le rayonnement solaire et au traitement des brûlures de la peau et des yeux. Enfin, sans être expert en médecine sportive, il est utile de connaître quelques rudiments de physiologie de l'exercice en altitude et en milieu froid, de récupération après l'effort et de nutrition en montagne. Dans notre souci de rester pratique, le propos se limitera à des notions très simples visant le confort et la sécurité d'un groupe évoluant en milieu neigeux. Le lecteur désirant approfondir des connaissances sur certains sujets fera appel à des documents cités en référence.

1. LES GRANDS TRAUMATISMES

Hors des pistes balisées, la nature du terrain et la qualité de la neige peuvent surprendre les skieurs les plus expérimentés. Des accidents peuvent survenir dans des conditions d'accès extrêmement difficiles. Le pronostic de gravité des grands traumatismes n'est pas seulement dépendant de la nature de la lésion mais du délai d'intervention des secours, des modalités d'évacuation et des conditions climatiques. Aujourd'hui, la rapidité de l'alerte est primordiale. La première précaution lorsque l'on pratique le ski hors-piste est de se munir d'un poste de transmission portable, en liaison avec la station de ski la plus proche ou un organisme de secours en montagne.

Sur les lieux de l'accident, l'action du secouriste est prépondérante. Elle doit être parfaitement réglée dans le temps. Elle comprend les phases suivantes :

- *évaluer* le danger immédiat et y soustraire l'accidenté (chute de pierres, coulées neigeuses etc.) ;
- *examiner* l'accidenté :
  . est-il conscient ? (le blessé répond aux questions),
  . peut-il bouger ? (paralysie),
  . respire-t-il normalement ? (traumatisme du thorax),
  . les pulsations sont-elles perçues ? (pouls radial, carotidien),
  . quelles sont les lésions évidentes ?
  . le blessé est-il en train de s'affaiblir ?

* Ce chapitre a été écrit par Jean-Pierre HERRY, médecin à l'École Nationale de Ski et d'Alpinisme, médecin de la Fédération Française de la Montagne et de l'Escalade.

– *les gestes d'urgence* sont fonction de l'état du blessé (état de choc, inconscience, hémorragie, etc.) ;
– *l'alerte* : prévenir les secours, les informer du lieu de l'accident et de l'état du blessé. Le contenu de l'alerte doit être précis afin de renseigner au mieux les responsables du secours. En effet, le message détermine le choix des moyens mis en jeu pour évacuer le blessé ;
– *la surveillance* du blessé dans l'attente des secours.

Les grands traumatismes rencontrés en montagne, nécessitant des gestes d'urgence, sont heureusement assez rares. Aussi est-il nécessaire que les pratiquants du ski hors-piste soient régulièrement entraînés aux techniques de secours. Seules les équipes de secours accompagnées d'un médecin sont en mesure de donner des soins d'urgence et de conditionner le blessé pendant le transport.

1.1. La défaillance cardio-circulatoire (les états de choc)

C'est l'aboutissement de tous les traumatismes graves isolés ou de polytraumatisés mais également une des complications des brûlures, de l'insolation ou d'une défaillance cardiaque.

1.1.1. Quels sont les signes extérieurs de l'état de choc ?

• Lors de l'apparition des premiers signes, le blessé est pâle, anxieux, agité, ou anormalement somnolent. Le pouls rapide, reste souvent bien perceptible, le sujet réclame à boire.

• A la phase du choc confirmé, ces signes vont s'exagérer :
– le pouls sera plus rapide, difficile à prendre, parfois irrégulier ;
– les mains, le nez seront anormalement froids ;
– le sujet aura le visage pâle, les lèvres cyanosées (violacées) ;
– la respiration sera rapide et superficielle, il y aura perte de conscience et coma.

En montagne, le froid est un élément aggravant. La survenue du choc peut être trompeuse :
– parfois, elle n'est pas proportionnelle à la gravité de l'accident ;
– parfois, il y a un intervalle de temps entre l'accident et la survenue du choc.

On peut d'autant plus facilement lutter contre le choc que l'on en a décelé plus tôt les signes. C'est dire toute l'importance de la surveillance d'un blessé :
– prendre son pouls fréquemment ;
– surveiller son visage, son aspect, son état de conscience ;
– protéger du froid, en isolant le blessé de la neige, en le protégeant du vent.

1.1.2. Les précautions

En attendant l'arrivée des secours, les moyens de lutter contre l'aggravation de l'état de choc sont limités :
– allonger le blessé, tête basse et membres inférieurs surélevés pour améliorer la circulation cérébrale ;
– l'isoler de la neige, le protéger du vent et du froid par des vêtements ;
– le calmer, c'est-à-dire d'abord le rassurer et rester près de lui ;
– immobiliser éventuellement les lésions des membres ;
– ne pas donner d'alcool, de drogues ou d'antalgiques ;
– faciliter le cas échéant, la respiration du blessé, desserrer ses vêtements, lui mettre la tête en légère extension ;
– surtout l'évacuer le plus rapidement possible.

1.2. Les traumatismes crâniens

En dehors des simples plaies du cuir chevelu, tout traumatisme crânien doit être l'objet d'une surveillance attentive :

– les pertes de connaissance passagères nécessitent un examen médical approfondi et une surveillance pendant les 72 heures qui suivent l'accident ;
– les pertes de connaissance prolongées ou coma imposent un geste qui peut sauver la vie du blessé : la position latérale de sécurité.

La position latérale de sécurité (PLS) consiste à :
– niveler et placer une épaisseur importante de vêtements sur la neige où sera placé le blessé,
– allonger le sujet sur le côté ;
– fléchir le genou qui n'est pas contre le sol ;
– étendre les deux bras en avant ;
– basculer doucement la tête en arrière, bouche ouverte et tournée vers le sol ;
– recouvrir le blessé de vêtements.

En outre, devant un blessé dans le coma, il faut redouter des troubles respiratoires :
– par défaillance des réflexes de sécurité, ce qui conduit à l'encombrement des voies aériennes ;
– par obstruction des voies respiratoires avec chute de la langue en arrière ;
– par la survenue de vomissements obstruant la trachée.

Le secouriste exercera une surveillance attentive car des complications peuvent survenir :
• *Arrêt respiratoire :*
– assurer la liberté des voies aériennes supérieures,
– bouche à bouche ;
• *Arrêt cardiaque :* massage cardiaque externe.

2. Les lésions traumatiques

Contrairement aux accidents sur piste pour lesquels la vitesse excessive est associée à une technique rudimentaire, les accidents en ski hors piste ont des causes différentes : fatigue, sac à dos trop lourd, neige "dangereuse". La chute ou le dévissage en pente forte est suivi d'un arrêt sur des obstacles naturels (arbres, rochers) ou entraîne des torsions de membres, semblables aux accidents de ski sur piste. L'évolution du matériel de ski de randonnée, comparable en bien des points à celui du ski de descente, a permis de protéger certaines articulations (cheville) tout en exposant exagérément d'autres (genou, épaule). Dans le souci d'éviter des chutes dans des passages dangereux, le skieur de montagne augmente le seuil de déclenchement des fixations de sécurité au-delà des normes ISO au risque d'une perte d'efficacité dans les chutes à faible vitesse. Retenons des chiffres éloquents des accidents en ski de piste :
• 4 accident de ski sur 10 sont une entorse du genou ;
• un accident de ski sur 10 est une entorse grave du genou.

2.1. Les traumatismes ouverts

2.1.1. Les plaies

Certaines glissades peuvent entraîner l'abrasion d'une surface étendue de la peau (en ski de printemps et d'été). Si, de plus, les chairs sont à vif, le blessé sera considéré comme un brûlé du 3° degré. Dans ce cas :
– s'abstenir de désinfecter ;
– en présence de corps étranger (terre, gravier), rinçage avec du sérum physiologique (ou un collyre simple) ;
– recouvrir la plaie de tulle gras, puis d'un pansement.

Une plaie profonde par coup de carre ou par tout objet tranchant sera provisoirement fermée avec des bandes adhésives stériles ou suturée avec du fil à

peau. La plaie est ensuite recouverte d'un pansement aussi propre que possible et légèrement imprégné d'antiseptique. D'une façon générale, il faut toujours se méfier des plaies au voisinage d'une articulation, aussi minimes soient-elles. On risque une infection de l'articulation avec des conséquences graves.

2.1.2. Les hémorragies

Les hémorragies par section de veines ou de capillaires sanguins sont traitées par un pansement compressif large sur la plaie. Ce type de pansement suffit lorsqu'il s'agit d'une plaie artérielle aux extrémités des membres : avant-bras et mains, jambes et pieds. L'hémorragie artérielle extériorisée est matérialisée par l'écoulement en saccades de sang rouge vif. Il faut alors agir rapidement par un point de compression en exerçant une forte pression entre la plaie et le cœur.

2.1.2.1. Quels sont les différents points de compression ?

• *Pour le membre inférieur :* on perçoit l'artère fémorale qui bat au milieu du pli de l'aine. On appuie alors avec le pouce ou le poing.

• *Pour le membre supérieur :* les battements de l'artère sous-claviaire sous la clavicule ne sont pas perceptibles. On la comprime avec les doigts placés en crochet en arrière de la clavicule.

• *Pour une plaie de la carotide :* appuyer avec le pouce au-dessous de la plaie.

Un point de compression peut s'avérer insuffisant pour supprimer une hémorragie importante. Le garrot artériel sera le seul moyen pour arrêter l'effusion de sang. Il reste un moyen d'exception lorsque la vie du blessé l'exige : une amputation accidentelle d'un membre, ou une plaie d'une grosse artère alors que l'on est loin de tout secours et démuni. Ne pas oublier d'indiquer l'heure à laquelle a été placé le garrot.

2.1.3. Les fractures ouvertes

Elles associent une fracture et une plaie à proximité de la fracture. L'os fracturé est entré en contact avec la peau, les vêtements et l'air extérieur. Il y a donc toujours une infection profonde. Il s'y ajoute une hémorragie d'origine osseuse et musculaire. Avant toute manœuvre d'immobilisation, il faut protéger la plaie d'un pansement le plus stérile possible. En cas d'évacuation retardée, l'infection sera prévenue par l'absorption immédiate, par voie orale, d'antibiotiques.

2.2. Les traumatismes fermés

Ils sont musculaires (contusions), articulaires (entorses, luxations) ou osseux (fractures).

2.2.1. Les contusions

A la suite d'un choc, il peut se produire une simple ecchymose (un bleu) ou un hématome, poche de sang située sous la peau ou dans les muscles. L'hématome dans le muscle entraîne une impotence plus ou moins importante du membre, qui n'est pas toujours douloureuse au début. La conduite à tenir peut être équivoque, il est recommandé l'immobilisation du membre blessé, imposant le repos. Dans le cas du ski de randonnée, l'arrêt sur place est impossible, sauf cas de force majeure. Il faut donc se déplacer avec prudence, éviter tous les gestes brusques jusqu'au lieu de sécurité. Après une période de repos, l'activité sera toujours beaucoup plus douloureuse.

2.2.2. Les entorses

2.2.2.1. Définition et mécanisme

A la suite d'un choc, deux surfaces articulaires en présence sont écartées l'une de l'autre, mais reviennent à leur position normale. C'est l'entorse : il s'est

produit une déchirure ou une rupture de ligaments, voire même une rupture de la capsule articulaire.

2.2.2.2. Localisation

Les entorses peuvent affecter :
- le genou : c'est souvent la plus grave (le ligament latéral interne, le ligament croisé antérieur) ;
- le pouce : entorse métacarpo-phalangienne du pouce après une chute sur la main ;
- la cheville : de plus en plus rare en ski de montagne (la chaussure protège la cheville), mais fréquente à pied ou à raquettes.

2.2.2.3. Les signes

La douleur est immédiate, plus ou moins intense. Elle est réveillée par la mobilisation de l'articulation, par le toucher du ligament atteint. Après quelques heures, gonflement et ecchymose s'installent en regard de l'entorse.

2.2.2.4. Conduite à tenir

L'impotence fonctionnelle n'est pas complète et autorise une descente prudente à skis. Le risque est une nouvelle chute qui aggravera considérablement la lésion. Tout doit être mis en œuvre pour faciliter la descente du blessé (alléger le sac, damer la neige, aménager les passages difficiles à skier).

2.2.2.5. Cas spécifique des entorses du genou

C'est de loin la localisation la plus fréquente du membre inférieur. Aucune entorse du genou n'est anodine et toutes justifient l'évacuation du blessé par le service des pistes. Dans des zones d'accès faciles, une prise en charge par les équipes de secours est possible. A la suite d'une chute ou d'un geste non contrôlé, le skieur ressent une douleur vive dans le genou, ou sur sa face interne. Parfois un bruit (ressemblant à un claquement) est perçu. L'impotence qui suit est très variable. Il est difficile de juger sur place de la gravité de l'entorse :

Entorse bénigne	Entorse grave
douleur continue sur la face interne	douleur aiguë et diffuse cédant rapidement
extension du genou douloureuse	sensation d'instabilité au relâchement
mouvement de rotation externe douloureux	apparition rapide d'un épanchement

Par prudence, il est conseillé d'immobiliser toutes les entorses du genou. En absence de secours à proximité, une descente à skis sera organisée en veillant à ce que toutes les conditions soient réunies pour éviter une nouvelle chute du blessé. Une consultation médicale permettra d'apprécier la gravité de l'entorse et l'absence de fracture.

2.2.3. Les luxations

2.2.3.1. Définition et mécanisme

A la suite d'un choc, deux surfaces articulaires sont écartées l'une de l'autre et ne reviennent pas dans leur position normale. C'est une luxation. A cela s'ajoute une déchirure ou une rupture des ligaments et de la capsule articulaire. En dehors de l'épaule, les autres articulations (hanche, coude, articulation acromio-claviculaire...) se luxent rarement. La luxation (antéro-externe) de l'épaule, provoquée par une chute à skis, est la plus fréquente des luxations. Elle est particulièrement douloureuse et invalidante. Ce qui explique que les professionnels et les secouristes de la montagne des pays étrangers reçoivent une instruction de gestes

de réduction de luxation. Les gestes enseignés se limitent à une traction douce et non douloureuse. La luxation réduite supprime la douleur et donne au blessé les moyens de se déplacer, gage de sécurité pour tout le groupe.

2.2.3.2. Les signes

Les signes d'une luxation sont :
- douleur immédiate violente ;
- impotence fonctionnelle : le blessé soutient son avant-bras, le coude loin du corps ;
- abaissement et raccourcissement de l'épaule luxée ;
- impossibilité de ramener le coude au corps.

2.2.3.3. Conduite à tenir

Les complications sont relativement peu fréquentes : atteinte nerveuse (contusion), fracture du trochiter. Un examen médical avec radiographie est absolument nécessaire pour les éliminer. Il faut immobiliser l'articulation dans la position la moins douloureuse. Le coude est maintenu loin du buste par un sac à dos placé sous l'aisselle en position horizontale, une bretelle autour du cou, l'autre autour du buste. En dehors de certaines luxations récidivantes, aucune luxation ne doit être réduite sur place (pour des raisons médicales et légales). Ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles d'isolement, avec impossibilité d'évacuation du blessé dans les 4 à 6 heures qui suivent l'accident, qu'une réduction pourra être tentée.

2.2.4. Les fractures

• Il faut être capable de reconnaître une fracture :
- douleur vive au niveau de l'os atteint ;
- impotence fonctionnelle ;
- parfois déformation du membre atteint (rotation, angulation ou gonflement anormal).

• Il faut rechercher les complications :
- fracture ouverte nécessitant une désinfection avant l'immobilisation et des antibiotiques donnés par voie orale ;
- hémorragie qui sera traitée ;
- compression nerveuse ou vasculaire par l'un des fragments osseux (c'est toujours difficile à apprécier).

• Il faut rechercher toujours les lésions associées (examen rapide et systématique de toutes les parties du corps). Il existe des fractures sans déformation souvent à proximité des articulations. La douleur est vive au niveau de l'os atteint, augmentée par le toucher et non calmée par le repos. L'impotence fonctionnelle évoque la fracture. Il existe des fractures avec déformation (rotation ou angulation). Lorsqu'elle est importante, il est justifié de pratiquer un alignement, pour retrouver une forme normale du segment fracturé. Cet alignement se fera sous traction avec prudence.

• L'immobilisation a pour objet d'empêcher les déplacements au niveau du siège de la fracture et de calmer la douleur. Le soulagement du blessé surviendra dans les minutes qui suivent une immobilisation correcte, évitant le recours à des médications analgésiques. Pour réaliser l'immobilisation, qui doit englober les articulations de part et d'autre de la fracture, on peut avoir recourt :
- soit à du matériel spécialisé : attelle souple de type Sam-Split® (commercialisée en France sous le nom d'Imoflex®) ou mieux des bandes de résine ;
- soit à du matériel de fortune : bâtons, skis, piolets pour la jambe, écharpe pour le membre supérieur.

Signalons un cas particulier important : la fracture de la colonne vertébrale. Toute douleur, même minime, à ce niveau doit faire penser à une fracture. Il faut particulièrement se méfier de la colonne cervicale pour laquelle une mobilisation, notamment en flexion avant peut être fatale. Un collier cervical de fortune (Sam-Split®) facilite les déplacements du blessé et sécurise le sauveteur. Les fractures de la colonne dorsale ou lombaire sont le plus souvent provoquées par des chutes d'un point élevé, le poids de la tête entraînant une flexion exagérée du tronc en avant. Le blessé est donc étendu sur le sol. Il faut bien lui faire préciser le siège de la douleur, rechercher une éventuelle paralysie des bras et des jambes (garde-t-il la sensibilité, peut-il bouger ?). La paralysie est un signe majeur de gravité par les conséquences immédiates (état de choc, hypothermie) et secondaires (handicap). Le pronostic est fonction de la rapidité d'intervention des secours et du transport de la victime vers un centre hospitalier. Dans l'attente, le blessé sera isolé du sol sur un plan dur recouvert d'une épaisse couche de vêtements. Pour le relevage, la méthode du pont amélioré, nécessitant la présence de 5 personnes sera choisie en priorité. Le secouriste responsable, placé à la tête du blessé, veille à maintenir alignés la tête, le cou et le tronc. La mise en traction est interdite car dangereuse.

3. Les victimes d'avalanche

80 % des décès provoqués par les avalanches ont comme cause l'asphyxie, 10 à 15 % les traumatismes et seulement 5 % l'hypothermie. Affirmer la mort par traumatisme (ou polytraumatisme) est le plus souvent évident. A l'inverse, il est nécessaire de déterminer ce qui, de l'hypothermie ou de l'asphyxie est à l'origine d'un état de mort apparente car la mise en œuvre du protocole d'urgence est différente. La présence d'un médecin entraîné à la réanimation en situation d'avalanche est indispensable. Au même titre qu'un maître-chien et son chien d'avalanche, le médecin doit être déposé en priorité sur les lieux de l'accident.

3.1. Généralités

Les victimes dégagées des avalanches présentent des lésions extrêmement variées, mais on retrouve toujours trois facteurs plus ou moins associés :

- l'asphyxie :
  - par obstruction : bouchon de neige dans les voies aériennes supérieures,
  - par écrasement du thorax sous le poids de la neige,
  - par lésions pulmonaires provoquées par le souffle de l'avalanche,
  - par noyade avec pénétration de neige poudreuse dans les alvéoles pulmonaires ;
- l'hypothermie majorée par l'infiltration de neige poudreuse sous les vêtements et par l'humidité qui en résulte ;
- les lésions traumatiques provoquées par la présence de blocs rocheux ou d'arbres.

La (ou les) victime(s) ayant été retrouvée(s) et dégagée(s), 3 situations par ordre de gravité croissante peuvent se rencontrer. On les détaille dans les sections suivantes.

3.2. Victime vivante et consciente

Un rapide interrogatoire et examen ayant confirmé l'absence de lésions majeures, la victime sera mise à l'abri de tous dangers objectifs et réchauffée. Le réchauffement peut être rapide par une exposition au soleil, une friction de la peau, l'échange de vêtements humides contre des vêtements secs, l'absorption de boissons chaudes, voire la pratique d'une activité physique.

3.3. Victime présentant des troubles de la conscience

Les trois principales causes doivent être évoquées :
- asphyxie, caractérisée par une cyanose et des troubles ventilatoires ;
- hypothermie, caractérisée par une pâleur, des frissons, un état de torpeur ou d'agitation ;
- traumatisme, crânien ou état de choc.

Dans la plupart des cas, l'état de la victime doit rapidement s'améliorer grâce à la mise en route immédiate d'une réanimation adaptée.

Pour traiter un début d'asphyxie, il faut :
- libérer les voies aériennes supérieures ;
- dégager le thorax puis l'abdomen du poids de la neige ;
- favoriser les mouvements respiratoires en ouvrant les vêtements et en plaçant la victime en position semi-assise (si l'état de conscience le permet) ;
- éviter le refroidissement en préconisant les moyens de réchauffement externe, pochettes chauffantes appliquées sur le thorax, gourdes d'eau tiède à la racine des membres.

Dans les cas de traumatisme :
- *crânien, avec trouble de la vigilance :* placer la victime en PLS après l'avoir isolée du froid ;
- *état de choc :* lutter contre la douleur en immobilisant les fractures. Supprimer les saignements en traitant les plaies.

Dans tous ces cas, on doit envisager une médicalisation des secours, un retour rapide en plaine avec une hospitalisation de la victime.

3.4. Victime en état de mort apparente ; conduite à tenir par les secouristes ou les témoins

3.4.1. Définitions

Un rapide bilan fait état d'une absence de conscience, et de pouls perceptible, d'une disparition de la respiration spontanée. Les trois grandes causes sont immédiatement envisagées et traitées :
- *l'asphyxie* se caractérise par :
  - présence de neige sur le visage et dans la bouche,
  - cyanose des extrémités.

Le dégagement des voies aériennes supérieures précède la réanimation par bouche à bouche et massage cardiaque. La reprise spontanée des fonctions vitales ne doit pas autoriser un relâchement de la surveillance de la victime qui sera évacuée le plus rapidement possible dans un centre de secours. La persistance d'une mydriase bilatérale, l'absence de pouls carotidien et de mouvements respiratoires spontanés autorisent, en l'absence d'un médecin, l'arrêt de la réanimation ;
- *l'hypothermie* majeure se caractérise par :
  - la pâleur marbrée des extrémités,
  - l'hypertonie des membres et la raideur articulaire,
  - la disparition apparente des fonctions vitales.

Un examen attentif permet de retrouve une certaine chaleur du front et de l'abdomen. Seule une évacuation rapide médicalisée vers un centre hospitalier laisse espérer une chance de survie. L'alerte sera donnée rapidement, accompagnée d'un message clair sur l'âge et l'état du blessé. Dans l'attente des secours, il faut protéger la victime contre le froid et l'humidité, en l'isolant de la neige et en favorisant un réchauffement par le rayonnement solaire. Le réchauffement rapide dans un environnement chaud est très dangereux. Le déplacement de la victime ne se fera qu'avec douceur et prudence, dans une position proche de la position initiale ;

– les traumatismes graves, souvent multiples, évoquent dans ce cas de situation, une mort brutale souvent irréversible. Seule une assistance médicalisée permettrait une petite chance de survie, ce qui ne doit pas supprimer toute tentative de réanimation.

☞ En résumé, les premiers secours des victimes ensevelies par avalanche dans le cadre du ski de montagne ou hors-piste réclament beaucoup de bon sens et sang-froid. Malgré les conditions d'isolement, il faut juger avec discernement les possibilités d'assistance par des secours extérieurs et préparer un message précis, complet sur l'état des victimes.

3.4.2. Victime en état de mort apparente : conduite suivie par le médecin du secours sur les lieux de l'avalanche

Le médecin rapidement dépêché sur les lieux dispose de moyens d'investigations qui dicteront le choix de la réanimation à mettre en œuvre (électrocardiographe d'urgence, thermomètre tympanique et œsophagien). Pendant les secours, il est primordial de s'assurer de l'existence d'une poche d'air en regard du visage. Plusieurs situations peuvent être définies :

• la température centrale est supérieure ou égale à 32 °C ou la durée de l'ensevelissement est inférieure ou égale à 45 minutes : l'arrêt cardiaque est secondaire à une asphyxie. Seuls les résultats d'une réanimation immédiatement entreprise guident la conduite à tenir :

– ventilation et activité cardiaque spontanée, évacuation vers un centre hospitalier,

– absence de réaction ventilatoire et cardiaque au-delà de 20 minutes, arrêt de la réanimation et décès constaté ;

• la température est inférieure à 32 °C ou la durée de l'ensevelissement est supérieure à 45 minutes : l'arrêt cardiaque peut être secondaire à une asphyxie ou à une hypothermie. L'existence ou non d'une poche d'air en regard de la bouche et du nez est capitale. Il est indispensable que le médecin se renseigne directement auprès du sauveteur qui a dégagé la victime. La présence d'une poche d'air évoque une hypothermie majeure, nécessitant la poursuite de la réanimation et l'admission dans un hôpital muni d'une *circulation extra-corporelle* (CEC). L'absence de poche d'air et l'obstruction de la bouche et du nez par un bouchon de neige évoquent un arrêt cardiaque par asphyxie dans les suites immédiates de l'avalanche. La mort peut être prononcée par le médecin. L'incertitude d'une poche d'air incite secouristes et médecins à poursuivre la réanimation et à admettre la victime dans un centre hospitalier disposant d'une installation de CEC. Le dosage du potassium sanguin guidera les médecins dans le pronostic vital de la victime.

4. Les victimes de chute en crevasse

La chute en crevasse est un accident dont les conséquences peuvent présenter toutes les lésions évoquées ci-dessus :

– *traumatisme*, notamment par l'arrêt de la chute sur une arête en glace ;

– *asphyxie* par le recouvrement de la neige à la suite de la rupture de la lèvre ou de la corniche ;

– *hypothermie d'installation rapide* sur un blessé immobilisé en contact avec la neige ou la glace ;

– *hypothermie d'installation lente*, si l'accidenté valide ne peut s'extraire seul de la crevasse.

A ces lésions, il faut ajouter les conséquences d'un cuissard ou d'un baudrier mal ajusté ou trop étroit sur la circulation sanguine des membres inférieurs.

Plusieurs cas de malaises graves survenus dans un délai bref (3 à 30 minutes) ont été rapportés en spéléologie sur des sujets suspendus dans un baudrier. En laboratoire, ces mêmes malaises ont été reproduits, ils débutent par une perception de fourmillements dans les membres inférieurs. Au-delà d'un certain temps le sujet ne peut plus se mouvoir dans son baudrier. Survient alors une sensation de malaise général avec sueurs, nausées, vertiges, sensation d'oppression thoracique puis syncope. L'explication la plus couramment admise fait état d'une striction du cuissard, qui en gênant le retour veineux, diminue le remplissage du cœur. Une simple ceinture d'encordement ou un harnais inconfortable augmente les risques de malaise, d'état de fatigue et surtout de traumatisme crânien survenu pendant la chute. Si la victime ne peut pas être secourue rapidement, allongée et débarrassée de son cuissard, les perturbations circulatoires auront des conséquences immédiates sur l'oxygénation cérébrale, pouvant être la cause d'un décès. Il est donc prudent de toujours anticiper la chute en crevasse par un encordement spécifique à la progression sur glacier. Il est indispensable de disposer du savoir-faire et du matériel pour mettre en œuvre rapidement le mouflage adéquat pour extraire l'accidenté de la crevasse.

5. La pathologie liée au froid

5.1. Généralités

L'homme est un homéotherme, c'est-à-dire qu'il doit maintenir sa température centrale dans d'étroites limites autour de 37 °C. Ce maintien résulte d'un équilibre entre la chaleur produite par les processus vitaux et celle perdue dans l'environnement proche. Les échanges thermiques entre le corps et le milieu froid font intervenir 4 paramètres.

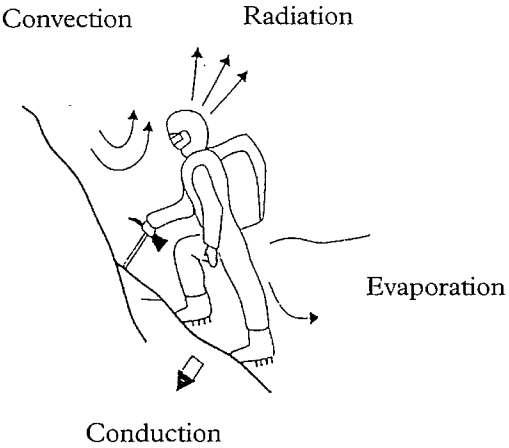


Figure 1 :
transferts de chaleur.

① Transfert par conduction : c'est le transfert de chaleur qui se produit quand le corps est en contact avec un solide. Le flux de chaleur est proportionnel à la surface en contact, à la différence de température entre la peau et l'objet et à la conductivité thermique de ce dernier. En ambiance froide, les pertes de chaleur par conduction sont faibles pour un sujet debout. A l'inverse, c'est la première cause de refroidissement pour toute personne allongée sur la neige, blessée, épuisée ou simplement au cours des bivouacs.

② Transfert par convection : la convection est le transfert de chaleur entre la peau (ou la surface des vêtements) et l'air qui l'entoure avec déplacement relatif de l'une par rapport à l'autre.

③ Transfert par radiation : plusieurs paramètres interviennent (la surface du corps, la nature et la couleur des vêtements, l'ensoleillement et la réflexion du rayonnement sur la neige). Pour l'homme exposé à une ambiance extérieure froide, ces échanges sont très variables en fonction des situations. Schématiquement on peut considérer trois types d'exposition :

- par temps ensoleillé sur une surface couverte de neige ou de glace, le corps humain est soumis au rayonnement solaire direct, au rayonnement réfléchi par la glace et la neige et à celui émis par la neige et les rochers. Il reçoit donc une charge thermique importante qui s'ajoute à sa propre production de chaleur ;
- par temps couvert et brumeux, les nuages et la brume absorbent une grande partie du rayonnement solaire et le sol n'en reçoit qu'une partie. Le rayonnement solaire s'équilibre avec celui émis par le corps humain ;
- par nuit claire, le corps rayonne mais ne reçoit presque rien. Il peut donc perdre par cette voie une quantité non négligeable de chaleur. On limite le rayonnement émis par le corps en réduisant les surfaces découvertes (port de bonnet et de gants) et en choisissant des vêtements clairs réfléchissant le rayonnement.

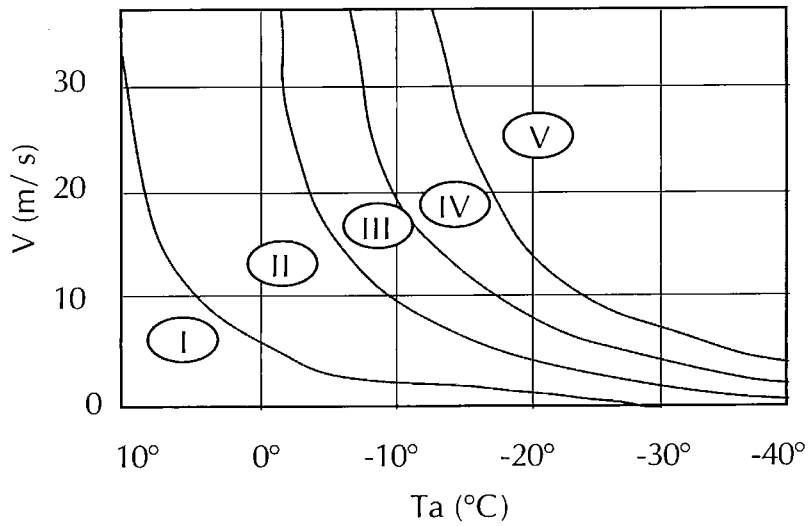


Figure 2 : index Windchill. D'après [5]. Sensation de froid en fonction de la température de l'air (Ta) et de la vitesse du vent (V).

Index Windchill :

I	Confort avec les précautions normales.
II	Très froid, les déplacements deviennent inconfortables par temps couvert.
III	Froid mordant, les déplacements deviennent inconfortables, même par temps clair et ensoleillé.
IV	Des gelures commencent à s'observer, selon le degré d'activité, l'intensité du rayonnement solaire, la circulation sanguine et les caractéristiques de la peau. Les déplacements et la vie dans des abris temporaires deviennent désagréables.
V	Des efforts sont nécessaires pour survivre. Les régions du corps exposées gèlent en moins d'une minute.

④ Transferts par évaporation : ils sont surtout importants en ambiance chaude, puisque chaque gramme d'eau qui s'évapore prélève 140 joules sur la surface de l'objet. En ambiance froide, un sujet peut transpirer abondamment s'il exé-

cute un travail intense et s'il porte des vêtements chauds et imperméables. La sueur en altérant le pouvoir isolant des vêtements est à l'origine d'un refroidissement à l'arrêt de l'activité. Il est donc toujours souhaitable d'éviter de transpirer :

– en régulant l'intensité de son effort à la limite de la sudation ;
– en se dévêtant pendant l'exercice ;
– en choisissant des vêtements dont le tissu favorise l'évaporation de la sueur.

Chaque type d'échange thermique est variable selon les conditions climatiques. Il reste utile de les connaître afin de mieux se protéger, notamment contre le froid.

5.2. Réactions thermorégulatrices de l'organisme exposé au froid

Plusieurs types de réactions permettent à l'homme de lutter contre le froid :

– les réactions métaboliques augmentent la production de chaleur (thermogenèse) ;
– l'accroissement de ces réactions est presque en totalité d'origine musculaire, qu'il s'agisse d'une activité physique volontaire, l'exercice, ou involontaire, le frisson thermique.

L'activité physique volontaire peut avoir tous les degrés d'intensité entre le travail maximal intermittent et celui modéré mais prolongé (ski de randonnée ou marche). 75 à 80 % de l'énergie utilisée pour un exercice est dissipée sous forme de chaleur. Compte tenu de la protection thermique apportée par les vêtements, la production de chaleur produite par l'exercice physique est suffisante pour compenser la déperdition thermique dans un environnement très froid. Lorsque l'organisme est au repos, le seul moyen à sa disposition pour augmenter sa thermogenèse est le frisson thermique. Selon son intensité, il peut affecter presque toutes les masses musculaires. Lorsque le refroidissement est rapide, l'apparition du frisson est très rapide et son augmentation très intense, sans relation avec le refroidissement du corps. L'apport calorique est modéré, deux à trois fois moins que l'activité physique. Un frissonnement généralisé ne peut pas se maintenir au-delà d'une à deux heures avant l'apparition de crampes très douloureuses. Le frisson thermique est donc un moyen relativement limité de lutte contre le froid, certains facteurs pouvant supprimer l'apparition de frissons :

– l'épuisement ;
– les grands traumatismes (douleur, hémorragie, perte de connaissance, etc.) ;
– certains médicaments (barbituriques, antipyrétiques, etc.).

Il faut également dire un mot sur les réactions physiques de type 'isolant'réduisant la thermolyse. Ces réactions tendent non plus à augmenter la production de chaleur, mais à en diminuer les pertes. Elles font intervenir des mécanismes de régulation de la circulation périphérique. Exposée au froid, la peau sera moins irriguée et donc moins conductrice de chaleur. Son pouvoir isolant sera donc augmenté. C'est le phénomène de *vasoconstriction périphérique*, qui n'apparaît pas quand l'organisme est sous l'effet de médicaments (vasodilatateurs) ou de boissons alcoolisées. Chez l'homme, la tolérance au froid est limitée et l'acclimatation au froid est incertaine. La personne blessée ou épuisée est tout particulièrement exposée au refroidissement, la principale cause étant la position allongée au contact de la neige alors que ses propres défenses sont limitées. Le froid provoque des lésions locales (généralement aux extrémités), ce sont les *gelures* ou un refroidissement généralisé, c'est l'*hypothermie*.

5.3. Les gelures

La gelure était l'accident typique des pratiquants de la haute montagne notamment pendant les grandes courses hivernales. Près de 20 % des blessés de la montagne transportés à l'hôpital de Chamonix présentaient des gelures plus ou

moins graves. Aujourd'hui la fréquence des gelures dans les massifs alpins tend à diminuer pour plusieurs raisons :

- les progrès de matériaux utilisés pour se protéger du froid et de l'humidité ;
- l'utilisation de chaussons de feutrine ou en alvéolite doublés d'une coque plastique étanche ;
- la rapidité des courses qui exclut souvent des bivouacs glacials ;
- la fiabilité des prévisions météorologiques ;
- enfin l'utilisation récente des moyens de communication portables qui permettent de donner une alerte rapidement à des secours de plus en plus efficaces.

En effet, les gelures surviennent après une exposition prolongée au froid (plusieurs heures ou jours), conditions qui ne sont plus rencontrées que dans des massifs lointains (expéditions) ou dans des ces exceptionnels.

5.3.1. Définition

La gelure est définie comme étant une lésion localisée, causées par l'action directe du froid au cours d'une exposition plus ou moins longue à une température inférieure à 0 °C.

5.3.2. Mécanismes

La température des tissus exposés au froid est influencée par deux paramètres :

- la température extérieure entraîne un refroidissement local accentué par le vent, l'humidité ou le contact avec des objets métalliques ;
- le flux de chaleur interne dirigé vers les extrémités est altéré par le phénomène de vasoconstriction consécutif à des compressions localisées, une déshydratation, ou des conditions entraînant des spasmes artériels comme l'inhalation de fumée de cigarette, des pathologies artérielles.

5.3.3. Description de la gelure

Le diagnostic de gelure est évident puisque c'est généralement le malade lui-même qui le fait. Trois périodes se succèdent :

- la gelure s'installe de manière insidieuse sur le visage ou sur les extrémités, accompagnée de douleurs de type picotements ou onglée ;
- la deuxième période se manifeste par une anesthésie qui doit être une véritable sonnette d'alarme. La peau devient blanche et froide ;
- au réchauffement apparaissent des phénomènes douloureux, des phlyctènes (soulèvement de la peau), et un œdème. A l'inverse de phlyctènes claires remplies d'un liquide transparent, les phlyctènes séro-hématiques constituent un signe de gravité. Les parties proches de la lésion sont souvent gonflées (œdèmes localisés). Au-delà d'une semaine, apparaîtront les nécroses, caractérisées par la couleur noire des extrémités et la perte de souplesse des tissus.

5.3.4. Pronostic

Contrairement aux brûlures, il est impossible de fixer immédiatement le degré de profondeur de la gelure. Seule l'évolution au bout de 2 à 3 jours de réchauffement permet d'apprécier la gravité de la gelure. Pendant les premières heures de réchauffement, plusieurs éléments orientent le pronostic. On les détaille dans ce qui suit.

5.3.4.1. Les signes

Signes favorables	Signes défavorables
sensation de picotement ou de brûlure	insensibilité totale
coloration sensiblement normale	cyanose persistante à la pression
chaleur des extrémités	extrémités froides
phlyctènes claires	phlyctènes foncées et volumineuses
œdème autour de la lésion	absence d'œdème sur la lésion

Le caractère insidieux et progressif de la gelure explique que celle-ci soit quelquefois négligée pendant la course. En milieu hospitalier, si le diagnostic de la gelure est facile, le pronostic reste difficile à établir. Après avoir essayé pendant longtemps de résoudre ce problème, à ce jour quelques examens très spécialisés apportent des éléments objectifs sur la gravité de la gelure.

5.3.4.2. Le traitement des gelures

Les règles de conduite à tenir sur le terrain doivent être suivies très scrupuleusement :

- interdiction d'enlever la ou les chaussures de ski ou de montagne lorsqu'on suspecte une gelure du pied sous peine de ne plus pouvoir les remettre ;
- ne jamais flageller ou placer la partie gelée dans la neige ;
- n'entreprendre une action de réchauffement local qu'en lieu sûr, où une évacuation sera possible ;
- en aucun cas, réchauffer une gelure s'il persiste un risque évident d'exposition au froid.

Le traitement des gelures superficielles est simple. Il s'apparente à celui des brûlures superficielles pour les soins locaux :

- réchauffement rapide dans un bain d'eau tiède proche de 38 ° à laquelle on ajoute un liquide antiseptique. Ces bains seront répétés plusieurs fois par jour. L'immersion de la partie gelée peut s'accompagner de douleur vives, cette sensibilité laisse présager un bon pronostic. Il faut alors diminuer la température du bain en ajoutant progressivement de l'eau froide ;
- asepsie et protection contre une blessure éventuelle ;
- pansements gras en cas de blessures associées.

Le traitement des gelures profondes est plus complexe. Il ne peut être réalisé qu'en milieu hospitalier.

5.4. L'hypothermie accidentelle

5.4.1. Définition

Il y a *hypothermie* dès que la température centrale est inférieure à 35 °C. En fait, sur le terrain, il est impossible de mesurer la température du corps. C'est l'état clinique du blessé qui donnera des indications sur l'importance du refroidissement et guidera la conduite à tenir.

5.4.2. Circonstances de survenue

Les cas d'hypothermie en montagne sont trouvés chez :

- les blessés victimes d'un traumatisme par chute ;
- les sujets égarés en haute montagne ou en milieu hivernal ;
- les alpinistes tombés dans une crevasse ;
- certaines victimes d'avalanche.

En fonction de ces circonstances, on peut classer les hypothermies de montagne en deux catégories :

– les hypothermies d'apparition rapide survenant dans un délai de 3/4 d'heure à 9 heures. Il apparaît que ce sont celles où on constate les degrés d'hypothermie les plus bas. Elles surviennent dans des conditions bien précises :
  • le sujet est coincé dans une crevasse, en contact direct avec la glace,
  • le blessé est immobile et allongé sur la neige,
  • le sujet est enseveli sous une avalanche et survit grâce à la présence d'une poche d'air ;
– les hypothermies d'apparition lente, survenant dans un délai d'un à treize jours. Dans ces cas-là, les victimes sont perdues en montagne, obligées de construire un bivouac de fortune. Ces sujets présentent le plus souvent des hypothermies modérées au-dessus de 31 °C. Elles sont associées, dans tous les cas, à une perturbation de l'état général. Il est difficile d'affirmer si l'hypothermie précède ou succède à l'état d'épuisement.

Les ensevelis sous une avalanche sont retrouvés en état d'hypothermie plus ou moins profonde, mais le pronostic est surtout lié à l'état d'asphyxie. Les chances de survie dépendent de la durée d'ensevelissement à la minute près. Le tableau clinique permet d'apprécier la profondeur de l'hypothermie :

– jusqu'à 35 °C, les signes extérieurs sont peu importants : sensation de froid et frissons plus ou moins généralisés dominent le tableau. Le malade conscient réclame et insiste sur la nécessité de réchauffement ;
– au-dessous de 34 °C, le tableau clinique se précise : les frissons disparaissent vers 32 °C pour faire place entre 32 et 25 °C à une rigidité musculaire ; la peau est livide, froide, cyanosée au niveau des extrémités et fait souvent poser à tort le diagnostic de gelures graves.

Le rythme cardiaque est d'autant plus ralenti que la température est plus basse ; il peut tomber à moins de 40 pulsations par minute. L'état de conscience est d'autant plus altéré que l'hypothermie est profonde. Ces signes apparaîtront au fur et à mesure du refroidissement :

– élocution difficile et désorientation ;
– troubles du comportement ;
– hallucinations ;
– état d'agitation ;
– somnolence, perte de connaissance avant le coma profond évoquant la mort.

5.4.3. Évolution

L'évolution des hypothermies de montagne peut se faire suivant trois modalités :

– évolution favorable : elle est heureusement la plus fréquente pour les hypothermies légères ou modérées. Ceci tient au fait de l'excellent état général des sujets alpinistes, jeunes et en pleine santé. L'état clinique revient rapidement à la normale ;
– évolution compliquée : on a décrit un grand nombre de complications de toutes sortes. Un arrêt cardiaque peut survenir au moment du dégagement de la victime, provoquée par des mouvements brusques, ou pendant son transport. Quel que soit l'état de la victime à l'arrivée à l'hôpital, il est nécessaire de rester prudent sur le pronostic et de prolonger la surveillance.
– évolution fatale : l'évolution est grave d'emblée. Il s'agit d'hypothermies basses à partir de 26° environ. La mort est due à un arrêt circulatoire précoce. Elle peut survenir au cours du réchauffement. Les traumatismes surajoutés provoqués par une chute ou les états d'asphyxie prolongés sont des éléments péjoratifs du pronostic.

5.4.4. Le traitement

Il aura pour objet de ramener la température corporelle à la normale en évitant les complications.

5.4.4.1. Les premiers secours

Il convient de soustraire le plus rapidement possible le blessé à l'action du froid. Dans le cadre de la médicalisation des secours en montagne et toutes les fois où cela est possible, un médecin doit accompagner les sauveteurs car il est le seul capable de mettre en œuvre et de contrôler l'efficacité d'une respiration artificielle ou d'un massage cardiaque externe. L'évacuation, en hélicoptère si possible, est choisie sur le centre hospitalier le plus proche. Il faut éviter la mobilisation des membres, responsable du phénomène d'*after drop* : abaissement de la température centrale par mobilisation de la masse sanguine froide des membres vers le tronc. L'inhalation d'air chaud humidifié peut éviter la chute de la température dans des situations où la victime ne peut pas être évacuée rapidement (par exemple pour un sujet coincé dans une crevasse).

5.4.4.2. Le réchauffement

Le réchauffement tend à ramener la température à la normale en évitant les complications. Le réchauffement lent est suffisant pour réchauffer les hypothermies légères. On se contente de placer le malade dans un lit avec deux ou trois couvertures, la température de la pièce étant à 22 ou 23 °C. Ce réchauffement est efficace s'il entraîne une ascension thermique supérieure ou égale à 0,5 °C par heure. Au-dessous de 29 °C un réchauffement rapide du noyau central était préconisé, en utilisant différentes techniques (réchauffement des perfusions, lavages gastriques chauds, dialyse péritonéale, inhalation d'air chaud), et surtout la CEC, circulation extracorporelle visant à réchauffer le sang avant son retour au cœur. Actuellement, les médecins hospitaliers sont beaucoup plus prudents. Toutes les gestes agressifs peuvent provoquer un arrêt cardiaque, et doivent être évités. Le réchauffement est donc lent sous surveillance médicale stricte.

6. La pathologie liée au rayonnement

Le rayonnement ultraviolet (UV) est le principal responsable des brûlures de l'œil et de la peau. La teneur en UV du rayonnement solaire augmente de 4 % tous les 300 mètres. Le rayonnement UV est réfléchi par la neige (80 % d'UV directs) et diffusé par le ciel : à l'ombre, l'alpiniste reste exposé aux UV. Le rayonnement infrarouge par la chaleur qu'il véhicule est la principale cause de l'insolation.

6.1. L'œil et le rayonnement ultraviolet en milieu neigeux

Tout œil possède son dispositif naturel de protection de sorte que les récepteurs sensoriels de la rétine ne reçoivent que la lumière visible. Les filtres du rayonnement UV sont la cornée et le cristallin, renforcés par les larmes et le jeu pupillaire qui fait office de diaphragme. La vitrée et l'humeur sont des filtres infrarouges. Mais il existe plusieurs fenêtres qui permettent la transmission d'une faible quantité d'ultraviolets A, B et C de la lumière solaire jusqu'aux récepteurs sensoriels. Les effets nocifs du rayonnement ultraviolet sur l'œil sont liés, non seulement à la capacité d'absorption des différentes structures de l'œil, mais aussi à l'intensité et à la durée de l'exposition aux UV.

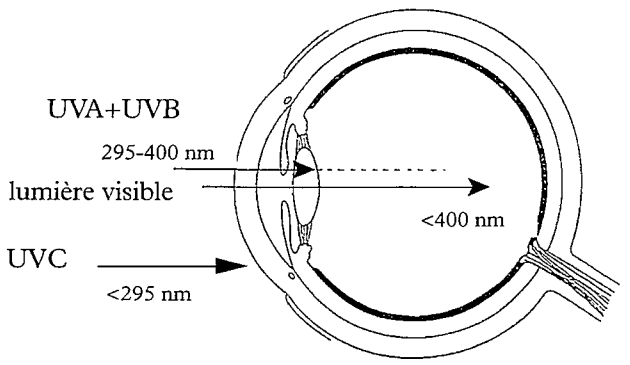


Figure 3 :
filtrage des rayonnements ultraviolet par les différentes structures de l'œil.

L'ophtalmie des neiges est une brûlure de la cornée. Ce "coup de soleil sur l'œil" est la conséquence d'une exposition sans protection aux rayonnements UV en milieu neigeux. La douleur qui apparaît 4 à 6 heures après l'exposition est accompagnée d'une sensation de gravier dans les yeux, et d'un larmoiement intarissable. Les paupières sont gonflées, empêchant l'ouverture des yeux, qui de toute façon serait insupportable (photophobie). Le traitement nécessite le repos, des pansements oculaires, l'instillation de collyre antiseptique, ou pommade ophtalmique. Si les douleurs persistent au-delà de 24 heures, une consultation auprès d'un ophtalmologiste est demandée. Les lentilles n'empêchent pas la dessiccation de la cornée. En haute montagne, il est donc conseillé de porter des verres de protection. Après une ophtalmie des neiges, il est nécessaire de différer le port des lentilles de 4 ou 5 jours, le temps nécessaire à la cicatrisation de la cornée.

Les effets pathologiques des rayonnements solaires sur l'œil (*phototoxicité*) sont au premier rang des préoccupations (compte tenu du vieillissement de la population) à cause de périodes d'expositions aux ultraviolets de plus en plus prolongées. Actuellement on tend à considérer que la *dégénérescence maculaire liée à l'âge* (DMLA[1]) est accélérée ou aggravée par l'exposition prolongée des yeux au rayonnement ultraviolet solaire. La fréquence des cataractes retrouvées dans les populations des hauts plateaux des régions tropicales est attribuée à l'exposition permanente et non protégée de l'œil aux UV chez des sujets dont l'espérance de vie tend à s'accroître. L'apparition de lésions chroniques provoquées par des expositions répétées aux ultraviolets semblerait plus fréquente chez l'alpiniste, surtout le guide. Une étude récente a comparé deux groupes de populations d'âges identiques mais aux habitudes de vie différentes : des guides de haute montagne et des sujets sédentaires. La population de guides présente un nombre plus élevé de lésions de la cornée, du cristallin, et un dysfonctionnement de la sécrétion lacrymale. Sur le plan fonctionnel, le champ visuel et la vision des couleurs sont légèrement altérés chez les guides. Malgré la protection par des verres filtrant les ultraviolets chez les guides, on décèle plusieurs indices d'un vieillissement prématuré de l'œil, justifiant des précautions particulières de prévention : verres organiques au haut pouvoir filtrant, instillation régulière des "larmes artificielles" pour renforcer l'effet protecteur des larmes, éventuellement, médication préventive anti-radiculaire et anti-ischémique.

La prévention par le port de lunettes de soleil avec des verres teintés à haut pouvoir filtrant s'impose en montagne. La fonction du verre solaire est de filtrer les rayonnements les plus nocifs (UVB) et d'absorber en partie ceux dont la longueur d'onde est située dans la partie visible du spectre de la lumière. Le pouvoir filtrant d'un verre est donné par la matière dans laquelle il est fabriqué. La filtration qualitative est obtenue grâce la teinte, limitant l'éblouissement de la lumière. Un bon filtre solaire doit réduire l'intensité lumineuse tout en conservant un bon rendu des couleurs. Il peut également agir sur l'acuité visuelle.

1. DMLA : cécité survenant chez les personnes âgées liée à une atteinte du centre de la rétine.

Actuellement, une normalisation à l'échelle européenne est appliquée pour définir la protection de l'œil dans différents environnements : sont intégrées trois valeurs de transmission des UVB, des UVA et du spectre visible. D'où cinq catégories de verres filtrants qui sont proposés avec les cotations suivantes :

0	100 à 80 % dans le spectre visible
1	80 à 43 %
2	43 à 18 %
3	18 à 8 %
4	8 à 3 %

En forte luminosité, la forme du verre largement couvrant, mais surtout les caches latéraux sont les meilleurs garants d'une protection contre le rayonnement réfléchi.

6.2. Les brûlures solaires

L'*exposition aiguë* entraîne des brûlures cutanées plus ou moins intenses : de la rougeur de la peau à l'apparition de phlyctènes (cloques), l'état général est parfois altéré (fièvre, frissons, insomnie). Le traitement repose sur l'application de produits locaux, et la prise d'antalgiques par voie buccale. Le risque de brûlures cutanées est variable selon les individus et selon le degré de pigmentation de la peau (phénotype). Certains sujets présentent des réactions allergiques uniquement déclenchées par le soleil. Plus fréquemment, des allergies cutanées sont consécutives à la prise de certains médicaments dits photosensibilisants. Des produits appliqués sur la peau peuvent être à l'origine de réactions au soleil : c'est le cas des crèmes anti-inflammatoires ou antibiotiques fréquemment utilisées pour traiter l'acné. L'application cutanée de produits parfumés est également à proscrire. L'herpès labial, "bouton de fièvre", peut être évité par l'application répétée de stick écran total d'indice de protection élevé. L'*exposition chronique*, c'est-à-dire l'exposition répétée aux rayonnements solaires de haute altitude, est la principale cause du vieillissement précoce de la peau et de l'apparition des cancers de la peau.

Pour la prévention, il faut avant tout éviter de s'exposer au soleil en haute montagne quand cela n'est pas nécessaire, se mettre à l'ombre le plus souvent possible, protéger les parties découvertes par des vêtements. Il convient d'appliquer préférentiellement les écrans solaires d'indice de protection au moins égal à 20 sur la peau qui n'a pas pu être protégée. Pour être efficace, il faut renouveler l'application des protections solaires (visage et lèvres) toutes les deux heures, voire plus si la transpiration est abondante.

L'insolation est une atteinte de l'état général due à l'effet de la chaleur sur la tête. Elle apparaît progressivement :

- la forme légère est annoncée par un malaise général, sensation de fatigue, maux de tête, nausées, sensation de vertige. Le visage est anormalement rouge ;
- une accentuation des maux de tête, une pâleur du visage, une soif intense, une sensation d'élévation thermique anormale, des troubles respiratoires, un pouls lent et fort, représentent l'évolution vers la forme grave ;
- à un stade extrême, crises convulsives, coma et mort subite.

Le traitement de la simple insolation est de favoriser la sudation par des vêtements aérés, de se réhydrater et se rafraîchir profitant de la proximité de la neige. Il faut à tout prix éviter les formes graves qui ne cèdent qu'à une réanimation intensive. Eviter l'insolation, c'est ne pas s'exposer trop longtemps au soleil pendant les heures chaudes, bien s'hydrater et éviter les efforts intenses.

7. La trousse de secours

La trousse de secours est composée de médicaments pour traiter les affections les plus courantes : (i) produits de soins externes, (ii) moyens d'immobilisation simples. Les caractéristiques de la trousse de secours de montagne sont :

- la simplicité, c'est-à-dire un compromis entre vouloir faire face à toutes les situations d'urgence "médicales" ou se limiter à ne traiter que les maux les plus courants. Les compétences de chaque individu sont très variables, mais jamais suffisantes. Dès lors, il faut éviter les médications dangereuses sauf pour toutes les maladies de haute altitude et après une formation faites par des médecins ;
- l'efficacité grâce à une connaissance précise des produits utilisés (effets recherchés, effets secondaires, posologie et contre-indications).

De plus cette trousse de secours doit être adaptée à la nature, à la durée de la course et à l'isolement, en veillant de ne pas emporter de médicaments photo-allergisant (certains antibiotiques par exemple). Elle doit également être entretenue en complétant les médicaments utilisés et en renouvelant les produits périmés. Pour une course à skis d'une journée, la trousse comprend essentiellement des produits à usage externe : désinfectant (sous forme de pochettes individuelles), compresses stériles, sutures adhésives et/ou fils à suture cutanée, bande de contention et bande adhésive élastique. On peut emporter un médicament antalgique (Paracétamol) et un antidiarrhéique à action rapide, un tube de pommade ophtalmique. Pour une randonnée à skis de plusieurs jours, cette trousse sera complétée par des médicaments à visée antalgique (Aspirine, Paracétamol), antispasmodique, antibiotique, antinauséeuse, antidiarrhéique, et des médicaments de confort (somnifère à action rapide, pastilles pour gorge irritée, etc.).

Pour un raid avec nuit au-dessus de 3 500 mètres d'altitude, il est indispensable d'avoir avec soi les médicaments traitant les maladies de haute altitude : un *inhibiteur calcique* en cas de survenue d'un œdème pulmonaire de haute altitude et un *corticoïde* en cas de mal aigu sévère ou d'un œdème cérébral de haute altitude. Toute personne susceptible de décompenser brutalement un état pathologique préexistant (asthme, colique néphrétique, épilepsie, tétanie, diabète, etc.) doit en avertir le responsable du groupe et lui confier les médicaments pour traiter ces manifestations. Le matériel complétant la trousse de secours regroupe une couverture de survie, une attelle d'immobilisation de type Sam-Split®, une protection des lèvres et de la peau contre les UV.

8. Conclusion

La liste de ces aspects médicaux propres au milieu neigeux n'est pas exhaustive. Le raid en haute altitude soumet l'organisme aux effets de l'hypoxie et donc à la survenue du *mal aigu des montagnes*. Les cas d'œdème aigu du poumon de haute altitude en ski de printemps ne sont pas rares dans les refuges de haute altitude du massif du Mont-Blanc ou du Valais. Il est donc prudent de disposer des médicaments d'urgence traitant cette pathologie qui améliorent l'état du malade pendant l'évacuation. Comme pour toutes les pratiques sportives, des notions simples de physiologie de l'exercice et de la dépense énergétique de la marche (à pied ou à raquettes) ou du ski de randonnée permettent de mieux gérer l'intensité et la durée de l'activité. Des notions de diététique sportive, concernant la réhydratation, la nutrition au cours de l'effort et la restauration de son stock d'énergie pendant la récupération sont indispensables pour réaliser un raid en ski de montagne dans des conditions de confort et de sécurité. L'expérience régulière de cette pratique sportive nous amène à rencontrer toujours les mêmes désordres de santé (digestifs, infectieux, ou inflammatoires) que seule une trousse de pharmacie soigneusement préparée permettra de traiter au mieux.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] Directives CISA-IKAR :
– *Treatement of joint and dislocated fractures* : H. FORSTER, K. ZAFREN
– *Treatement of shoulder dislocations* : H. FORSTER, K. ZAFREN
– *Avalanche victims with asystolie - triage by the rescue doctor at the site of accident*
[2] J. FORAY : *Les gelures*, Chirurgie, Mémoires de l'Académie **6** (1986) 112.
[3] J. BARIOD et B. THÉRY : *Le point sur la pathologie induite par le harnais*, Spelunca 55 (1994) 39 42.
[4] P. S. AUERBACH, E.C.GEEHR : *Management of wilderness and environmental Emergencies*, (Mc Millan Publishing Compagny, New York, 1989), 646 p.
[5] J. COLIN, J. TIMBALET, C. BOUTELIER : *Les échanges thermiques dans le froid et les moyens d'évaluation d'une ambiance froide*, Revue de Médecine **40** (1974) 2621-2629.

J.-P. RICHALET, J.-P. HERRY, *Médecine de l'Alpinisme*, Masson, 1998.

Chapitre 12
LE SECOURS EN AVALANCHE*

A partir du moment où l'on quitte l'univers balisé et sécurisé des pistes de ski, on entre dans un monde à risque. Le respect des règles élémentaires de sécurité doit en principe permettre de ne pas se faire prendre par l'avalanche. Mais l'appréciation du danger n'est pas toujours facile, l'erreur est humaine et, quelles que soient les précautions prises (qui minimiseront les conséquences d'un accident), il subsiste toujours un risque résiduel. S'il faut naturellement tout faire pour éviter l'accident d'avalanche, il faut également savoir comment réagir si l'on y est confronté. En effet, tous ne se terminent pas dramatiquement, et nombreux sont les exemples d'accidents qui, par leurs conséquences, n'ont été que des incidents. Toutefois, la limite entre incident et accident est très mince. Elle tient souvent à peu de chose, dont en particulier, un comportement adapté à la situation rencontrée. Mieux vaut donc déjà y avoir quelque peu réfléchi. Ainsi après avoir donné quelques chiffres sur les accidents d'avalanche, le présent chapitre proposera des conseils sur la conduite à tenir en cas d'accident d'avalanche, que l'on en soit victime ou témoin. Dans une troisième partie, il présentera l'organisation des secours : les acteurs, le matériel et le déroulement d'une opération de secours.

1. QUELQUES CHIFFRES

1.1. Les accidents d'avalanche en France depuis 1971

Depuis la catastrophe de Val-d'Isère qui causa la mort de 39 personnes en février 1970, l'ANENA recense les accidents d'avalanches en France [1,2]. Ce travail est effectué grâce aux équipes de secouristes (gendarmes des PGHM et CRS de montagne, ainsi que services de sécurité des pistes des stations de ski), qui collectent les informations sur le terrain. Les chiffres suivants ne concernent donc que les accidents graves et mortels qui ont nécessité l'intervention des secouristes professionnels. S'il est à peu près sûr que toutes les victimes décédées sont recensées, il est certain que de nombreux accidents, qui se sont bien terminés [3], et n'ont donc pas entraîné l'intervention des secouristes professionnels, ne sont pas comptabilisés. Le nombre de ces "incidents" est très difficile à estimer, il est donc impossible de chiffrer le nombre total d'accidents qui ont lieu chaque hiver.

1.1.1. Les victimes décédées par accident d'avalanches

Depuis 1971, on dénombre en moyenne une trentaine de morts par accident d'avalanche, et environ autant de blessés graves. Ce nombre est toutefois très variable d'une année à l'autre. Ainsi, il fut de 11 en 1975, et atteignit 57 en 1981, qui fut une année noire. Les variations sont également très irrégulières, et on ne note pas d'augmentation ou de diminution du nombre des victimes décédées au fil des ans. Ainsi, l'augmentation de la fréquentation de la montagne, liée en particulier au développement des sports d'hiver, ne s'est pas traduite par une augmentation des accidents mortels d'avalanche.

* Ce chapitre a été écrit par François SIVARDIÈRE.

Les causes de la mort par accident d'avalanche sont de trois types :

- les traumatismes : ils sont dus à l'avalanche elle-même. Les nombreux témoignages de victimes d'avalanches rapportent qu'elles se sont senties le jouet de la neige en mouvement, tour à tour englouties sous la neige, puis rejetées à l'air libre. Ainsi au cours de l'avalanche elle-même, la victime est bousculée plus ou moins violemment et les chocs avec les blocs de neige, parfois très durs, peuvent être à l'origine de fractures diverses. De plus la victime peut rencontrer des arbres, des rochers, sauter des barres rocheuses, etc. On peut donc être très grièvement blessé, voire tué au cours de l'avalanche, même sans être enseveli ;
- l'asphyxie, due au manque d'approvisionnement en oxygène des poumons. Elle peut survenir dans trois cas, tous liés à un ensevelissement de la victime sous la neige :
  - obstruction des voies respiratoires par la neige. Un certain nombre de personnes sont retrouvées la bouche et le nez remplis de neige, qui empêche donc l'air d'arriver jusqu'aux poumons,
  - épuisement de la réserve d'air. Le plus souvent l'espace entre la victime et sa prison de neige est très réduit, voire nul. L'air qu'il contient peut donc être rapidement consommé, et la porosité de la neige composant le dépôt de l'avalanche est insuffisante pour compenser la perte d'air due à la respiration,
  - impossibilité mécanique de ventiler. La pression de la neige sur le thorax est telle que la compression qu'elle exerce peut empêcher tout mouvement respiratoire. La victime ne peut donc plus gonfler et remplir ses poumons d'air ;
- l'hypothermie : la victime est en contact direct, sur toute la surface de son corps, avec la neige dont la température est négative ou nulle. Le corps se refroidit donc relativement vite, d'autant que la victime se trouve en état de stress. Ce refroidissement, s'il se prolonge et s'aggrave, peut être mortel.

Contrairement à une idée répandue, ce ne sont pas les hivers très enneigés mais ceux caractérisés par un faible enneigement qui sont les plus meurtriers. Ceci est en partie dû au fait qu'un faible enneigement suscite moins la méfiance que de grosses épaisseurs de neige, et qu'il peut être favorable à l'établissement d'un manteau neigeux instable (avec en particulier des sous-couches de gobelets).

En ce qui concerne la profondeur d'ensevelissement, dont dépendent les chances de survie d'une victime d'avalanche, les données disponibles [4] (mais non exhaustives !) montrent que plus d'une victime ensevelie sur deux (60 %) est à moins d'un mètre de profondeur, et qu'une sur trois sur trouve à moins de cinquante centimètres de la surface de la neige. En France, les avalanches concernent principalement les Alpes, les Pyrénées et la Corse, mais il s'en produit aussi, plus rarement il est vrai, dans des régions enneigées moins montagneuses, telles que le Massif Central, les Vosges ou le Jura. Près de vingt départements entrent dans les statistiques de l'ANENA, mais les accidents sont annuels dans seulement sept d'entre eux. Plus de la moitié des décès ont eu lieu dans les Alpes du Nord (Isère, mais principalement Savoie et Haute-Savoie). Ceci est en rapport direct avec la fréquentation hivernale, qui y est très forte, à la fois pour la pratique du ski hors-piste et pour celle du ski de randonnée. Enfin, si de nombreux accidents ne font pas de morts, les accidents mortels peuvent être parfois dramatiques, causant le décès de plusieurs victimes. Voici quelques exemples, que l'on souhaiterait ne plus revoir :

- 13/02/91 : 9 randonneurs tués dans les Hautes-Alpes ;
- 21/11/92 : 7 skieurs décédés sur une piste de ski en Savoie ;
- 28/03/93 : 5 alpinistes sont emportés et tués par une avalanche en Ariège ;
- 29/01/94 : 6 skieurs hors-piste emportés et tués par une avalanche en Savoie ;
- 22/01/95 : 3 randonneurs à raquettes tués par une avalanche en Haute-Savoie.
- 23/01/98 : 11 randonneurs à raquettes tués par une avalanche dans les Hautes-Alpes.

1.1.2. Répartition par type d'activité

On distingue deux grands types d'activité :

– les activités récréatives : ski de randonnée, de piste, hors-piste et alpinisme ;
– les activités non récréatives : accidents sur les voies de communications, dans les habitations.

Les accidents mortels concernant les voies de communication ou des habitations sont maintenant rarissimes. Le génie paravalanche et le déclenchement artificiel associés à l'évacuation des habitations ou à la fermeture des routes ont en effet permis, depuis plus de vingt ans, de mieux maîtriser le risque d'avalanche menaçant des infrastructures. Il y a toutefois des événements exceptionnels qui nous rappellent que, malgré tout, la nature reste la plus forte : 12 personnes (heureusement toutes indemnes) ont été ensevelies dans leurs chalets, le 25 février 1995 en Savoie. Mais on n'est pas passé loin de la catastrophe !

La majorité des accidents concerne donc des personnes qui ont été emportées pendant une pratique de loisirs. Une personne tuée par une avalanche sur deux faisait du ski de randonnée, et une sur trois du ski hors-piste ; 12 % pratiquaient l'alpinisme, et *seulement* 3 % se trouvaient sur une piste de ski ouverte. Les tendances (moyennes sur cinq ans) concernant le ski de randonnée et le ski hors-piste montrent une très légère diminution, en valeur absolue, des décès.

En fonction des diverses activités, les accidents peuvent être plus ou moins meurtriers. Il nous a paru intéressant de calculer le *taux de mortalité* (rapport du nombre de morts sur le nombre d'accidents) pour chacune des activités. On constate [4] que l'alpinisme et le ski de randonnée ont un taux de mortalité voisin de 1, dû, en particulier, à l'éloignement des centres de secours, qui augmente d'autant les temps d'alerte et d'acheminement des secouristes, réduisant de façon importante les chances de survie des victimes ensevelies (voir § 1.2). Pour le ski hors-piste et le ski de piste, le taux de mortalité est divisé par deux, car les avalanches concernées sont généralement de plus petite taille, grâce au déclenchement préventif des avalanches qui est effectué par les services de sécurité des pistes, mais aussi car les services de secours sont plus proches. Les accidents sur les voies d'accès ont un taux de mortalité également proche de 0,5 dû sans doute à la relative protection contre l'asphyxie qu'offrent les véhicules. Enfin, le taux de mortalité des accidents touchant des habitations est de l'ordre de 0,8, ce qui est probablement explicable par le fait que les avalanches qui les atteignent sont d'une très grande ampleur, développent donc de plus grandes énergies, et sont par conséquent plus destructrices.

1.2. Les chances de survie pour une victime d'avalanche

Les données suivantes sont issues d'une étude [5] réalisée en 1992 par deux spécialistes, H. Brugger (Club alpin sud-tyrolien) et M. Falk (Institut de biostatistique, université d'Innsbruck), s'appuyant sur l'analyse des accidents par avalanche survenus en Suisse entre 1981 et 1989 et ayant impliqué des skieurs de randonnée ou des skieurs hors-pistes. Ce travail a porté sur 332 personnes entièrement ensevelies, dont la moitié environ (150) ont pu être sorties vivantes, soit un taux de mortalité en avalanche de 54 %.

Profondeur d'ensevelissement	moins de 50 cm	50-100 cm	plus de 100 cm
Nombre total de victimes	123 (37 %)	108 (32 %)	101 (31 %)
Temps moyen d'ensevelissement	10 minutes	55 minutes	120 mn
Victimes vivantes	95 (77 %)	36 (33 %)	19 (19 %)
Victimes décédées	28 (23 %)	72 (67 %)	82 (81 %)

Tableau : résultats de l'étude de Brugger et Falk (1992).

Il a confirmé une loi évidente et largement connue : les chances de survie dépendent étroitement de la durée d'ensevelissement, elle-même directement fonction de la profondeur d'ensevelissement. Cette recherche a également fourni des données sur l'évolution des chances de survie en fonction de la durée d'ensevelissement. Tous accidents confondus, les auteurs ont mis en évidence quatre phases successives, aux caractéristiques contrastées.

1. Phase de survie, jusqu'à 15 minutes après l'ensevelissement. Les chances de survie s'élèvent à 93 % (valeur nettement supérieure à celle de 65 % précédemment admise). Presque toutes les victimes dégagées pendant ce laps de temps survivent, à condition qu'elles n'aient pas été mortellement blessées et qu'elles reçoivent rapidement les premiers soins appropriés.

2. Phase d'asphyxie, entre 15 et 45 minutes d'ensevelissement. Le pourcentage de chances de survie tombe brutalement de 93 % à 25 % : durant cette phase, toutes les victimes ensevelies ne disposant pas d'une poche d'air meurent par asphyxie. Ce chiffre de 25 % est largement inférieur à celui de 50 % retenu jusqu'ici.

3. Phase de latence, de 45 minutes jusqu'au moment du dégagement. Les premiers décès par hypothermie commencent à se produire après environ 90 minutes. Il ne peut y avoir survie que si la victime dispose d'une poche d'air. Dans ce cas, il peut y avoir une phase de relative sécurité. Une vingtaine de victimes ont pu être dégagées vivantes (l'une d'entre elles après 16 heures d'ensevelissement), au cours de cette phase.

4. Phase de secours, à partir du dégagement et jusqu'à l'arrivée en milieu hospitalier. Il y a un nouveau risque d'issue fatale par manque de soins adaptés.

☞ Ces résultats confirment donc que les victimes ensevelies conservent le maximum de chances de survie dans les premières minutes succédant à une avalanche.

Cette même étude met également en évidence la faible probabilité de retrouver des victimes vivantes pour les secours extérieurs organisés :

- 71 % (112 sur 158) des victimes dégagées par leurs camarades étaient vivantes ;
- 13 % (20 sur 156) des victimes dégagées par des secours extérieurs étaient vivantes. Ce dernier résultat s'explique par le fait qu'aucune victime dégagée par les secours extérieurs n'a pu l'être durant la phase 1, seulement 14 % en phase 2 et 86 % en phase 3.

☞ Par conséquent, seuls des secours immédiatement organisés par les compagnons, rescapés, de la victime garantissent le maximum de succès.

En dépit de l'amélioration de la qualité des secours professionnels et de la médicalisation, il y a donc peu de chances de voir diminuer le taux de mortalité en avalanche. Le chiffre de 54 % est d'ailleurs resté stable au cours des huit années étudiées. En conclusion, seule, une meilleure efficacité des premiers secours organisés par les compagnons des victimes permettrait de faire baisser ce chiffre de façon substantielle, en accroissant le nombre de personnes dégagées dans les quinze premières minutes.

1.3. Témoignage d'accident par le curé d'Huez, 1944 [6]

« Je vis un petit nuage devant moi. Aussitôt une pensée claire, nette et très calme : l'avalanche. Un bruit sourd comme celui que donne une couverture frottée par la main. Une poussée mœlleuse et irrésistible, un envahissement, puis le silence, la nuit et l'immobilité. Immédiatement, une préoccupation : bouger avant que la neige se tasse. J'essaye. Rien : trop tard. Peut-être que non. Je recommence : impossible. Je prends mon temps, rassemble toutes mes forces, je m'arc-

boute sur les coudes, je pousse du dos autant que je peux : inutile, je n'ai pas bougé d'un centimètre.

J'étais couché à plat ventre, les bras repliés sous la poitrine, strictement bloqué de tous côtés : de la neige partout, dans le nez, la bouche, les yeux. Je perdis alors la tête. Je m'agite, me tortille, secoue les jambes, rien à faire, l'étreinte demeure. J'ai chaud, je suffoque, l'air va me manquer. Peut-être faut-il rester calme et cesser tout effort, dépense somptuaire d'oxygène et attendre. Attendre quoi ? Qui ? Un bref calcul, il est 3 heures, inquiétudes à 6 ou 7, recherches à 8 ou 9, et comment me trouver ? Personne ne m'a vu. Alors je réalise l'horreur de la situation, et dans la nuit et l'immobilité, ma pensée va vite. Jusqu'à maintenant j'ai été un peu le spectateur de mon aventure avec juste assez de peur pour apprécier le sérieux, la mise en scène. Mais l'aventure est vraie. "C'est une avalanche, une vraie qui t'a pris et tu vas y rester. Oui, c'est bête, affreusement bête, mais c'est ainsi. D'autres ont été pris, cette fois c'est ton tour". Et la nuit, le silence et surtout cette terrible immobilité qui me prend par les reins, qui me ceinture et me bloque, me fait sentir l'indifférence absolue des éléments à mon petit cas particulier, à ma mort qui va venir, qui vient, la mienne, ma mort. Qui l'arrêtera ? Rien ne bouge, tout est calme. L'affaire est jouée c'est sûr, je vais mourir, oui moi en pleine vie, en pleine santé, à trente ans (à 500 mètres de chez moi).

Ce fut un moment tragique : savoir et admettre qu'on ne vivra plus, qu'il faut renoncer à tout et que ce sacrifice ne servira à rien. Une pensée ridicule et tragique fit alors diversion. On a retrouvé le curé de la Salette pris lui aussi par une avalanche avec les poings rongés. Je songe aux miens. Je décide de les laisser intacts, d'être sage et de me préparer à paraître devant Dieu.

Certainement cette pensée de Dieu et cette acceptation de la mort mirent fin à la rage folle qui me suffoquait. Mes pensée reprirent un cours sensé. Il fallait respirer par le nez et lentement par économie. Je le fis. De plus l'agitation était inutile. A chaque soubresaut, l'air devenait un peu plus rare. L'étreinte se resserrait, c'était clair. Il fallait rester calme. Une seule chance me restait : creuser un tunnel, mais où mettre la neige enlevée d'un côté puisque j'étais pressé de tout part. Avec les poings et les coudes, je me mis alors à la tasser sous moi, et à mesure je comblais le vide avec de la neige prise sur le côté. Je faisais ainsi un chemin pour mon coude. Je pus enfin le faire glisser sur le côté puis en haut à mesure que je me retournais. Je pouvais maintenant creuser plus facilement dans le bon sens. Souvent je dus m'arrêter pour reprendre mon souffle. Je voulais aller trop vite, et la neige remuée m'étouffait, mais, têtu, à chaque expiration je me répétais obstinément. "C'est de la poudreuse. C'est de la poudreuse tassée, bien sûr, mais c'est de la poudreuse malgré tout. L'air doit pouvoir la traverser, ça te donne du temps. Profites-en". Mon bras était maintenant suffisamment ouvert pour avoir la force de s'enfoncer dans la neige. J'effaçai l'épaule et de tout le torse tendu, je poussai. De la neige tombe, me suffoque, m'aveugle, je la distingue blanchâtre entre les cils, car pour la première fois, elle est éclairée...

Et alors, seulement, je sentis que ma main était à l'air libre. J'avais percé, l'air passait, froid, délicieusement froid. Exténué, j'entrepris avec une joie sauvage et vindicative de le respirer à grands coups. Il arrivait à temps : j'étais sauvé.

Pour comble de bonheur, j'entendis au même instant un moteur. Des hommes étaient là. Ils viendraient à mon secours. Mais j'étais sur la route. Ce moteur, c'était peut-être un camion, le chasse-neige en V ou à turbines. J'allais être écrasé, coupé en deux ou déchiqueté. Une fois de plus la panique me prend, j'agite convulsivement le bout des doigts qui dépassait et je me mets à hurler une seule note pour avoir plus de force et presque sans prendre de temps de respirer, pour avoir plus de chance de me faire entendre. Mais ma voix semble ridiculement faible. De plus mon bras obstrue tout le petit tunnel. Aucun son ne doit passer. Que vaut-il mieux faire ? Agiter les doigts sans crier, ce qui est inutile, ou crier sans montrer la main ? Ce problème à résoudre remet en branle des idées saines. Le chasse-neige ne peut pas être déjà là, et s'il y est, j'ai le temps d'agrandir le trou pour me faire mieux entendre avant qu'il n'arrive sur moi. Quant au camion,

inutile d'y penser. Mais si "on" bouchait mon trou par où je respire, "on", je ne précise pas, peut-être une nouvelle avalanche, la tourmente ? Mais si mes vêtements en gelant collaient à la neige et me retenaient captif, immobilisé comme cet explorateur qui s'était endormi sous son traîneau.

Avec rage alors, je me mets à creuser. L'action me calme. Jamais deux avalanches au même endroit, et la tourmente, je m'en moque, j'irai plus vite qu'elle, ce qui m'empêchera en plus de geler sur place. Et petit à petit, prenant la neige par poignée et la jetant dehors, j'agrandissais mon tunnel. Il fallait bien viser, sinon les boules me retombaient sur la figure. Ma main était insensible au froid, peut-être gelée. Tant pis, profitons-en une fois encore. Dès que je pus, je changeai de système. Au lieu de repousser la neige, je la poussais sous moi, et à chaque coup je m'élevais. La méthode me parut merveilleuse parce que moins pénible. Je me surpris à fredonner une rengaine. Je tenais le bon bout. En me hissant je pouvais voir maintenant le départ et la largeur de l'avalanche. Je fus satisfait de constater son ampleur. Mes jambes étaient encore immobilisées à cause des skis. Je fis un tunnel pour atteindre les fixations. Et mon pied gauche revint à la vie. Je souris malgré moi à l'idée de ce renfort de taille. Une bonne jambe fait du bon travail et la mienne s'employa à fond. J'avais l'impression de ne plus être seul, et assez vite je fus complètement dégagé, une heure environ après l'ensevelissement. »

2. Que faire en cas d'accident d'avalanche ?

Chaque situation d'accident d'avalanche est un cas particulier. Il serait donc tout à fait illusoire de vouloir décrire de façon exhaustive l'ensemble des comportements à adopter. Néanmoins, l'analyse de situations types permet de créer un canevas que vous devrez adapter aux circonstances réelles. En clair, nous ne vous proposons pas d'appliquer des recettes, mais d'apprendre à en confectionner : lorsque l'accident survient, il est bien souvent trop tard pour réfléchir. Seuls les réflexes peuvent vous aider. Il faut *penser à agir vite* et surtout *garder la tête froide.* C'est pourquoi il est bon d'avoir déjà réfléchi à ces situations, que l'on aimerait bien ne jamais rencontrer, car certaines choses sont plus faciles à dire qu'à faire.

2.1. Vous êtes pris dans une avalanche

2.1.1. Que faire pendant l'avalanche ?

Tout va généralement très vite et vous n'aurez pas le temps de réfléchir. C'est d'abord votre instinct qui vous dictera votre conduite. Voici cependant quelques conseils, dont le premier est : *garder votre sang-froid.*

L'avalanche part en amont de votre position

Il faut *tenter de s'échapper latéralement,* pour éviter d'être rattrapé (et ne pas essayer de prendre de vitesse l'avalanche, en partant droit dans la pente, l'avalanche vous rattrapera quasi inévitablement) ; si nécessaire, prendre un peu de vitesse en plongeant droit dans la pente, skis écartés, puis rejoindre le plus vite possible un des bords de la zone d'écoulement de l'avalanche ; cette fuite latérale réclame sang-froid et grande maîtrise de l'équilibre à skis ; elle nécessite une certaine distance entre l'avalanche et vous-même pour que vous ayez le temps de fuir ; le résultat n'est donc pas garanti, d'autant qu'il est très difficile d'estimer les dimensions de l'avalanche en quelques fractions de seconde, et que la chute pendant la fuite est interdite ; mais mieux vaut toutefois tenter quelque chose que d'attendre sans rien faire.

L'avalanche part sous vos skis

Il faut :

– *tenter de fuir latéralement.* Cela pose les mêmes problèmes que précédemment, à ceci près (et ce n'est pas rien), qu'en plus, vous skiez sur une neige

en mouvement et que la chute est d'autant plus probable. Si tel est le cas, on a vite fait d'entrer dans l'avalanche plutôt que d'en sortir !

– *tenter d'éviter l'ensevelissement* :
– enlever les lanières des skis et les dragonnes des bâtons de ski (si ce n'est déjà fait !),
– se débarrasser, si possible, des skis,
– sac à dos : s'il est lourd, essayer de l'enlever (il gêne la mobilité, alourdit, donc enfonce la victime) ; s'il est léger : le garder (il protège contre les chocs puis contre le froid) ;
– *rester en surface en* :
– s'allongeant et prenant appui sur la neige ou des blocs portants,
– nageant (faire de grands mouvements) dans la neige non portante ;
– *protéger ses voies respiratoires* (ne pas avaler ou respirer de la neige) :
– fermer la bouche (ne pas crier),
– protéger son nez et sa bouche avec les mains, les bras repliés, le col de la fourrure polaire, de la veste...
– *essayer de se cramponner à tout obstacle* pour éviter d'être entraîné.

2.1.2 Que faire quand l'avalanche s'arrête ?

Il faut :

– *se faire une poche d'air devant le visage* avec les mains et les bras (les replier devant le visage) ;
– *essayer de créer un espace autour de soi* (par une détente de son corps), on peut aussi essayer de tendre un bras vers le haut (avec ou sans bâton de ski) pour le faire dépasser de la surface de la neige : il facilitera les recherches pour vous localiser ;
– garder son calme et le moral (cela minimise la consommation d'oxygène, qui risque de se faire rare), être confiant dans les secours (même si vous êtes seul : on vous a peut-être vu) ;
– si possible, *creuser vers le haut pour se dégager* (pour repérer le haut, si la lumière ne traverse pas la couche de neige qui vous recouvre, vous pouvez saliver voire uriner, mais cette dernière action augmente les déperditions de chaleur à cause des vêtements mouillés) ;
– si on ne peut pas bouger (la neige compacte forme un véritable étau), ne pas s'endormir.

2.2. Vous êtes témoin d'un accident d'avalanche

2.2.1. Que faire pendant l'avalanche ?

Il faut :

– *se mettre à l'abri* (de cette avalanche ou d'une autre) ;
– observer le(s) point(s) de disparition de la victime de l'avalanche et imaginer la trajectoire qu'elle peut parcourir sous la neige, dans l'avalanche, car elle peut réapparaître plus bas ; *repérez surtout le dernier point de disparition de la victime* (on fera les recherches à l'aval de ce point).

2.2.2. Que faire quand l'avalanche s'arrête ?

Vous êtes seul

Il faut :

– marquer l'endroit où la victime a été vue pour la dernière fois (dernier point de disparition de la victime) ;
– chercher *vigoureusement* pendant 10 à 15 minutes :
– en aval du dernier point de disparition de la victime,
– dans les zones préférentielles (replats, creux, amont des rochers, des arbres, bordures de l'avalanche) ;

– regarder pour découvrir des indices de surface (ski, bâton, gant, chaussure, sac à dos, etc.) ;
– écouter pour entendre des cris, des coups de sifflets, etc. ;
– chercher avec votre ARVA (voir § 3.3, ci-après) ;
– sondage de fortune (sondes, bâtons-sondes, bâtons, skis, etc.) ;
– après 1/4 d'heure[1] de recherches infructueuses, alerter les secours :
– par radio si vous en avez une, puis continuer les recherches en les attendant, et mettez-vous à leur disposition à leur arrivée,
– ou partir les chercher, après avoir balisé le terrain (pour le reconnaître) et surtout le dernier point de disparition de la victime.

Vous êtes plusieurs

Il faut :

– nommer *un chef d'opération* qui coordonnera les recherches, mais si possible n'y participera pas. Il s'agit du plus expérimenté ou du plus calme ; il doit *faire très rapidement un diagnostic* de la situation, à partir de la taille de l'avalanche, de sa nature, du nombre de sauveteurs disponibles et du *nombre de victimes ensevelies* ;
– mettre en place un *guetteur* pour avertir dans le cas où une deuxième avalanche se produit ;
– si vous êtes assez nombreux, envoyer 1 (ou mieux 2) personne(s) donner l'alerte (ou la donner directement si vous avez une radio) ; sinon chercher vivement pendant 15 minutes puis, en l'absence de résultat, alerter ;
– faire un dépôt de votre matériel pour qu'il n'y ait pas de confusion avec les objets perdus par les victimes ;
– marquer l'endroit où la victime a été vue pour la dernière fois (dernier point de disparition) ;
– commencer les recherches en aval du dernier point de disparition de la victime, et dans les zones préférentielles (replats, creux, amont des rochers, des arbres, bordures de l'avalanche) ;
– regarder pour découvrir des indices de surface (ski, bâton, gant, chaussure, sac à dos, etc.) ;
– écouter pour entendre des cris, des coups de sifflets, etc.
– chercher avec votre ARVA (voir § 3.3, ci-après) ;
– effectuer un sondage de fortune (sondes, bâtons-sondes, bâtons, skis, etc.) ;
– marquer les endroits où vous découvrez des objets perdus par les victimes et les sonder ;
– se souvenir que l'approche de l'avalanche se fait, si on arrive par l'amont, dans la trace de l'avalanche(pour éviter de faire partir une deuxième avalanche sur les bords de la première), ce qui permet de récupérer les objets perdus par les victimes et d'en marquer l'emplacement ;
– à l'arrivée des secours, vous mettre à leur disposition.

Un élément déterminant pour la rapidité de la recherche est une bonne estimation du type de terrain à parcourir. Le plus souvent, la progression se fait à pied (avalanche de gros blocs), mais il se peut qu'elle soit plus rapide à skis, avec ou sans peaux (avalanche de neige sans cohésion sans zone de dépôt dur). Le sens de progression (vers l'amont ou vers l'aval) dépend de la position du chercheur par rapport à l'avalanche. Un bon choix permet, outre la rapidité d'intervention, de ne pas arriver épuisé au moment où il faut commencer à creuser. Une recherche en avalanche doit se faire en silence. Il faut éviter tout commentaire pessimiste sur les chances de survie de l'enseveli. Si ce dernier se trouve à une faible profondeur et s'il est resté conscient, il peut entendre ces propos défaitistes, très mauvais pour son moral.

1. Mais pas plus d'un quart d'heure, pour que les secouristes professionnels puissent intervenir le plus vite possible, et ainsi avoir quelques chances de retrouver la victime vivante.

Dégagement et évacuation

Une fois la victime localisée avec le maximum de précision, il faut sonder. En terrain raide, bien sonder de façon perpendiculaire à la pente (et non verticalement). Il est également préférable de sonder avec des gants : on ne se refroidit pas les mains, et on ne réchauffe pas la sonde (qui pourrait se mettre à coller à la neige). Sonder avec fermeté mais précaution, pour ne pas blesser la victime d'un coup de sonde éventuellement trop fort et mal placé. Lorsque la victime est définitivement localisée avec précision et la profondeur d'ensevelissement connue grâce à la sonde, il faut laisser la sonde en place (qui marque avec précision le lieu d'ensevelissement) et creuser. Pour être efficace, pelleter calmement et régulièrement. Plus la victime est ensevelie profondément, plus le trou doit être large. Au fur et à mesure que l'on se rapproche de la victime, il faut éviter les coups de pelle brutaux qui pourraient la blesser.

Dans la mesure du possible, il faut dégager sa tête et son thorax en premier. Si son état semble satisfaisant et s'il y a d'autres victimes ensevelies, les rechercher pour les dégager à leur tour. Pour dégager une victime d'avalanche, on doit opérer avec rapidité mais également avec beaucoup de précaution car elle risque de souffrir de fractures, y compris de la colonne vertébrale. En l'absence, très probable, de médecin, on doit être capable de porter les premiers secours à une victime d'avalanche, qui peut être à la fois en état d'asphyxie, polytraumatisée et souffrir d'hypothermie. Il importe en particulier de lui libérer au plus vite les voies aériennes et d'entreprendre aussitôt le bouche-à-bouche si elle ne respire plus. La phase de dégagement et d'évacuation d'une victime d'avalanche est généralement prise en charge par des secouristes professionnels. Si pour diverses raisons (éloignement, mauvaises conditions météorologiques...), cela n'est pas possible, il faut se souvenir que cette phase peut aussi être à l'origine d'un nouveau risque d'issue fatale, par manque de soins appropriés. La pratique de la montagne hivernale requiert donc également des connaissances en secourisme, pour assurer le maintien ou l'amélioration de l'état de santé d'une victime d'avalanche, en attendant les secours organisés.

Actuellement, en France, 98 % des évacuations se font par hélicoptère. C'est en effet la solution la plus rapide et la plus sûre. Il faut alors déterminer l'emplacement de la DZ (aire d'atterrissage de l'hélicoptère) : plate et dégagée, pour que les ailes du rotor puissent tourner sans entrave. Quand l'hélicoptère arrive, il faut se placer face à la DZ, dos au vent, les bras levés vers le ciel en Y. Surtout, ne bougez pas lorsque la machine s'approche; restez sur place sans reculer et accroupissez-vous quand elle se pose. Si vous devez aller vers l'hélicoptère, rappelez-vous qu'il doit toujours être approché par l'avant.

Si les conditions météorologiques empêchent l'utilisation de l'hélicoptère et si l'état de la victime le permet, l'évacuation sera faite par une caravane terrestre de sauveteurs ou par les camarades de la victime, grâce à un traîneau démontable, ou à un traîneau de fortune (fait par exemple avec des skis, des bâtons et une pelle à neige). Toutefois, l'attente dans un lieu sûr (refuge, voire igloo) constitue parfois une bonne solution.

2.3. La recherche à l'ARVA [7]

L'ARVA, grâce à la possibilité qu'il offre d'être utilisé immédiatement après un accident, est le seul appareil susceptible de permettre, avec un maximum de chances de succès, le dégagement d'une victime dans le *quart d'heure vital.* Raison de plus pour ne pas perdre de temps dans la mise en œuvre des recherches à l'ARVA. D'où ce paragraphe qui lui est spécialement consacré. Tous les appareils doivent passer en position "réception". Les personnes inefficaces ou affolées doivent être mises en lieu sûr avec leur ARVA éteint, afin de ne pas pertur-

ber les recherches. L'organisation doit ensuite être rapide et méthodique, ce qui suppose que l'on ait fait au préalable de nombreux exercices de façon à acquérir les automatismes. Sauf en cas de très grosse avalanche, un grand nombre de sauveteurs n'est pas synonyme d'efficacité. Il vaut mieux un ou deux sauveteurs bien entraînés que cinq ou six personnes désordonnées et paniquées qui se gênent.

Si plusieurs personnes font une recherche simultanée, il peut être préférable d'utiliser les écouteurs plutôt que les haut-parleurs afin de ne pas être gêné par l'écho d'un autre sauveteur (la concentration sera facilitée). Dans le cas d'une zone de recherche d'une certaine ampleur (plus de 20 à 30 mètres de largeur), il faut la balayer de façon systématique et méthodique, en la découpant en bandes longitudinales d'une largeur correspondant au double de la portée minimum supposée des appareils. Si celle-ci n'est pas connue avec précision, on adoptera le principe pessimiste d'une portée de 10 mètres (soit un espacement d'une vingtaine de mètres entre deux chercheurs).

A partir de la perception du premier signal, on a intérêt à faire la recherche à pied car les déplacements sont moins longs. S'il y a plusieurs ensevelis, il faut éteindre l'appareil d'une personne ensevelie dès qu'elle est dégagée, pour éviter de perturber la recherche des autres disparus. Et si on n'a pas d'ARVA ? La question ne devrait jamais se poser. On peut toutefois imaginer des scénarios-catastrophes dans lesquels les membres d'un groupe seraient confrontés à ce genre de situation (ARVA en panne, oublié par mégarde ou éteint). Dans ce cas, la seule solution consiste à organiser un sondage de fortune de l'avalanche avec les moyens du bord (bâtons, skis...).

2.4. L'alerte [8,9]

Voilà un point qui est bien souvent négligé, mais qui est fondamental pour un bon déroulement de l'opération de secours. Nombreuses sont les équipes de secouristes qui ont perdu de précieuses minutes à essayer de retrouver le lieu de l'accident, ou qui n'avaient pas le matériel médical adapté, faute de bons renseignements. Les quelques minutes passées à bien renseigner les secouristes leur feront gagner beaucoup de temps et leur permettront d'être plus efficaces.

2.4.1 Décrire avec précision le lieu de l'accident

Il faut donner :

- nom du lieu ou point le plus proche (sommet, col, lac, refuge...) nommé sur la carte, nom du massif, de la commune la plus proche : il s'agit d'être le plus précis possible ;
- altitude, exposition et versant ;
- coordonnées géographiques précises, relevées sur la carte ;
- points caractéristiques et repères situés à proximité du lieu de l'accident ;
- éventuellement balisage laissé sur place (camarades, anorak, ski, sac à dos), mais qui ne devra pas s'envoler à l'approche de l'hélicoptère, ni être recouvert de neige en cas de précipitations, ou de transport de neige par le vent.

2.4.2 Évaluer avec exactitude la demande de secours

Il faut évaluer :

- nombre de personnes ensevelies à rechercher, durée de l'ensevelissement déjà subi, équipement de ces personnes (habillement, ARVA, Recco) ;
- nombre de blessés non ensevelis ou déjà dégagés ;
- pour chaque blessé : répond-il ? peut-il bouger tous ses membres ? saigne-t-il ? respire-t-il ? a-t-il un pouls ? soins éventuellement déjà prodigués ; âge et sexe.

2.4.3 Renseignements complémentaires

On doit également donner :

- n° de téléphone, ou fréquence radio, et identité de l'appelant ;
- heure, nature et circonstances de l'accident ;
- présence d'un professionnel de la montagne ou des secours sur place ;
- pour l'hélicoptère :
- météo sur le site de l'accident (vent, visibilité, altitudes inférieure et supérieure des nuages en cas de mer de nuage), peut-il se poser (surface plane, dégagée et sans câbles) ou faut-il prévoir un treuillage ?
- les blessés peuvent-ils attendre en sécurité le lendemain (si c'est le soir), ou une éclaircie (en cas de mauvais temps) ?

3. L'ORGANISATION DES SECOURS

3.1. Les différents acteurs

L'étude des chances de survie (§ 1.2) montre que, seuls des secours organisés immédiatement après l'accident garantissent le maximum de succès. Par conséquent, seules des personnes sur place au moment de l'accident et capables d'entreprendre des recherches efficacement permettront de retrouver vivantes, avec un maximum de chances, des victimes ensevelies sous la neige. De ce fait, les premiers acteurs (au sens chronologique) d'un secours sur un accident d'avalanche sont les rescapés ou les témoins de l'avalanche. Ils seront aussi les premiers en terme d'efficacité (toutes choses étant égales par ailleurs), puisqu'ils peuvent commencer les recherches sans délai. Toutefois, les rescapés ou les témoins ne sont pas toujours équipés du matériel de recherche de victimes d'avalanches, et ils peuvent être choqués par l'accident qu'ils viennent de vivre. Par conséquent, leur efficacité réelle est souvent bien inférieure à leur efficacité théorique. De plus, il se peut qu'il n'y ait pas de témoin sur place. C'est à ces occasions qu'il est fait appel à des secouristes professionnels. Montagnards confirmés, parfaitement entraînés physiquement et techniquement (beaucoup d'entre eux sont guides de haute montagne), ils sont également formés aux techniques spécifiques du sauvetage et du secourisme, adaptées aux terrains particuliers que constituent la moyenne et la haute montagne, avec leurs risques propres tels que l'avalanche.

Les secours appartiennent aux unités spécialisés de la gendarmerie (peloton de gendarmerie de haute montagne) et des CRS (CRS des Alpes, CRS n° 6, 29, 58). Dans plusieurs départements de montagne, ces deux services publics assurent une permanence hebdomadaire à tour de rôle, et sont donc les premiers contactés en cas d'accident d'avalanche. Il faut naturellement leur associer leurs collègues des formations aériennes de la gendarmerie ("les hélicos bleus") et des moyens aériens de la Sécurité Civile ("les hélicos rouges"). Sont également secouristes professionnels, spécialement formés aux techniques de recherche de victimes d'avalanche, les pisteurs-secouristes des services de sécurité des stations de ski. Ils interviennent tout particulièrement lorsqu'un accident se produit à proximité du domaine skiable sur lequel ils travaillent habituellement. Mais ils interviennent aussi naturellement sur n'importe quel accident d'avalanche, en cas de besoin. À ces deux catégories, dont le secours en avalanche est une des missions, viennent s'ajouter d'autres secouristes professionnels tels que les pompiers, mais aussi les troupes armées de montagne et enfin tous les bénévoles, guides, moniteurs de ski, particuliers, etc.. N'oublions pas non plus les hélicoptères du Secours Aérien Français. Il n'est pas rare que plus de 150 personnes soient mobilisées sur un accident d'avalanche, et il est alors fait appel à toutes les compétences.

3.2. Les moyens de recherche de victimes d'avalanche

Les moyens de détection d'une victime d'avalanche, permettent de localiser l'endroit où elle se trouve. Ils sont relativement diversifiés. Tous ont des avantages et des inconvénients, et aucun n'est parfait [10]. Certains sont d'utilisation immédiate (yeux, oreilles, sondes, ARVA), d'autres nécessitent l'intervention des secours organisés (chiens, Recco, sondes). Les premiers sont théoriquement les plus efficaces, grâce au gain de temps qu'ils assurent par rapport aux seconds. Mais à part l'ARVA, leur efficacité n'est pas garantie. Quant à l'ARVA, la victime doit en être équipée, ainsi que le sauveteur, qui de plus doit être entraîné à son maniement. Le matériel nécessaire à une bonne opération de secours ne se limite pas aux moyens de détection, il est en fait beaucoup plus diversifié :

- matériel nécessaire à l'acheminement des secours (hélicoptères, chenillettes, motoneiges) ;
- matériel nécessaire aux communications (téléphone, radios, etc.) ;
- matériel nécessaire à l'opération de secours (ARVA, porte-voix, pelles, sondes, éclairages, matériel de balisage, dont le sac avalanche qui contient des fanions à la signification standardisée, tentes, traîneaux, etc.).

3.2.1. Les yeux et les oreilles

Il s'agit de rechercher, avec les yeux, les parties du corps ou de l'équipement de la victime qui dépassent de la surface de la neige, ou d'écouter les signaux acoustiques (cris, sifflets) émis par la victime. Ces détections visuelle et auditive sont trop souvent oubliées. Elles sont pourtant le premier moyen de détection d'une personne partiellement enfouie sous la neige. Cette technique de recherche doit être mise en œuvre systématiquement : même elle est *inefficace pour les victimes totalement ensevelies* (les sons traversent difficilement la neige quand ils sont émis par une personne ensevelie), c'est *la plus efficace pour les autres.* Statistiquement, il permet donc de retrouver des victimes vivantes, car leur temps d'ensevelissement est très court (elles sont découvertes très rapidement après l'accident, et se trouvent à des profondeurs généralement faibles). Mais cela ne concerne que les personnes partiellement ensevelies !

Avantages	Inconvénients
– recherche immédiate possible – système très simple à mettre en œuvre et à utiliser – sauf handicap particulier, tout le monde peut faire une recherche auditive et visuelle – système qui permet de rechercher toute personne sans exclusion aucune	– les victimes complètement ensevelies ne sont pas visibles – les bruits émis sous la neige ne la traversent que difficilement – l'efficacité de ce type de recherche est très fortement diminuée en cas de mauvaise visibilité (nuit, brouillard, tempête de neige), et de bruit extérieur (vent, remontées mécaniques, etc.)

3.2.2. Les sondes

Une sonde est une longue tige que l'on enfonce dans la neige. Si un corps humain se trouve sous la neige à l'endroit où la sonde est enfoncée, il va s'opposer à l'enfoncement de la sonde. Le contact qui en résulte signale au secouriste la présence de la victime. En absence d'ARVA, un sondage dans les zones de dépôt préférentielles doit être fait immédiatement après l'accident, simultanément à une recherche visuelle et auditive, même si ses résultats sont aléatoires. Les secours organisés utilisent aussi ce système de façon systématique, ce qui en diminue le caractère aléatoire. Ainsi, le sondage permet de localiser une victime très peu de temps après l'accident d'avalanche (par les témoins ou rescapés, mais cela est très rare), et les chances sont grandes de lui sauver la vie, ou bien il est



Une vague de sondeurs à l'exercice.
Document ANENA. Cliché Véronique Place

mis en œuvre par les secours professionnels après un certain temps, et la victime sera statistiquement déjà décédée. Une sonde peut revêtir différents aspects :

- sonde de fortune : bâton de ski dont on a enlevé la rondelle, talon du ski ;
- bâton-sonde : bâton de ski télescopique, dont on enlève les rondelles et que l'on met bout à bout ; la sonde ainsi obtenue peut faire selon les modèles jusqu'à 3 m ;
- sonde pliable et légère : elle est composée de plusieurs éléments mis bout à bout ; selon les modèles elle peut mesurer jusqu'à 3 m ; son manque de rigidité fait que son trajet dans la neige peut ne pas être rectiligne et être à l'origine de confusions ;
- sonde rigide : elle est métallique et plus rigide que la précédente ; son poids et son encombrement font qu'elle n'est utilisée que par les équipes de secouristes professionnels ; elle mesure 4, 5 ou 6 mètres.

Avantages	Inconvénients
– recherche immédiate possible – système simple à mettre en œuvre et à utiliser – système que tout le monde peut utiliser et avoir (prix non prohibitif) – système qui permet de rechercher toute personne sans exclusion	– recherche très lente, surtout s'il y a peu de sauveteurs (une vague de 15 sondeurs met environ 4 à 5 heures pour sonder un hectare) – nécessité d'avoir une sonde (ou au moins un bâton-sonde) avec soi – profondeur limitée à la taille de la sonde – facteur d'incertitude non négligeable

3.2.3. Les ARVA

Les Appareils de Recherche de Victimes d'Avalanche sont des émetteurs récepteurs, fonctionnant sur la fréquence 457 kHz, normalisée à l'échelle européenne, et également adoptée en Amérique du Nord. Ils ont été largement présentés au chapitre n° 8 (voir aussi [7]). Rappelons donc seulement que, sans être parfaits, *ils sont, en 1998, les appareils les plus efficaces pour retrouver une victime*

d'avalanche totalement enfouie sous la neige, quand ils sont utilisés par les témoins ou rescapés de l'accident, c'est-à-dire sans délai après l'accident, et à la condition que ces derniers soient entraînés à son utilisation et équipés individuellement d'une pelle et d'une sonde. Ils sont également utilisés par les secours organisés.

Avantages	Inconvénients
– c'est l'appareil qui, associé à une pelle et une sonde, garantit le maximum de chances de retrouver une victime ensevelie sous la neige, vivante, en limitant au maximum sa durée d'ensevelissement, par : - une recherche immédiate possible - une recherche très rapide : une personne entraînée met environ 5 minutes pour localiser une victime	– la victime et le sauveteur doivent tous les deux être en possession d'un ARVA (qui coûte environ 1 500 F), en état de marche, avec des piles en bon état – l'ARVA de la victime doit être en position "émission" – le sauveteur doit être entraîné à l'utilisation de son ARVA (en connaître le fonctionnement et savoir faire une recherche rapide)
– petite taille (même volume que deux paquets de cigarettes) et faible poids (200 g environ)	– un ARVA sans pelle ne sert à rien ; le gain de temps dû à la localisation grâce à l'ARVA sera annulé par la perte de temps due au dégagement de la neige à la main ou au ski ; un ensemble pelle et sonde coûte plus de 500 F

3.2.4. L'émetteur simple

L'émetteur simple émet des ondes électromagnétiques sur la fréquence normalisée (457 kHz) à l'échelle européenne pour les ARVA. Mais, à la différence de l'ARVA, il n'est pas récepteur. Il est donc totalement à proscrire pour la pratique du ski de randonnée. En effet, l'éloignement et l'isolement des skieurs pendant leur randonnée les obligent à être complètement autonomes en cas d'accident d'avalanches : les rescapés doivent pouvoir retrouver les victimes ensevelies sans faire appel aux secouristes professionnels, dont le délai d'intervention est généralement fatal aux victimes.

Avantages	Inconvénients
– parfaitement compatible avec les ARVA et permet donc à son porteur, enseveli sous la neige, d'être retrouvé grâce à un ARVA en position réception – moins cher que l'ARVA et plus petit que l'ARVA.	– ne sert à rien si les témoins ou rescapés ne sont pas équipés d'au moins un ARVA – la portée d'un émetteur simple semble être inférieure à celle d'un ARVA, ce qui est de nature à perturber les recherches – les modèles actuels ne disposent pas d'un système de contrôle de l'état des piles : comment savoir combien de temps elles vont encore fonctionner ? – la confusion éventuelle entre un émetteur simple et un ARVA pourrait avoir des conséquences dramatiques, puisque toute recherche est impossible avec un émetteur simple.

3.2.5. Le Recco

Le Recco est un système électronique appartenant à la catégorie des répondeurs passifs, composé d'un détecteur et d'un réflecteur. Le détecteur émet une onde électromagnétique (de fréquence 917 MHz), qui est réfléchie par le réflecteur (ou répondeur, fonctionnant sans apport d'énergie, donc passif) et renvoyée (avec une fréquence double 1 834 MHz) vers le détecteur qui la convertit en onde sonore : un "bip" signale la détection effective d'un réflecteur. Les réflecteurs sont portés par les skieurs, intégrés à leurs vêtements ou chaussures, ou collés par eux-mêmes sur leurs chaussures. Mais les détecteurs sont destinés aux secouristes professionnels, spécialement formés à leur utilisation. De ce fait, ce système est à proscrire absolument pour la pratique du ski de randonnée, pour laquelle le temps d'intervention des secours organisés est fatal à la victime (sauf cas très particulier). Il ne concernerait donc que les pratiquants du ski (et autres glisses) hors-piste et les services de sécurité des pistes des stations de ski. Toutefois, même à proximité des domaines skiables, le Recco ne garantit absolument pas d'être retrouvé vivant sous une avalanche.

Avantages	Inconvénients
– tout skieur peut s'équiper d'un réflecteur et donc être potentiellement localisable (condition nécessaire mais non suffisante) – pas de risque d'oubli de mise en route, de mauvaise utilisation ou de panne du réflecteur : il fonctionne en effet sans apport d'énergie	– le Recco ne peut détecter qu'une personne équipée de réflecteurs. – le délai de mise en œuvre opérationnelle du Recco ne permettra, le plus souvent, que de retrouver des victimes décédées, même pour un accident ayant eu lieu à proximité d'une station de ski – un certain nombre de stations de ski françaises ne sont pas équipées de détecteurs – il faut porter au moins 2 réflecteurs pour être détectable : la détection n'est plus possible en cas de perte de réflecteurs, de chaussures ou en cas de vêtements non équipés de réflecteurs – les réflecteurs perdus et ceux portés par les secouristes eux-mêmes peuvent être à l'origine de confusions et de perte de temps dramatiques lors de recherches – la portée du détecteur peut être très réduite (neige humide ou corps recouvrant les réflecteurs), d'autant plus que la victime est profondément ensevelie – il peut y avoir des interférences entre le système Recco et les équipements de bord des hélicoptères éventuellement utilisés – dans certains cas (acheminement des secours par hélicoptère), il peut y avoir concurrence avec d'autres moyens de recherche, moins sélectifs, tels que le chien (qui faire monter en premier dans l'hélicoptère ?) – la confusion éventuelle entre le Recco et un ARVA pourrait avoir des conséquences dramatiques

3.2.6. Le chien d'avalanche

Apparu dans les années cinquante, le chien, dressé à la recherche de victimes d'avalanche, est actuellement le moyen le plus efficace pour localiser une personne sous la neige et qui n'est pas équipée d'un système particulier de détection (ARVA ou Recco) [12]. Il localise la victime grâce à son flair. Il faut associer au chien son maître dont la présence est indispensable : le chien recherche une victime pour faire plaisir à son maître. Les deux sont indissociables : on parle d'équipe cynophile.

Avantages	Inconvénients
– une fois sur le lieu de l'avalanche, le chien a une grande vitesse de prospection (1 ha en 20 minutes) – il peut rechercher toute personne sans exclusion aucune (pas besoin d'un équipement particulier)	– le délai de mise en œuvre opérationnelle de l'équipe cynophile ne permettra, le plus souvent, que de retrouver des victimes décédées, même pour un accident ayant eu lieu à proximité d'une station de ski – la formation et la "maintenance" du caractère opérationnel de l'équipe cynophile sont coûteuses et contraignantes – en fonction de certaines qualités de neige et de la profondeur d'ensevelissement de la victime, les odeurs peuvent avoir de la peine à remonter, entravant l'action de recherche du chien

3.2.7. Le ballon avalanche ABS

Le ballon ABS est porté par le skieur sur un sac à dos. En cas d'accident, la victime tire sur une poignée et provoque le gonflement d'un ballon orange de 150 litres ou de deux ballons de 75 litres chacun, grâce auxquels elle reste en surface de l'avalanche. Les quelques cas réels d'utilisation et des tests avec mannequins semblent montrer une bonne efficacité.

Avantages	Inconvénients
– permet à la victime de ne pas être ensevelie sous la neige – la victime peut se retrouver sous son ballon, dans l'impossibilité de se dégager sans aide extérieure, le ballon sert alors de moyen de visualisation très rapide, avec tous les avantages liés à la détection visuelle	– il peut y avoir un défaut technique de fonctionnement empêchant le gonflement du ballon ; – si une deuxième avalanche se produit juste après la première, ou si l'avalanche continue de s'écouler après l'arrêt de la victime et de son ballon, ces derniers peuvent être totalement recouverts par de la neige, et donc invisibles – le ballon ABS est très cher (6 000 FF pour un particulier) – le gonflement du ballon nécessite une participation active de la personne emportée (tirer sur une poignée) ; les quelques cas réels d'utilisation montrent que ce geste n'est pas automatique et nécessite un certain entraînement mental – son poids est de 2 kg environ



Chien d'avalanche au travail : il recherche une victime pour faire plaisir à son maître.
Document ANENA. Cliché Didier Midavaine.

3.3. Déroulement des opérations

Les secours relèvent du directeur des opérations de secours, qui est le maire de la commune concernée ou le préfet du département dans lequel l'accident s'est passé, selon les dispositions de la loi du 22 juillet 1987. C'est sous son autorité qu'un chef des opérations des secours détermine, coordonne et met en œuvre les moyens nécessaires pour rechercher, découvrir et secourir, dans les meilleures conditions, les victimes.

3.3.1. L'alerte

Deux cas se présentent : l'accident d'avalanche a eu lieu à proximité d'une station de ski ou non. Dans le premier cas, l'alerte est généralement donnée aux pisteurs-secouristes du service de sécurité de la station. Dans le deuxième cas, l'accident a eu lieu en montagne, loin des centres de secours ; ce sont les gendarmes des PGHM ou les CRS de montagne qui reçoivent l'alerte. En effet, selon le principe de l'alternance hebdomadaire qui prédomine dans la plupart des départements de montagne, l'un ou l'autre de ces services est de permanence, tandis que le second s'entraîne. Même dans le premier cas, les secouristes des services publics (PGHM ou CRS) sont prévenus, de même que les autorités concernées : maire, préfet, police, gendarmerie voire parquet. Toutefois, l'arrivée sur zone des services publics de permanence dessaisit de fait l'autorité communale de sa fonction de chef d'opération. En fonction de la facilité d'accès du lieu de l'accident, les secours sont acheminés par hélicoptères, chenillettes, remontées mécaniques, ou doivent monter en peaux de phoques (ceci rallonge alors le temps d'intervention des secouristes, mais l'hélicoptère, malgré les prouesses des pilotes, ne peut pas toujours voler).

3.3.2. La montée en puissance des moyens de secours

À son arrivée sur les lieux de l'avalanche, le chef des opérations prend la direction du secours, conformément au plan de secours départemental mis en place par le préfet :

- il recueille les renseignements des témoins et éventuellement des pisteurs secouristes déjà arrivés sur les lieux ;
- il s'informe du travail réalisé ;
- il analyse la situation ;
- il organise la suite de l'intervention, en fonction des conditions de l'accident et des moyens dont il sait pouvoir bénéficier ; il devra adapter le "plan type" aux conditions locales particulières, avec un seul souci, découvrir au plus vite les victimes ensevelies sous la neige.

L'organisation de l'espace est ainsi très stricte :

- mise en place d'un secrétariat et contrôle des ARVA ;
- emplacement et préparation de la DZ (aire d'atterrissage de l'hélicoptère) ;
- mise en place d'un guetteur, si le danger est persistant ;
- dépôt du matériel ;
- délimitation d'une zone de repli ;
- balisage de l'avalanche (limite de l'extension de l'avalanche, signalement des emplacements d'indices matériels, etc.) ;
- installation d'un poste médical avec un médecin.

La ou les équipe(s) cynophile(s) intervien(nen)t en priorité, de façon à pouvoir travailler sur une avalanche "non souillée" par les déplacements des premiers secouristes. La présence de plusieurs équipes cynophiles permet de les faire travailler à tour de rôle (ou simultanément si la surface du dépôt de l'avalanche est importante). Mais tous les moyens précédemment cités sont également mis en œuvre pour retrouver toutes les victimes :

- inspection visuelle ;
- recherche avec les ARVA ;
- sondages.

Les sondages se font par vague de 20 sauveteurs maximum : les sondeurs sont en rang, au coude à coude, et font face à l'avalanche. Chaque vague est dirigée par un chef de groupe, et possède 2 pelleteurs. Il existe deux types de sondage :

- le sondage rapide, où un coup de sonde est donné tous les 75 cm latéralement, pour 70 cm en progression ;
- le sondage minutieux, où un coup de sonde est donné tous les 25 cm latéralement, pour 30 cm de progression.

Si le deuxième est naturellement plus fin, il est également beaucoup plus long :

- sondage rapide : il faut 4 heures à 20 hommes pour balayer 1 ha ;
- sondage minutieux : il faut 20 heures à 20 hommes pour balayer 1 ha.

C'est le chef d'opération qui décide de la méthode à appliquer, en fonction de la situation, des renseignements et des moyens dont il dispose. Après un sondage rapide, il pourra refaire passer les chiens, car le sondage facilite la diffusion des odeurs. Au fur et à mesure de l'avancement des recherches, un jalonnement est mis en place qui va permettre aux secouristes de lire l'état des recherches : des jalons de forme et de couleurs différentes signalent chaque point remarquable sur l'avalanche : indices matériels, foyer d'odeur marqué par un chien, limite de la zone inspectée, etc. Ces jalons sont standardisés et sont contenus dans

le "sac avalanche". Quand la victime est dégagée, elle est immédiatement prise en charge par un médecin, et si son état l'autorise et le nécessite, elle est évacuée vers un centre hospitalier. Un secours sur un accident d'avalanche est une opération complexe qui fait intervenir des acteurs nombreux et diversifiés, et qui demande une excellente coordination entre tous pour gagner cette course contre la montre qu'est le sauvetage d'une victime d'avalanche.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] F. VALLA et F. SIVARDIÈRE, *Évolution des accidents d'avalanche en France de 1971 à 1994*, Actes du symposium ANENA, mai-juin 1995 (1995, ANENA, Antony) 13-18.
[2] F. VALLA : *Accidents d'avalanches dans les Alpes au cours de la décennie 1975-1985*, AIHS Publication **162** (1987) 647-652.
[3] C. FORGET : *Ces rescapés restés ignorés*, Neige et Avalanches **64** (1993) 14-19.
[4] F. VALLA : *Les accidents d'avalanche en France au cours des 20 dernières années*, Université Européenne d'Été sur les risques naturels, Chamonix, septembre 1992 (1995, Cemagref, Antony) 195-205.
[5] H. BRUGGER et M. FALK : *Les quatre stades de l'ensevelissement sous une avalanche*, Neige et Avalanches **65** (1994) 14-18.
[6] J. ZELLWEGER : *L'avalanche, témoignage du curé d'Huez*, Neige et Avalanches **10** (1975) 32-38.
[7] ANENA : *ARVA, mode d'emploi* (1997, ANENA, Grenoble) 24 p.
[8] F. VALLA : *Attention avalanche*, Rapport (1991, Cemagref, Grenoble).
[9] D. PIVOT : *Quand l'avalanche est là*, Montagnes Magazine **187** (1995) 84-87.
[10] BUREAU SUISSE DE PRÉVENTION DES ACCIDENTS : *Systèmes de sauvetage des victimes d'avalanche*, Rapport (1989, BSPA, Berne).
[11] F. SIVARDIÈRE et J.-P. ZUANON : *Le ballon avalanche ABS, que faut-il en penser?*, Neige et Avalanches **72** (1995) 8-11.
[12] J.-P. GOUZON : *Les chiens d'avalanche*, Neige et Avalanches 71 (1995) 8-12.
[13] M. ALLIBERT : *La sécurité en montagne* (textes et documents), Rapport (1988, CDTM, Grenoble).
[14] P. POULET et C. RAYLAT : *Secours en montagne*, (1994, Didier Richard, Grenoble) 126 p.

Chapitre 13
AVALANCHE ET RESPONSABILITÉ*

Parmi les risques que les skieurs de montagne et les skieurs hors-piste font courir aux autres, celui du déclenchement d'avalanche est le plus grave. De plus en plus nombreux sont les skieurs qui n'ont jamais pratiqué la montagne en dehors des pistes de ski et qui souhaitent connaître autre chose. L'activité du ski de piste amène, sur des itinéraires de montagne, un certain nombre de skieurs qui n'ont jamais eu de contact avec celle-ci et dont quelques-uns réaliseront difficilement que la neige qu'ils rencontrent n'a aucun rapport avec le matériau qu'ils ont connu sur les pistes. C'est ainsi que chaque année, des skieurs, plus rarement des alpinistes, sont victimes d'avalanches dans l'exercice de leur sport favori ; mais il faudrait ajouter aussi ceux qui, dans leur vie quotidienne peuvent être les victimes d'avalanche lorsque celles-ci détruisent maisons et routes.

Lorsque l'accident a eu lieu, il est légitime de rechercher quelles en sont les causes et par conséquent s'il peut être imputable à un comportement humain fautif dans un but répressif certes, mais aussi et surtout dans le dessein de réparer les préjudices causés aux victimes ou, en cas de décès, à leurs ayants cause. Et c'est alors que s'ouvre la phase judiciaire des conséquences de l'accident qui aura en outre pour but, par l'analyse des faits et des comportements que feront les juges, avec l'aide des experts, tous spécialistes de haut niveau (guides, moniteurs, scientifiques), de faire ressortir les fautes commises, ce qui pourra servir de références ou à constater que, malgré tel comportement, si du moins des victimes sont en cause, celles-ci ne pouvaient échapper à leur sort, aucune faute n'ayant été établie. Il paraît utile de rappeler brièvement et le plus simplement possible, les principes généraux de la responsabilité et les conséquences judiciaires et juridiques qui en découlent.

1. LES FONDEMENTS DE LA RESPONSABILITÉ

C'est généralement la faute qui doit être envisagée sous ses deux aspects : *faute pénale* (infraction à la loi pénale) ou *faute civile* (manquement à une règle de bonne conduite ou à une obligation contractuelle) ; (art. 1382, 1383 et 1148 du Code civil).

1.1. La faute pénale

Pour ce qui concerne les accidents, il s'agit de la faute involontaire constitutive des délits de blessures et d'homicides involontaires retenus par les articles 222-19 et 221-6 du nouveau Code pénal.

Art. 222-19.- « Le fait de causer à autrui, par maladresse, imprudence, inattention, négligence ou manquement à une obligation de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements, une incapacité totale de travail pendant plus de trois mois est puni de deux ans d'emprisonnement et de 200 000 F d'amende. En cas de manquement délibéré à une obligation de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements, les peines encourues sont portées à trois ans d'emprisonnement et à 300 000 F d'amende ».

* Par Pierre SARRAZ-BOURNET

Art. 221-6.- « Le fait de causer par maladresse, imprudence, inattention, négligence ou manquement à une obligation de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements, la mort d'autrui constitue un homicide involontaire puni de trois ans d'emprisonnement et de 300 000 F d'amende. En cas de manquement délibéré à une obligation de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements, les peines encourues sont portées à cinq ans d'emprisonnement et à 300 000 F d'amende. »

Il faut ajouter à ces incriminations un délit nouveau consacré par les dispositions de l'article 223-1 du nouveau Code pénal.

Art. 223-1.- "Le fait d'exposer directement autrui à un risque immédiat de mort ou de blessure de nature à entraîner une mutilation ou une infirmité permanente par la violation manifestement délibérée d'une obligation particulière de sécurité ou de prudence imposée par la loi ou les règlements est puni d'un an d'emprisonnement et de 100 000 F d'amende".C'est dans ces conditions que des surfeurs ont été condamnés par le tribunal correctionnel de Gap le 12 février 1998 pour avoir déclenché une avalanche sur le domaine skiable de Montgenèvre alors qu'une dizaine de skieurs évoluaient sur des pistes en contrebas. (Le tribunal de Nice avait pris une décision identique quelque temps auparavant.) Ils ont été condamnés à une amende de 10 000 F et interdits de glisse pendant un an sur toutes les stations françaises.

Art. 222-21. - "Les personnes morales peuvent être déclarées responsables pénalement (...) des infractions définies aux articles 222-19 et 222-20." (homicide et blessures par imprudence).

Art. L 121-2. - "Les personnes morales à l'exclusion de l'État sont responsables pénalement selon les distinctions des articles 121-4 et 121-7 et dans les cas prévus par la loi ou le règlement des infractions commises pour leur compte par leurs organes ou représentants. Toutefois des collectivités territoriales et leurs groupements ne sont responsables que des infractions commises dans l'exercice d'activités susceptibles de faire l'objet de convention de délégation de service public."

La loi du 13 mai 1996 a atténué la responsabilité des maires et élus locaux en précisant que les poursuites ne peuvent avoir lieu que "s'il est établi qu'il (l'élu) n'a pas accompli les diligences normales compte tenu de ses compétences, du pouvoir, et des moyens dont il disposait ainsi que des difficultés propres aux missions que la loi lui confie". Les mêmes dispositions ont été prises pour les élus de conseils généraux et régionaux.

1.2. La faute civile

Elle peut être commise par une personne à l'égard d'une autre personne qui est un tiers pour elle à laquelle ne l'attache aucun lien de droit ou bien encore à l'occasion de l'exécution d'un contrat. Contrairement à la faute pénale, qui constitue par elle-même un fait dont l'auteur est puni par la loi, elle n'est prise en considération que s'il y a dommage. On distingue la faute délictuelle (ou quasi-) et la faute contractuelle.

1.3. La faute délictuelle ou quasi-délictuelle

Le siège de la matière se trouve dans les articles 1382 et 1383 du Code civil.

Art. 1382.- « Tout fait quelconque de l'homme, qui cause à autrui un dommage, oblige celui par la faute duquel il est arrivé à la réparer ».

Art. 1383.- « Chacun est responsable du dommage qu'il a causé, non seulement par son fait, mais encore par sa négligence ou son imprudence ».

1.3.1. Définition et nature

Pour que quelqu'un soit responsable, il ne suffit pas qu'un dommage ait été causé, il faut que le dommage soit dû à la faute de l'auteur. Il faut donc que le fait soit fautif : « On est responsable quand on agit autrement qu'on aurait dû agir, et non seulement par le seul fait d'agir ». La faute dite *délictuelle* est une faute commise volontairement dans l'intention de nuire ; elle se confond souvent avec une infraction pénale. La faute dite *quasi-délictuelle* est une imprudence ou une négligence, c'est donc celle qui nous intéresse. Encore faut-il déterminer comment cette faute sera appréciée. Pour la faute délictuelle volontaire, l'appréciation se fait d'une façon concrète : puisqu'elle a un aspect subjectif (elle met en cause une démarche intérieure), il faut rechercher toutes les circonstances dans lesquelles l'auteur a décidé et exécuté l'acte fautif. Pour la faute d'imprudence ou de négligence, qui est un manquement à une obligation générale de diligence incombant à tous, il faut l'examiner dans l'abstrait, détacher l'acte fautif de l'agent, procéder par comparaison et se demander ce qu'aurait fait un personnage abstrait, mais à condition de le placer dans les mêmes circonstances externes que celui qui est jugé : « la faute quasi délictuelle est une erreur de conduite telle qu'elle n'aurait pas été commise par une personne avisée placée dans les mêmes circonstances externes que l'auteur du dommage » [1]. D'autres parlent du "bon père de famille" comme élément de comparaison. À propos de la responsabilité d'un médecin, la Cour de cassation, dans un arrêt ancien, motivé très simplement, mais qui est plus près de la réalité que du droit, a dit : « le juge ne doit pas s'ingérer dans l'examen des théories (...). Il doit appliquer des règles générales de bon sens et de prudence » et a décidé qu'un médecin ne pouvait se soustraire au droit commun. Notons que la plupart du temps, l'auteur présumé de l'accident est assigné en vertu des dispositions des articles 1 382 et 1 383 du Code civil car si l'article 1 383 fait allusion à un cas particulier de responsabilité, les principes de la faute et de la réparation du dommage résident dans les dispositions de l'article 1 382. Le langage juridique courant fait allusion à la responsabilité délictuelle dans tous les cas de faute.

1.3.2. La procédure - les modes de preuve

C'est la victime, le demandeur, qui assigne l'auteur présumé du dommage devant le tribunal du domicile de celui-ci. Si la demande est inférieure à 30 000 F, le tribunal d'instance est compétent ; au-dessus de ce chiffre, c'est le tribunal de grande instance. La preuve est à la charge du demandeur.

1.3.3. La force majeure

En cas de force majeure ou par suite d'un cas fortuit, c'est-à-dire d'un événement imprévisible et insurmontable, qui ne soit pas imputable à l'auteur supposé du dommage, aucune faute ne sera retenue à sa charge. Dans la partie réservée à l'examen des diverses décisions rendues par les tribunaux, nous examinerons si ceux-ci ont retenu ou non cette cause de non-imputabilité. Celle-ci sera souvent évoquée en cas de mauvais temps ou à la suite d'un accident lors du déclenchement d'une avalanche. C'est ainsi qu'on peut imaginer le cas de plusieurs cordées appartenant à une organisation et composées de personnes peu expérimentées et peu entraînées qui attaquent tardivement, à midi par exemple, une course de rochers de difficulté cotée II ou III, après un départ peu matinal et une marche d'approche effectuée plus lentement que prévue, alors que déjà l'orage se fait entendre au loin. Cet orage éclate sur le massif vers 16 heures alors que les cordées sont encore engagées. Il est certain que, s'il y a un accident dû au mauvais temps, les juges diront que le responsable du groupe a commis une faute engageant sa responsabilité. Mais imaginons que d'autres alpinistes partis de bonne heure alors qu'il fait beau, marchant à une cadence normale, soient pris

par le mauvais temps à 11 heures alors que rien ne laissait prévoir l'arrivée de l'orage et qu'ils soient sur le chemin de retour au refuge après avoir terminé la course ; il est non moins certain que cet événement sera considéré comme raisonnablement imprévisible et que le responsable présumé sera déchargé de toute faute en cas d'accident. On peut raisonner de même à l'occasion d'un accident causé par une coulée de neige ou une chute de séracs. Peut-on reprocher cet accident à un alpiniste qui aurait pris soin de s'engager à une 1 heure du matin dans un couloir de neige ? Celui qui le ferait, à 11 heures, alors que le soleil chauffe depuis plusieurs heures, n'aurait-il pas lui aussi commis une faute ?

Une simple éventualité ne suffit pas pour établir une responsabilité ; encore faut-il que les juges relèvent, dans un premier temps, les faits qui vont caractériser la probabilité du déclenchement d'une avalanche, par exemple, et que le responsable pouvait connaître. Une confusion est faite à l'occasion du déclenchement de l'accident car il est faux de prétendre que les juges retiennent la responsabilité de l'auteur présumé dès lors que son comportement est à l'origine de celui-ci ; en effet, ce n'est pas parce qu'un alpiniste déclenche une coulée de neige ou de pierres ou qu'un skieur fait partir une avalanche qu'il sera considéré comme responsable, encore faut-il apporter la preuve que son comportement était fautif. Et deux décisions en sens contraire rendues en 1962 et 1979, l'une par le tribunal de grande instance de Grenoble, l'autre par la cour d'appel de Grenoble à la suite de deux accidents survenus sur la voie normale de la Meije, illustrent ce principe. Mais nous pensons qu'il faut encore aller plus loin dans l'appréciation de la faute en matière d'alpinisme et rechercher si, la probabilité étant établie, toutes les précautions ont été prises pour éviter les conséquences dommageables.

1.4. La faute contractuelle

Le siège de la matière se trouve dans les articles 1147 et 1148 du Code civil.

Art. 1147.- « Le débiteur est condamné, s'il y a lieu, au paiement de dommages et intérêts soit à raison de l'inexécution de l'obligation, soit à raison du retard dans l'exécution, toutes les fois qu'il ne justifie pas que l'inexécution provient d'une cause étrangère qui ne peut lui être imputée, encore qu'il n'y ait aucune mauvaise foi de sa part ».

Art. 1148.- « Il n'y a lieu à aucun dommage-intérêt lorsque par suite d'une force majeure ou d'un cas fortuit, le débiteur a été empêché de donner ou de faire ce à quoi il était obligé ou a fait ce qui lui était interdit ».

La faute qui est commise dans l'exécution des contrats par un des cocontractants, c'est donc l'inexécution d'une obligation. Elle peut être aussi une imprudence, une négligence. Nous verrons que cette faute pourra engager la responsabilité d'un professionnel.

1.4.1. La nature de la faute

C'est un manquement à « la diligence qu'un homme soucieux de ses intérêts apporte à la gestion de ses affaires ou au comportement que doit avoir un bon professionnel de sa spécialité car il est normal qu'on exige d'un homme de métier la compétence et la diligence qu'on ne saurait imposer à un particulier, et la compétence doit imposer un plus haut degré de diligence ». Elle doit s'apprécier dans l'abstrait lorsqu'il ne s'agit pas d'une faute volontaire.

1.4.2. Obligation de résultat - Obligation de moyens

La faute s'appréciera diversement selon qu'il s'agira d'une obligation de résultat, ou "déterminée", ou d'une obligation de moyens dite encore "obligation générale de prudence et de diligence". À l'occasion d'un accident de personne, une obli-

gation "accessoire" de sécurité vient se greffer sur l'une ou l'autre. Ce qui distingue l'obligation de moyens de l'obligation de résultat, c'est que la diligence elle-même est l'objet de l'obligation : c'est ainsi que le guide (et peut-être le responsable d'une ou plusieurs cordées dans certaines circonstances qui feront l'objet de développements ultérieurs) sera tenu d'une obligation de moyens, c'est-à-dire finalement, d'une obligation de prudence et de diligence, et c'est dans ce cadre que l'on recherchera si une faute de sa part a conduit ou non au respect de son obligation ; il ne peut s'obliger à conduire un client au sommet mais il doit lui fournir tous les moyens de sa profession pour réussir. Il ne peut être tenu pour responsable du fait imprévisible ou du fait d'un tiers ou de la victime si celle-ci a commis une faute. Mais encore faut-il pousser plus loin l'analyse de l'obligation de moyens pour invoquer l'obligation de sécurité puisqu'en matière d'accident, il y a risque de préjudice corporel. Or, il semble bien que le professionnel sera tenu d'une obligation de sécurité qui sera l'engagement à faire ce que commandent la prudence et la diligence pour éviter un accident, à assurer la sécurité par les moyens d'un "bon père de famille", mais il ne peut s'engager à ce qu'aucun accident n'arrive. C'est à la victime de rapporter la preuve d'une imprudence ou d'une négligence.

1.5. La théorie du risque accepté

Sans entrer dans de longues explications juridiques, il faut rappeler que si un skieur ou un alpiniste doit envisager tous les risques inhérents à la pratique de la montagne et du ski en particulier, il ne peut s'engager à supporter les risques causés par la faute d'un autre. Les conventions de non-responsabilité sont d'ailleurs frappées d'une nullité de plein droit : les accepter serait créer des situations irréversibles gravement dommageables et permettrait au plus fort et au plus malin de triompher ; ce serait une atteinte au droit des personnes sur le plan légal comme dans le domaine de la morale. La cour d'appel de Chambéry a parfaitement illustré le rejet de la théorie du *risque accepté* que la jurisprudence n'a jamais admise lorsqu'elle était invoquée : « Il ne faut pas confondre les risques inhérents à la nature dont le risque d'avalanche qui suffirait à exonérer l'auteur du déclenchement de toute responsabilité si aucune faute n'était à l'origine de celui-ci, avec les risques réalisés et causés par une faute ; qu'admettre la théorie du risque partagé ou accepté, dû à la faute d'un tiers serait nier toute responsabilité ». Le seul fait que la victime pratique le ski ou l'alpinisme ne démontre pas qu'elle donne son consentement au préjudice qu'elle pourrait subir. Mais en revanche, il est important de souligner que, si le déclenchement d'un phénomène naturel est dû à l'homme, celui-ci ne sera responsable que dans la mesure où il aura commis une faute.

2. Les procédures

2.1. Procédure pénale

À la suite d'un accident, les services de gendarmerie ou de police dressent un procès-verbal transmis au parquet ; le procureur de la République (ou ses substituts) ont la liberté de classer ou de poursuivre. En cas de poursuite, le parquet peut citer directement le présumé coupable devant la juridiction (tribunal et chambre correctionnelle des cours d'appel) pour les délits examinés plus haut ou saisir un juge d'instruction si les faits sont complexes ou nécessitent une expertise ; celui-ci pourra ensuite clore l'information par une ordonnance de non-lieu (« il n'y a pas lieu à poursuivre ») dans les cas de charges insuffisantes ou renvoyer la personne mise en examen devant la juridiction pénale. La victime devra se constituer partie civile pour obtenir réparation de son dommage ; dans le cas où l'affaire est classée sans suite, la partie civile peut saisir le juge d'instruction ou directement le tribunal ; elle a les mêmes droits que le parquet.

2.2. Procédure civile

Elle est longue est plus complexe que la procédure pénale. La procédure est à la charge du demandeur qui doit apporter la preuve des faits et fautes qu'il impute à son adversaire et ce par le ministère d'un avocat et d'un avoué devant les juridictions d'appel. De ce fait, lorsqu'une victime déclenche l'action pénale comme on l'a vu ci-dessus, cela ne veut pas dire qu'elle recherche systématiquement la condamnation de son adversaire mais c'est aussi parce que la procédure est plus simple; dans tous les cas, les compagnies d'assurance interviennent de même que les caisses d'assurance maladie pour obtenir le paiement des frais médicaux exposés par elles.

2.3. Procédure administrative

À la compétence des juridictions de l'ordre judiciaire s'ajoute celle des juridictions administratives (tribunaux administratifs et cours d'appel régionales) lorsqu'est recherchée la responsabilité d'un maire qui n'a pas été traduit devant une juridiction pénale. Il faut préciser, et cela est important, que, quelle que soit la procédure choisie ou mise en œuvre, seule la juridiction administrative pourra statuer sur la réparation du préjudice dans la mesure où la faute commise par le maire l'a été dans l'exercice de ses pouvoirs de police, qu'il tient des dispositions de l'article L.131-2 du Code des communes; c'est ainsi que lorsque la sécurité des pistes sera mise en cause par l'intermédiaire d'un directeur de station (quel que soit le mode d'exploitation de celle-ci) ou d'un pisteur-secouriste, c'est la seule juridiction administrative qui sera saisie de la réparation du préjudice, la juridiction pénale étant incompétente sur ce point même si elle a reconnu la responsabilité d'un maire ou d'un directeur.

3. La jurisprudence

Après ce rappel de quelques notions judiciaires et juridiques, il est intéressant d'examiner, dans quelques cas particuliers d'accidents causés par des avalanches, quelles ont été les décisions des juridictions saisies et sur quels éléments celles-ci ont été fondées, étant observé que, dans la plupart des cas, c'est la pratique du ski hors-piste qui est mise en cause.

3.1. Avalanche au Plan de l'Aiguille (Mont-Blanc - 5/2/1978)

Cour d'appel de Chambéry 4/1/1979

C'est un accident survenu entre le Plan de L'Aiguille (station intermédiaire du téléphérique de l'aiguille du Midi) et la vallée de Chamonix qui a permis, d'abord au tribunal correctionnel de Bonneville puis à la cour d'appel de Chambéry, laquelle n'a fait que confirmer la décision des premiers juges, de définir les éléments constitutifs des fautes qui ont déterminé le déclenchement d'une avalanche. À l'occasion de cette affaire, une avalanche de protestations émanant des milieux professionnels de l'alpinisme s'est précipitée sur les juges; il faut dire que l'auteur de l'accident est guide de haute montagne et de grande notoriété, même si ce n'est pas en cette qualité qu'il a été poursuivi.

3.1.1. Les circonstances

Le 5 février 1978, "A" évoluait à skis avec deux autres skieurs sur le versant nord du Plan de l'Aiguille, à une altitude d'environ 1 900 m. Aucune piste n'est desservie par cette station mais il y avait de nombreux skieurs qui redescendaient sur la vallée. Le temps était beau; la température était de -3° à 13 heures. À la suite de chutes récentes de neige, existait un danger localisé d'avalanches et la mairie de Chamonix avait hissé le drapeau à damiers signalant ce risque. À 12 h 30, sous le refuge du Plan, "A" décidait de tester la neige en effectuant un

virage; il déclenchait alors l'avalanche qui, 700 m plus bas, emportait quatre skieurs; trois étaient légèrement blessés, le quatrième trouva la mort. Le parquet de Bonneville engageait alors des poursuites contre "A" ; il faut noter que les victimes ou leurs ayants droit n'avaient pas porté plainte.

3.1.2. L'arrêt de la cour

"A" déclarait qu'il savait que les risques d'avalanche étaient grands en raison des conditions d'enneigement. Il soutenait qu'il n'y avait pas de réglementation en montagne et que les skieurs qui avaient emprunté un itinéraire voisin du sien avaient pris certains risques; il affirmait avoir eu, dans une zone dangereuse, le comportement d'un skieur avisé et prétendait en outre qu'il n'y avait pas de lien de causalité entre son comportement, eût-il été fautif, et le dommage en raison de ce que le virage effectué par lui aurait pu ne pas déclencher l'avalanche et que celle-ci aurait pu emprunter un itinéraire différent. La cour retenait que "A" avait commis une imprudence grave en pratiquant le ski :

> « (...) en un temps et en des lieux où les avalanches étaient à redouter, qu'il ne pouvait ignorer que les autorités locales avaient mis en garde les skieurs (...) que l'acceptation d'un risque - ce qui est le cas en l'espèce pour les victimes - ne peut effacer ou détruire l'imprudence fautive de "A" ; que le déclenchement involontaire d'un phénomène naturel, de nature à entraîner la mort ou des blessures à autrui, n'est exclusif de toutes poursuites pénales que si l'auteur n'a commis aucune faute ou imprudence dans la pratique normale de ce sport. »

La cour observait aussi qu'en tant que guide de haute montagne, il devait être d'autant plus prudent et qu'il n'ignorait pas que d'autres skieurs évoluaient quelques centaines de mètres plus bas.

3.1.3. Analyse

La cour devait rejeter les moyens de défense de "A" en retenant :

1° les abondantes et récentes chutes de neige;

2° les avertissements donnés par les autorités compétentes;

3° la présence, qu'il ne pouvait ignorer, de skieurs en aval;

4° la connaissance qu'il avait que le virage qu'il allait opérer pouvait déclencher une avalanche puisque justement, il avait décidé d'y procéder pour "tester" la neige;

5° enfin la cour rejetait la *théorie du risque accepté* qui, selon ses partisans, effacerait la faute commise en affirmant que le déclenchement d'un phénomène naturel ne suffit pas à établir la faute, comme certains l'affirment en donnant une fausse interprétation des décisions judiciaires; encore faut-il que l'auteur du déclenchement n'ait commis aucune faute pour n'être pas reconnu responsable de la mort ou des blessures d'autrui. Autrement dit, ce n'est pas le déclenchement de l'avalanche qui est reproché au prévenu, mais les fautes qui la rendaient sinon inévitable du moins prévisible. Il faut ajouter que si les victimes avaient demandé réparation de leur dommage, il est certain que les juges auraient partagé la responsabilité pour tenir compte des fautes qu'elles avaient elles-mêmes commises.

3.2. Accident à l'Ouille Noire (Tarentaise - 14/3/1981)

Cour d'appel de Chambéry 10/2/1983

3.2.1. Les circonstances

Le 14 mars 1981, "R" âgé de 32 ans, en sa qualité de guide de haute montagne emmenait cinq clients qui effectuaient un stage d'une semaine en Vanoise organisé par ses soins. Ce groupe avait quitté Bonneval à 6 heures; vers 10 h 30 et après avoir emprunté les remontées mécaniques du col de l'Iseran au glacier du Pissaillas,

il parvenait au-dessous du col de l'Ouille Noire à 3 200 m environ; il entreprenait la descente pour rejoindre l'itinéraire du refuge du Carro au hameau de l'Écot puis à Bonneval. C'est au cours de cette descente, vers 11 h 30, qu'une avalanche du type "plaque à vent" se déclenchait et emportait le groupe. Deux personnes étaient dégagées, l'une à 14 h 15, qui décéda lors de son transport, la seconde vers 14 h 55, qui perdit la vie dans le cabinet du médecin de Lanslebourg. Les gendarmes relevaient dans leur procès-verbal que l'accident était survenu dans la partie supérieure d'une zone de barres rocheuses, sur une pente d'environ 40°; l'avalanche laissait une cassure de 1 m de haut sur 150 m; elle avait parcouru une dénivelée de 200 m sur une longueur de 500 m, et une épaisseur de 2 à 3 m, formant un front de 200 m. Le passage est orienté est-sud-est.

3.2.2. L'arrêt de la cour d'appel

L'arrêt de la cour d'appel de Chambéry confirmait un jugement de condamnation du tribunal correctionnel d'Albertville; il est reproduit ci-après *in extenso :*

« Attendu que "R" entend dégager sa responsabilité en soutenant que c'est à tort que les premiers juges lui ont reproché :

1° de ne pas avoir apprécié avec suffisamment de rigueur la probabilité de réalisation du risque compte tenu des éléments d'information contenus dans le rapport nivo-météorologique de Lovie, directeur du Centre d'Études et de Recherches sur la Neige et les Avalanches de l'Université de Chambéry, dont le siège est à Albertville;

2° d'avoir emprunté un itinéraire dont la configuration facilitait le déclenchement de l'avalanche;

3° d'avoir commencé tardivement la descente; que l'heure d'arrivée au col à 10 h 30 était normale par temps beau et froid; que le retour à Bonneval était prévisible vers 13 h 30, heure à laquelle "R" parvenait à Bonneval pour donner l'alerte;

Sur le choix de l'itinéraire :

Attendu que si les passages ne dépassaient pas le niveau "S3" sur une échelle comportant six degrés (pente où le skieur peut encore décider lui-même de l'endroit où il peut tourner) et si l'ensemble de la randonnée est cotée "SM" – skieur moyen – (Guide de la randonnée à ski, la Vanoise, par Gumuchian et Martin, Ed. Didier et Richard, Grenoble), il ressort des renseignements apportés par la carte au 50 millièmes I.G.N., que l'itinéraire suivi n'était pas le moins dangereux dès lors qu'il s'écartait de celui, normal et plus long, indiqué sur ladite carte qui remonte davantage au nord et redescend dans le vallon du ruisseau du Montet et qu'il emprunte des passages entre des barres, dont la pente moyenne est de 30 à 40°, en dessous des "Pareis Longues" et qui montre sur ladite carte des courbes de niveau très rapprochées; qu'en empruntant un tel itinéraire, "R" accroissait les risques et a commis une première faute;

Attendu que le prévenu a déclaré à l'audience qu'il avait regroupé ses clients au milieu de la pente et que c'est à ce moment là, alors qu'il repartait, que l'avalanche s'est déclenchée;

Attendu que "R" a ainsi commis une seconde faute en regroupant ses stagiaires au niveau d'une pente dont le profil est accentué, sans le faire dans un endroit à moindre risque, protégé et en négligeant par conséquent à cet instant de faire respecter une certaine distance entre les skieurs afin de limiter les effets de poids, de cisaillement et de vibration; qu'en agissant ainsi "R" a commis une autre faute;

Attendu qu'enfin il ressort du rapport Lovie qu'un réchauffement important était intervenu entre le 8 et le 15 mars, avec un temps doux et humide; que de fortes pluies étaient tombées le 8 mars avec des chutes de neige au-dessus de 2 500 m déposant 40 cm de neige fraîche au-dessus de 2 000 m; que le 12 mars l'isotherme 0° atteignait 3 200 à 3 500 m et redescendait à 2 000 m le 13 mars; que malgré un refroidissement dans la soirée du 13, les conditions étaient donc réunies pour le déclenchement des avalanches; que l'alerte avait été donnée le 11 mars; qu'à cette époque plusieurs avalanches sont tombées dans cette région;

Attendu que dans son rapport et dans sa note complémentaire, Lovie a retenu que le beau temps et le rafraîchissement n'ont pas eu pour effet de stabiliser le manteau neigeux, compte tenu des précédents nivo-météorologiques;

Attendu que le bulletin du 13 mars versé au débat par "R", fait état de prévisions pour un temps nuageux avec le développement des éclaircies, quelques averses de neige – correspondant à la présence de 20 cm de neige fraîche constatée par "R" – vent de 60 à 70 km/h ouest-nord-ouest, avec "un risque localisé d'avalanche par rupture de plaques" ;

Attendu que le risque n° 3 évoqué par "R" sur l'échelle utilisée depuis 1982 et qui comporte huit degrés est caractérisé comme étant "risque accidentel modéré" avec "risque naturel faible" mais "risque de ruptures accidentelles assez marqué, mais localisé" ;

Attendu que le rapport déposé par Rey, météorologue, à la demande de "R", s'il donne d'autres explications, ne vient pas contester les constatations nivo-météorologiques enregistrées par des stations les plus proches du lieu de l'accident;

Attendu qu'il existait des risques prévisibles de déclenchement d'avalanches, que ces risques étaient naturellement faibles mais assez marqués quant aux risques accidentels (passage de skieurs), que s'il est tout à fait exact que personne n'est à l'abri des accidents de montagne dans la pratique de l'alpinisme ou du ski de montagne, encore faut-il ne pas commettre de fautes qui accroissent les risques naturels surtout quand on est un professionnel à l'égard duquel les juges doivent se montrer plus exigeants; que "R" a eu tort d'entreprendre cette course trop tôt par rapport aux conditions nivo-météorologiques des jours précédents, et en empruntant un itinéraire qui augmentait les risques; que c'est à juste titre que ces fautes sont à l'origine de l'accident et peuvent être retenues à sa charge;

Attendu que le samedi 14 mars était le dernier jour du stage; que ce dernier jour est consacré, selon le document publicitaire, à une "sortie en montagne" ; qu'on ne peut être qu'étonné qu'on puisse établir un tel programme à l'avance pour allécher les clients sachant fort bien qu'on ne peut faire de prévisions pour toute une saison sur les possibilités offertes le samedi, dernier jour du stage;

Attendu qu'il convient de confirmer le jugement entrepris et de laisser l'amnistie effacer les faits; que ce jugement de condamnation doit être au moins un avertissement à l'égard d'un guide dont le métier est difficile et sur lequel ont été recueillis de bons renseignements;

Sur l'action civile

Attendu que c'est à tort que le tribunal a laissé un tiers de responsabilité aux victimes sans rechercher et établir l'existence d'une faute à leur égard;

Attendu que la notion de risque accepté, si elle a été admise par la jurisprudence en matière de sport de combats ou de groupes dont l'objet est de porter des coups aux autres ou du moins certaines violences - sous réserve toutefois du respect des règles du jeu - cette notion a toujours été rejetée par la jurisprudence en matière d'alpinisme ou de ski de montagne;

Attendu que même si la victime a eu connaissance des risques et a même consenti aux dommages, elle ne les a pas "voulus" ; qu'il n'y a pas acceptation de la part de la victime qui n'a rien voulu car elle n'a pas agi dans le dessein de subir un dommage; que le consentement de la victime aux risques ne peut s'analyser en une cause de non-responsabilité; qu'en tout cas on ne peut lui demander d'accepter le dommage dû à la faute d'un tiers, pas plus qu'elle a consenti au préjudice qu'elle pourrait subir (Traité théorique et pratique de la responsabilité civile, Ch. et L. Mazeaud, A. Tunc, Ed. Montchrétien, 1957, Paris; Grenoble, chambre correctionnelle 4.5.79, MP C/L... ; Chambéry, chambre correctionnelle, 4.1.79, M.M C/A... ; Chambéry, chambre civile, 6.6.78, J. CL 1980-19286) ;

Attendu qu'on ne peut reprocher à ses clients d'avoir suivi leur guide et qu'on ne peut imputer à faute ce comportement;

Attendu qu'il est surprenant de constater à la lecture du document publicitaire, que "R" faisait signer à ses clients une clause de non-responsabilité; que cette convention est nulle dès lors que les dispositions des articles 1382 et 1383 sont d'ordre public;

Attendu qu'aucune faute ne peut être reprochée aux victimes et qu'il convient de déclarer "R" seul et entièrement responsable des conséquences de l'accident.»

3.2.3. Analyse

Rien n'est garanti en montagne mais en raison de l'obligation de sécurité que doit assurer un guide, qui n'est pas l'obligation de résultat, la cour de Chambéry a clairement affirmé qu'il ne fallait pas commettre des fautes qui accroissent les risques inhérents à la pratique de la montagne. Les fautes relevées à l'encontre du guide résident dans le choix de l'itinéraire, le regroupement des skieurs au même endroit, le fait de ne pas prendre en compte les conditions nivo-météorologiques. La cour a, en outre, décidé qu'il fallait être plus exigeant à l'égard d'un professionnel de la montagne qui a, par définition, davantage de connaissances que ses clients surtout dans le genre de stage organisé par lui. Enfin, la notion de risque accepté est rejetée.

3.3. Accident au Mont-Genèvre (25/3/1978)

Cour d'appel de Grenoble 4/5/1979

3.3.1. Les circonstances

Le 25 mars 1978, à 16h30 un groupe de skieurs évoluait hors des pistes dans le secteur de la station sous la responsabilité d'un moniteur, guide de haute montagne. Une plaque se détacha d'une crête voisine et emporta l'un d'eux qui décéda. L'endroit où s'est produit l'accident était considéré comme avalancheux et ce danger y est signalé par plusieurs panneaux attirant l'attention des skieurs et rédigés en français et en italien ou comportant simplement le signal traditionnel indiquant un danger. Avant l'accident, deux coulées s'étaient déjà détachées au passage des skieurs ; le drapeau à damiers noir et jaune était hissé à la station.

3.3.2. Le jugement

"L" était poursuivi pour homicide involontaire devant le tribunal de Gap qui retenait sa responsabilité pénale dans un jugement du 8 novembre 1978 confirmé par un arrêt de la cour d'appel de Grenoble le 4 mai 1979 en lui reprochant :

1° de n'avoir pas vu les différents panneaux ni le drapeau ;

2° de n'avoir pas consulté le bulletin météorologique qui signalait des risques d'avalanches ;

3° d'avoir emprunté une pente orientée sud-ouest à 16h30 alors que les chutes de neige récentes combinées avec l'action du vent impliquaient la formation de plaques à vent et que la neige sèche de surface adhérait mal au manteau neigeux préexistant ; de plus, le soleil avait travaillé la neige toute la journée.

3.3.3. Analyse

Le tribunal puis la cour d'appel ont bien défini les fautes reprochées au prévenu ; de plus, les juges rejetaient la théorie du risque accepté, « "L" ayant soutenu que la victime, en acceptant de suivre son moniteur sur un itinéraire hors piste, conservait son autonomie et était en mesure, tout comme le moniteur, d'apprécier le risque auquel elle s'exposait ». La victime, qui skiait dans le cadre d'une leçon de ski, ne pouvait conserver son autonomie, et son expérience de la montagne et plus particulièrement de la neige, moins grande que celle de son moniteur, ne pouvait la mettre mieux à même de prévoir les risques que celui-ci ; elle ne pouvait que se fier à son moniteur et avait même l'obligation de lui faire confiance.

3.4. Accident aux Arcs (28/12/1980)

Cour d'appel de Chambéry 28/1/1982

Cet accident a eu des conséquences dramatiques puisque trois jeunes âgés de seize ans ont perdu la vie dans une avalanche, alors qu'ils participaient à un cours de ski donné par un moniteur de l'E.S.F. des Arcs.

3.4.1. Les circonstances

Ce jour là, ce moniteur, guide de haute montagne avait entraîné un groupe d'onze élèves sur une pente après avoir enfreint les instructions portées sur un panneau placé à l'endroit où le groupe a quitté la piste, panneau qui annonce « Ne pas dépasser – Dangereux » ; de plus, une corde maintenue par des piquets matérialisait cette interdiction. L'avalanche se déclencha alors que le moniteur et trois élèves se trouvaient arrêtés à mi-pente ; les constatations faites établissaient que c'était bien le passage des skieurs qui avait déclenché l'avalanche alors que par suite des conditions nivo-météorologiques, il existait une plaque à vent « suffisamment solide pour éviter le déclenchement naturel mais trop fragile pour supporter le passage de plusieurs skieurs » ; il faut noter que l'avalanche était inscrite au *plan d'intervention du déclenchement des avalanches* (PIDA) et se trouvait hors de la zone de "ski total", où la station garantissait la sécurité aux skieurs. La neige fraîche, tombée la veille, atteignait une hauteur de quarante centimètres.

3.4.2. L'arrêt

La cour, après le tribunal, a retenu la responsabilité pénale et civile du moniteur en soulignant les fautes qu'il avait commises : non observation des conditions nivo-météorologiques, choix d'une pente où la neige ne pouvait être stabilisée, regroupement des élèves en pleine pente, alors que l'expert avait conclu son rapport d'une façon très nette en affirmant : « tous les facteurs de danger étaient réunis ». La Cour rappelait aussi que l'accident s'était déroulé dans le cadre d'une leçon de ski et, que, dans ces conditions particulières, « le moniteur doit se montrer particulièrement vigilant à l'égard de ses élèves en sa double fonction de professionnel et d'enseignant ».

« Attendu que le ministère public et "D" ont régulièrement interjeté appel du jugement du 5 octobre 1981 du tribunal correctionnel d'Albertville qui a condamné le prévenu à une amende de 4 000 F et a déclaré l'école de ski des Arcs civilement responsable ;

Attendu que "D" est prévenu d'avoir causé la mort de "BO", "SA" et "DI" par maladresse, négligence, imprudence ou inobservation des règlements et ceci à Bourg-Saint-Maurice (station des Arcs 1 800) le 28 décembre 1980 ;

Attendu que le 28 décembre 1980 vers 15 h 25 une avalanche se déclenchait sur les pentes de la Dent du Peigne, à proximité de la piste du Grand Renard, vers 2 130 m d'altitude, entraînant un moniteur de l'école de ski des Arcs et trois élèves d'un groupe d'onze ; que "BO", "DI" et "SA", tous trois âgés de seize ans environ, décédaient des suites de leur ensevelissement ;

Attendu que "D" est titulaire des brevets nationaux de moniteur de ski et de guide de haute montagne ; qu'il avait ce jour-là sous son autorité un groupe d'élèves du cours I (très bon niveau) ; qu'ayant quitté la piste rouge du Grand Renard, et après avoir effectué une traversée à flanc, il s'engageait le premier et demandait aux élèves de descendre un par un ; que l'avalanche se déclenchait alors que le moniteur et les trois élèves se trouvaient arrêtés à mi-pente.

Attendu que la pente est exposée au nord-ouest et d'une inclinaison moyenne de 38° à 45° ; que dans le couloir d'accès à la remontée mécanique se trouve un panneau rectangulaire jaune et rouge mentionnant "Danger d'avalanche, ne

pas sortir des pistes balisées" ; que cette avalanche bien que relativement rare est inscrite au Plan d'Intervention du Déclenchement des Avalanches (P.I.D.A.) ;

Attendu qu'une avalanche qui s'était produite le 22 décembre avait dans la station causé plusieurs morts, et s'était déclenchée dans les mêmes conditions météorologiques : tempête du nord-ouest avec un vent violent et constitution de plaques à vent ;

Attendu que les prévisions météo pour le 28 étaient les suivantes : températures : isotherme 0 °C à 500 m, - 10 °C à 900 m ; vent : à 3 000 m secteur nord-ouest 60 km/h, à 5 000 m, 140 km/h.

Attendu qu'il ressort du rapport technique établi sur l'état de la neige et les conditions dans lesquelles s'est produite la rupture : que "la zone A (la plus proche de la surface) représente deux couches de neige fraîche des 18-21 décembre et 26-27 décembre" ; que sa résistance en fait un ensemble "extrêmement fragile d'autant que ces deux couches restent peu ou pas transformées..." ; que les couches B sont assez compactes et relativement stables ; que les couches C sont formées de plaques à vent ; que la couche C3 composée de neige en gobelets présentant une faible adhérence a lâché ; que la couche C2, constituée d'une "plaque à vent suffisamment solide pour éviter le déclenchement naturel mais trop fragile pour supporter le passage de plusieurs skieurs" a cédé entraînant C3 ;

Attendu qu'il est incontestable et qu'il ressort des constatations et de l'enchaînement des faits que c'est le passage des skieurs qui a occasionné la rupture ;

Attendu que la station des Arcs a défini une "zone de ski total" où elle garantit la sécurité des skieurs tant sur la piste que hors des pistes, qu'il faut noter que l'avalanche est inscrite au P.I.D.A. hors du domaine du ski total ;

Attendu que la couche de neige tombée la veille atteignait une hauteur d'environ 40 cm en moyenne ;

Attendu que le prévenu, qui n'avait pas pris garde au bulletin Radio-Arcs ni au bulletin affiché dans les locaux de l'école de ski et qui annonçait les risques d'avalanche, prétend que le risque était imprévisible à l'endroit où l'avalanche s'est déclenchée ; que ce sont des sous-couches qui ont entraîné la rupture de l'ensemble ; que ce passage est fréquemment employé ;

Attendu que lorsque le comportement d'un skieur ou d'un alpiniste est à l'origine du déclenchement d'une avalanche encore faut-il établir la preuve que ce comportement est fautif pour retenir sa responsabilité ;

Attendu qu'il y a lieu d'observer tout d'abord que l'accident s'est produit dans le cadre d'une leçon de ski regroupant de jeunes élèves sous la conduite d'un moniteur ; que les faits et leurs conséquences sur le plan de la responsabilité seraient susceptibles d'une analyse différente s'il s'agissait d'une guide emmenant des clients faire une excursion à skis en haute montagne ; qu'un moniteur doit se montrer particulièrement vigilant à l'égard de ses élèves en sa double qualité de professionnel et d'enseignant ;

Attendu en effet, que s'il n'est pas interdit à un skieur de prendre des risques lorsqu'il skie pour son compte personnel, un moniteur ne doit pas prendre des risques pour ses élèves ; que s'il est vrai que nul -fût-il le plus expérimenté- ne peut prétendre échapper aux risques d'une avalanche, il n'en reste pas moins que l'on doit tout faire pour mettre les chances de son côté tant pour soi-même que pour les autres, et tout particulièrement dans le cas d'un moniteur, et respecter les règles de prudence établies par l'expérience et les connaissances acquises ;

Attendu que les seules traces remontaient à 48 heures ce qui prouve que la pente présentait un danger puisqu'aucun skieur ne l'avait encore parcourue et ce en dépit des affirmations du prévenu ;

Attendu qu'une règle de prudence exige que l'on ne s'engage pas sur des pentes soutenues dans les 48 heures qui suivent une chute de neige surtout lorsqu'elle celle-ci est accompagnée de vents violents ; que même si l'on retient les conclusions de l'expert, à savoir que c'est la couche C qui est à l'origine de la rupture de l'ensemble, il faut observer que la prudence devait interdire au moniteur d'emmener ses élèves sur une pente où, selon cet expert, « tous les facteurs de danger étaient réunis : une pente forte empruntée par des skieurs moins de 24 heures

après une tempête de neige au cours de laquelle s'étaient constituées des plaques à vent et des accumulations de neige » ; danger d'autant plus grand lorsqu'on sait que la neige n'est pas transformée en plein hiver et que les couches n'ont pas la stabilité qu'elles acquièrent plus tard ;

Attendu enfin que le prévenu a commis une autre imprudence en regroupant ses élèves à mi-pente alors que tout danger n'était pas écarté ;

Attendu que "D" a ainsi commis plusieurs fautes en raison des conditions nivo-météorologiques et du choix d'une pente relativement forte à une époque où la neige n'est pas stabilisée et en regroupant ses élèves en pleine pente, les exposants ainsi aux dangers d'une avalanche possible. »

3.5. Accident à la Roche de Mio (station d'Aime 2 000)

12/2/1983 tribunal correctionnel d'Albertville, 7 /1/1985

3.5.1. Les circonstances

Onze skieurs qui avaient emprunté un itinéraire hors piste sous la direction d'un moniteur à partir de la gare supérieure du télécabine de la Roche-de-Mio à Champagny-en-Vanoise, ont été emportés par une avalanche ; quatre sont morts dont deux jeunes de douze et treize ans.

3.5.2. Le jugement

« Attendu que les causes du déclenchement de l'avalanche n'ont pu être déterminées avec certitude par l'expert désigné par le magistrat instructeur, à savoir déclenchement naturel ou accidentel, c'est-à-dire dans ce dernier cas, provoqué par le passage de l'un des autres groupes de skieurs évoluant dans le même secteur ;

Attendu que le prévenu n'ignorait pas l'existence de cette avalanche qui s'est déjà déclenchée plusieurs fois dans cette combe, ce qui explique qu'elle figure sur la carte de l'institut géographique national[1], certes avec une limite inférieure en amont de 150 mètres par rapport à celle atteinte le jour de l'accident ;

Attendu toutefois que la limite portée sur la carte n'est qu'approximative et peut varier d'une année à l'autre en fonction de la masse de neige instable accumulée sur cette pente de 70 %, très favorable au déclenchement selon l'expert Marbouty ;

Attendu que "F" qui enseigne le ski à La Plagne depuis 1974 et dont l'expérience de la montagne est incontestée, ne saurait soutenir sérieusement que l'avalanche du 6 avril 1982 s'étant arrêtée au-dessus du replat sur lequel il avait regroupé ses élèves le 12 février 1983, il avait la certitude que celle-ci ne descendrait pas au-delà durant l'hiver 1983 ;

Attendu que connaissant donc le caractère avalancheux d'une partie de l'itinéraire qu'il avait proposé à ses clients, en ce dernier jour de leur stage qui avait débuté le 5 février, "F" devait apprécier avec rigueur le risque possible de déclenchement ;

Attendu à cet égard que le dernier bulletin nivo-météorologique dont il avait pris connaissance à l'école de ski français était celui du 7 février qui indiquait notamment "l'accumulation de neige sans cohésion est importante et peut provoquer des avalanches de neige récente sur tous les massifs et à toutes altitudes (...) situation avalancheuse bien établie n° 7 diminuant (...) le ski en dehors des pistes ouvertes et balisées est fortement déconseillé pendant les 72 heures à venir" ;

Attendu qu'aux termes d'une note diffusée le 28 décembre 1982 par Monsieur "M", directeur du service des pistes et de la sécurité, un bulletin reste valable tant qu'un bulletin complémentaire n'a pas été diffusé en cas de changement brusque des risques dans le sens de l'aggravation ou de la diminution, ce qui était donc le cas du bulletin du 7 février, non rectifié jusqu'au jour de l'accident ;

Attendu, certes, que la situation météorologique avait évolué favorablement à partir du 8 février puisque l'expert a relevé que sur l'échelle du risque utilisée par

le Centre d'Études de la Neige à Saint-Martin-d'Hères, ce risque avait diminué de 7 à 5 entre le 7 et 12 février ;

Attendu cependant qu'à cette date le bulletin du C.E.N. (Centre d'Études de la Neige) mentionnait encore un risque modéré de déclenchement naturel et un risque fort de déclenchement accidentel, ce qui selon l'expert "permettait quand même d'éviter une interprétation trop optimiste de cette situation" ;

Attendu surtout que ce risque était apprécié dans des termes identiques par le service météorologique de Bourg-Saint-Maurice que "F" avait consulté téléphoniquement le matin même de l'accident et qui indiquait la persistance d'un risque modéré d'avalanches naturelles et "fort par surcharge accidentelle (risque 5)" ;

Attendu enfin que le drapeau à damiers jaunes et noirs que le prévenu a vu hissé au sommet de la Roche-de-Mio confirmait s'il en était besoin la persistance du danger car contrairement aux dires de "F", le directeur de la sécurité de la station a affirmé que le drapeau ne restait pas hissé en permanence mais qu'il était enlevé lorsque le risque était "faible" ;

Attendu que dans ces conditions il apparaît qu'en sa qualité de professionnel rémunéré accompagnant de surcroît des élèves dont certains étaient mineurs de 12 ans et ne pouvaient à l'évidence que s'en remettre au choix de l'itinéraire qu'il avait fait lui-même, le prévenu n'a pas apprécié avec suffisamment de rigueur la probabilité de réalisation du risque et donc a commis une imprudence à l'origine du décès des quatre victimes. »

3.5.3. Analyse

Les juges relevaient que l'attention du moniteur aurait dû être attirée par le fait que cette avalanche s'était déjà déclenchée plusieurs fois dans cette combe et qu'il devait apprécier les risques avec d'autant plus de rigueur et alors que le bulletin dont il avait pris connaissance à l'école de ski indiquait "situation avalancheuse bien établie (...) ski hors piste fortement déconseillé" ; ce bulletin n'avait pas été rectifié le jour de l'accident et les dangers demeuraient. Le tribunal observait en outre et une fois de plus ce qu'on était en droit d'exiger "d'un professionnel rémunéré accompagnant des élèves dont certains étaient des mineurs de douze ans" qui ne pouvaient que s'en remettre à son choix pour l'itinéraire, alors que le prévenu soutenait que les victimes avaient accepté les risques !

3.6. Accident à Macot-La Plagne

30/1/1985, tribunal correctionnel d'Albertville, 3/3/1986

3.6.1. Les circonstances

Ce jour-là, un guide-moniteur accompagne hors des pistes dans le massif des Bourtes un groupe de huit skieurs qui effectuent un stage "toutes neiges" ; après avoir emprunté une partie de piste balisée, il la quitte et s'engage le premier dans un goulet en recommandant à ses clients de descendre l'un après l'autre en gardant un intervalle de sécurité. C'est à ce moment qu'une avalanche se déclenche et qu'un client trouve la mort. Le moniteur est poursuivi pour homicide involontaire.

3.6.2. Le jugement

« Attendu qu'il résulte de l'avis technique émanant du Centre d'Études de la Neige de Saint-Martin-d'Hères qu'à partir du 20 janvier 1985 des vents forts ont accumulé des plaques de neige instables, notamment dans les couloirs encaissés, et que "cette situation est décrite avec une précision remarquable dans le bulletin local de prévision du 29 janvier 1985 diffusé par le service des pistes et de la sécurité de La Plagne, qui confirme d'ailleurs l'analyse établie à une échelle plus globale par la météorologie (centre d'Études de la Neige, Bourg-Saint-Maurice)" ;

1. N.D.L.R. : il ne s'agit pas d'une carte de l'IGN, mais d'une carte de localisation probable des avalanches (CLPA, voir ch. 6).

Attendu, en effet, que ces deux bulletins sont concordants puisqu'ils mentionnent pour le 30 janvier 1985 "un très important risque de déclenchement d'avalanches accidentelles et un risque naturel fort " (bulletin du service des pistes de La Plagne), et un "risque de déclenchement accidentel par surcharge très marqué et généralisé, même là où le manteau neigeux semble peu épais, et un risque naturel modéré évoluant l'après-midi en risque naturel fort" (bulletin météorologique de Bourg-Saint-Maurice) ;

Attendu que le prévenu a négligé de consulter ces bulletins et a cédé aux sollicitations de ses clients en fin d'après-midi, au motif que ceux-ci « n'avaient pas eu le plaisir de faire une descente qui les satisfasse » ;

Attendu qu'en choisissant un couloir exposé nord-ouest et ouest au cours de l'après-midi, le prévenu a aggravé le risque de déclenchements dès lors que ceux-ci sont favorisés en fin de journée sur les versants ensoleillés, ainsi que le rappelle opportunément le bulletin météorologique du 29 janvier 1985 ;

Attendu qu'en sa qualité de professionnel averti, "J" n'a pas apprécié avec suffisamment de rigueur la probabilité de réalisation du risque et ce d'autant plus que la pente de la brèche des Bourtes est importante dans la zone de départ (40° à 43° selon le C.E.N.) ;

Attendu que ces fautes d'imprudence et de négligence sont en relation de causalité avec le décès de la victime et qu'il y a lieu d'entrer en voie de condamnation en tenant compte cependant de larges circonstances atténuantes en faveur du prévenu ;

Attendu en effet qu'il résulte des déclarations des clients survivants que "J" a testé plusieurs fois la neige avec ses skis avant d'aborder lui-même le couloir, qu'il a rappelé les consignes de sécurité et qu'il a muni tout le groupe d'appareils de détresse. Que par ailleurs, de l'avis des guides et moniteurs ayant versé des attestations aux débats, il ressort que la brèche des Bourtes n'était pas connue comme un couloir avalancheux en raison des ancrages rocheux assurant généralement la stabilité du manteau neigeux dans ce passage étroit.

Faisant application de sa jurisprudence et en application des dispositions de l'article 43-2 du Code pénal, le tribunal condamnait le prévenu à titre de peine principale à l'interdiction d'exercer sa profession de moniteur de ski en dehors des pistes pendant une année. »

Mais les juges ont laissé un tiers de responsabilité à la victime :

« Sur l'action civile

Attendu qu'il est constant que les huit clients de "J" étaient des skieurs de haut niveau participant à un stage toutes neiges impliquant donc la pratique du ski hors pistes, au demeurant connue d'eux depuis dix ans ;

Attendu que certains d'entre eux ont reconnu qu'ils connaissaient l'existence des conditions météorologiques défavorables, et en tout état de cause, les drapeaux à damiers jaunes et noirs, hissés notamment à l'arrivée du télécabine de la Roche-de-Mio, étaient là pour rappeler le risque local d'avalanches à ceux qui l'auraient oublié ;

Attendu que feu "F", comme les autres membres du groupe, n'ignorait pas que la présence d'un moniteur, aussi qualifié soit-il, ne fait jamais disparaître les "dangers objectifs de la montagne" auxquels s'exposent nécessairement les adeptes du ski hors pistes ;

Attendu que son expérience de ce sport et des risques inhérents à sa pratique lui commandait de s'informer lui-même des conditions nivo-météorologiques et d'en tirer les conséquences quant à sa participation éventuelle aux randonnées proposées par le moniteur ;

Attendu que cette faute d'imprudence et de négligence commise par la victime, si elle est d'une gravité moindre que celle commise par le professionnel rémunéré, a cependant concouru à la réalisation du dommage dans une proportion que le tribunal a estimé devoir fixer au tiers. »

3.7. Avalanche à Val-d'Isère (15/1/1988)

Jugement du tribunal correctionnel d'Albertville du 21/1/1991

3.7.1. Les circonstances

Le 15 janvier 1988, "F" moniteur de ski, conduisait un groupe de huit skieurs expérimentés pour pratiquer le ski hors-piste ; après avoir emprunté des remontées mécaniques, le moniteur faisait passer son groupe sous la corde délimitant la piste puis arrivant dans une combe qu'il comptait descendre demandait selon lui, aux skieurs d'attendre qu'il ait descendu avant de s'engager ; décidant de le suivre, quatre clients déclenchèrent une avalanche qui ensevelit deux d'entre eux, qui trouvèrent la mort.

3.7.2. Le jugement

Le tribunal retenait que les déclarations des skieurs rescapés ne faisaient pas ressortir que le moniteur avait donné l'ordre à ses clients d'attendre qu'il ait descendu avant de s'engager. Le moniteur avait reconnu avoir emmené ses clients "faire du hors-pistes" sans les équiper de matériel de détection, sans consulter le bulletin météorologique ni un panneau annonciateur de danger installé au pied de la dernière remontée mécanique empruntée. Les juges avaient aussi relevé que le moniteur avait remarqué la présence de nombreuses plaques à vent au sommet de la combe.

3.7.3. Analyse

Le tribunal retenait la responsabilité pénale du moniteur pour homicide involontaire pour avoir commis des fautes d'imprudence, d'inattention et de négligence : en conduisant un groupe de skieurs hors des pistes sur un secteur dangereux annoncé par un panneau spécial, en négligeant de consulter le bulletin météo alors qu'il ne pouvait ignorer qu'un vent violent avait chargé les pentes de de neige et en s'abstenant d'équiper ses clients d'appareils de recherche de victimes d'avalanches (ARVA). Il faut noter que c'est la première fois qu'une juridiction constatait que cette dernière négligence caractérisait une faute pénale.

3.8. Avalanche à Corrençon-en-Vercors (8/3/1988)

Arrêt de la cour d'appel de Grenoble (chambre correctionnelle du 5/8/1992)

3.8.1. Les circonstances

Le 8 mars 1988, deux élèves qui suivaient un stage de préparation sportive en vue du baccalauréat trouvaient la mort dans une avalanche alors qu'ils skiaient sur la piste de liaison reliant le domaine skiable de la commune de Corrençon à celui de Villard-de-Lans. Cette piste était restée ouverte malgré le risque sur lequel le Préfet avait attiré l'attention du maire par une lettre du 4 avril 1984 qui citait un rapport des services RTM constatant « que l'exposition sud-ouest du site doit accélérer considérablement la transformation "de la neige qui s'y dépose » et que « après canalisation dans une combe, les coulées risquent de descendre droit dans la pente sur la piste de liaison" ; il y était précisé "qu'un réchauffement rapide ou des chutes de neige importantes pouvaient mettre ce secteur en danger » ; un message de la Météorologie Nationale émis la veille de l'accident annonçait les chutes de neige « attendues et les vents impétueux de nord seront à l'origine de nouvelles surcharges et accumulations instables. Dans les prochaines heures des départs naturels se produiront dans les pentes raides non purgées... par ailleurs les risques de déclenchement par surcharges accidentelles resteront très marqués... »

3.8.2. L'arrêt de la cour d'appel

Dans son arrêt, la cour, confirmant le jugement du tribunal, relevait les avertissements donnés par le Préfet et qu'il « appartenait au maire de prendre toutes dispositions utiles pour être tenu personnellement informé de la situation au regard de la sécurité du domaine skiable de sa commune afin de pouvoir décider des mesures propres à assurer la sécurité des skieurs ». La cour constatait que le couloir qui domine la piste de liaison est exposée au sud-ouest et accuse au sommet une pente de 60 degrés, en sa partie médiane de 40 à 50 degrés et de 30 degrés dans le bas ; elle retenait la responsabilité pénale du maire qui, compte tenu des risques énoncés et en l'absence de dispositif permettant un déclenchement artificiel des plages neigeuses présentant un danger dans ce secteur, n'avait pas ordonné la fermeture de la piste, commettant ainsi des fautes de négligence, d'imprudence et d'inobservation des règlements en relation de causalité directe avec le décès des skieurs.

3.8.3. Analyse

Une responsabilité générale de sécurité incombe au maire qui doit, aux termes de l'article 90 de la loi du 7 janvier 1983, qui confirme les dispositions de l'article L.131-2-6 du Code des communes « prévenir par des précautions convenables et faire cesser par la distribution des secours nécessaires, les accidents et fléaux calamiteux et pourvoir à toutes les mesures d'assistance et de secours ». Dans le cas qui nous occupe, le maire avait donc un devoir de prévention matérialisé par la fermeture de la piste ainsi que lui en faient l'obligation les circulaires des 4 janvier 1978 et 6 novembre 1987 du ministère de l'Intérieur. Selon le chef des pistes, l'avalanche avait été alimentée par une accumulation importante de neige suite aux chutes depuis quinze jours ; il précisait qu'il n'y avait eu aucune interdiction de ski sur les pistes de Villard et de Corrençon pendant la semaine précédente et celle de l'accident alors qu'il avait remarqué que la neige était poudreuse et instable, à un point tel qu'il avait procédé le 4 mars à un sondage-battage des diverses couches pour apprécier le risque d'avalanche, dont d'ailleurs il n'avait pas eu le résultat. Il devait ajouter à ces déclarations qu'il avait observé chaque année sur ce couloir de petites avalanches qu'il qualifiait de "sans grande importance" alors que cependant un engin de damage avait été partiellement enseveli.

Le Préfet concluait ainsi sa lettre du 4/4/1984 :

« Dans le souci d'apporter une meilleure sécurité aux usagers et aussi afin de vous prémunir contre toute attaque sur le plan juridique, je vous invite instamment à tenir le plus grand compte des observations et conseils adressés par la délégation[2], notamment en ce qui concerne les risques avalancheux sur le chemin de liaison (piste de ski) nouvellement tracé entre Villard-de-lans et Corrençon. »

La cour relevait qu'une visite de sécurité effectuée le 26 mars 1987 aboutissait au constat que la piste de liaison Corrençon-Villard-de-Lans était concernée par des problèmes ponctuels d'avalanches, en provenance de la grande Moucherolle. La cour rappelait aussi que le chef des pistes avait remarqué la présence d'une neige instable alors que le couloir qui domine la piste de liaison accuse au sommet une déclivité de 60 degrés. Finalement, la cour concluait en reprochant au prévenu de ne pas avoir fermé la piste alors que les conditions nivo-météorologiques devaient l'inciter à le faire et ce d'autant plus que dans ce secteur, présenté comme comportant des risques, avait déjà eu lieu l'année précédente une coulée importante. Compte tenu de l'accumulation des fautes, on

peut estimer que c'est à bon droit que la juridiction pénale a été saisie ; en l'espèce, le maire, qui est exploitant forestier et moniteur de ski, avait été particulièrement informé des risques que couraient les skieurs qui empruntaient cette piste alors qu'il ne s'était pas soucié des instructions de l'Administration et que les conditions nivo-météorologiques qu'il était plus capable que quiconque d'apprécier, compte tenu de sa qualité de moniteur, étaient telles le 8 mars que l'avalanche était prévisible et qu'il aurait dû, en conséquence, ordonner la fermeture de la piste où ont péri deux jeunes skieurs.

3.9. Avalanche à Tignes (28/2/1987)

Jugement du tribunal correctionnel de Chambéry du 15/2/1991 - arrêt de la cour d'appel de Chambéry du 9/10/1991.

3.9.1. Les circonstances

Lors d'un stage de militaires canadiens et pour encadrer celui-ci, le capitaine "S", supérieur hiérarchique de l'adjudant "H" l'avait désigné. Il devait procéder à un exercice d'initiation au ski de randonnée alpine sur piste balisée ; une avalanche, déclenchée artificiellement alors que la piste n'était pas ouverte, emportait un des militaires. Le capitaine "S", l'adjudant "H" et le pisteur secouriste étaient poursuivis pour homicide involontaire et condamnés.

3.9.2. Le jugement

Sur la responsabilité de l'adjudant "H" :

Le fait de s'être engagé avec un groupe sur une piste balisée sans s'enquérir au préalable du point de savoir si cette piste était – ou allait être – ouverte, constitue une faute d'imprudence que n'aurait pas commise un montagnard ou un skieur normalement avisé et diligent compte tenu des circonstances de l'espèce, à savoir :

– l'adjudant "H" se trouvait à Tignes depuis la veille du jour où se sont produits les faits litigieux. Il ne pouvait donc pas ignorer que les conditions météorologiques et nivologiques avaient changé et que pendant la nuit d'une part il était abondamment tombé de la neige humide, d'autre part il avait soufflé en sorte que le fait que la piste était restée ouverte la veille ne pouvait être déterminant et qu'un risque avalancheux ne pouvait être a priori exclu ;

– s'étant engagé sur la piste des Mélèzes ni au départ ni à l'arrivée de celle-ci mais à partir d'un point intermédiaire et environ une heure avant l'heure officielle d'ouverture des pistes (s'il y avait eu ouverture) l'adjudant "H" ne pouvait pas considérer que l'absence de panneaux destinés à matérialiser la fermeture de la piste, à cette heure et en ce lieu pouvait laisser supposer que la piste était ouverte.

Cette faute est en relation de causalité avec le sinistre dans la mesure où si l'adjudant "H" avait téléphoné aux services des pistes, il aurait appris que la piste des Mélèzes resterait fermée en raison du risque d'avalanches naturelles ou artificielles et aurait annulé ou différé la course, ce qui aurait évité à ses hommes d'être exposés au risque qui s'est finalement réalisé ;

Sur la responsabilité du capitaine "S" :

> «... (il) ne s'est pas borné à mettre à la disposition du Bureau d'Instruction un sous-officier sans connaître la mission générale que celui-ci allait devoir assumer... dès lors, il devait porter à la connaissance de celui-ci... les consignes relatives à la conduite des détachements en montagne enneigée alors qu'il savait que "H" devait accomplir pour la première fois la fonction de chef de détachement

2. N.D.L.R. : il s'agit de la *délégation nationale* des services RTM.

dans le cadre d'un stage neige-montagne et qu'il savait que "H" ne connaissait pas les consignes en question que lui-même avait portées à la connaissance de ses seuls chefs de section..."

Sur la responsabilité de "B", pisteur-secouriste :

– "B" a toujours admis qu'il était responsable du déclenchement de l'avalanche dont il s'agit;

– *in abstracto*, le fait que ladite avalanche se soit déclenchée une vingtaine de mètres au-dessus de lui et non sous ses planches, n'est pas de nature à exclure nécessairement sa responsabilité. En effet, l'avalanche se produit à la suite d'un phénomène vibratoire. Or, compte tenu du type de manteau neigeux, cette vibration peut se transmettre bien au-dessus du skieur et atteindre une zone plus fragile;

– c'est bien ce qui s'est passé en l'espèce ainsi que cela résulte de l'analyse effectuée par le servie des pistes de Tignes en date du 5/3/1987, versée aux débats et dont le tribunal fait sienne la conclusion, à savoir : «... cette plaque (à vent) appuyait son ancrage inférieur sur de la neige récente, humide et sans cohésion et son ancrage supérieur contre des rochers permettant de nombreux vides. » Ces phénomènes tenaient cette plaque en déséquilibre sur un site particulièrement raide. Le pisteur secouriste lors de son déplacement pour appliquer le P.I.D.A. a traversé la partie inférieure de cette plaque ce qui a provoqué probablement une accélération de la reptation[3] de la neige. Cette reptation n'a pas trouvé d'appuis dans la partie avale de la plaque pour l'arrêter. Par ailleurs, les vides entre les rochers ont empêché de se développer la force de feutrage de l'ancrage amont de la plaque, qui a continué son accélération jusqu'à la rupture et provoqué l'avalanche qui a entraîné dans son écoulement la neige fraîche récente sans cohésion en aval;

– "B" doit donc être tenu responsable du déclenchement de ladite avalanche;

– en s'engageant dans cette pente, "B" compte tenu de ses fonctions de pisteur-secouriste et du fait qu'il venait de constater qu'une avalanche s'était déclenchée naturellement au cours de la nuit sur une largeur de 60 mètres environ dans la partie la plus à droite de la piste, ne pouvait ignorer qu'il prenait le risque de déclencher une avalanche sur l'autre partie de celle-ci, risque pour lui-même et pour les skieurs qui pourraient éventuellement se trouver en dessous de sa trajectoire;

– car d'une part, sur une partie de cette trajectoire, il lui était impossible de voir si des skieurs se trouvaient sur la piste à la verticale de sa position;

– d'autre part, au moment de s'engager sur cette pente, il n'avait pas (et ne pouvait avoir) la certitude absolue que les militaires resteraient au niveau du pylône où ils s'étaient arrêtés, ainsi que cela résulte de sa première audition (D1/20) dans laquelle il déclare notamment : « nous avons crié de ne pas bouger et avons tenté de nous faire comprendre par gestes. Nous avons entendu le groupe nous répondre mais pour ma part, je ne peux vraiment pas dire quelles ont été les paroles qui ont été prononcées. » ;

– ainsi en prenant le risque de déclencher une avalanche sans avoir la certitude absolue que les militaires ne s'engageraient pas sur la partie de piste située au-dessous de la trajectoire au cours de laquelle il ne pouvait surveiller continûment lesdits militaires, "B" a commis une faute d'imprudence qui engage sa responsabilité. Les prévenus ne pouvaient être condamnés à indemniser la veuve de la victime dès lors que la juridiction de l'ordre judiciaire était incompétente pour statuer sur une demande qui devait être engagée contre l'État en ce qui concerne les militaires et contre la commune en ce qui concerne le pisteur-secouriste, employé de celle-ci.

3.9.3. Analyse

Le jugement n'appelle aucune observation particulière au sujet de la responsabilité de l'officier auquel on reproche un manque d'information de son subordonné sur la mission qu'il devait accomplir. En ce qui concerne la responsabilité du chef du détachement, des fautes graves ont été relevées à son encontre : il ne s'est pas informé de l'ouverture de la piste alors que les circonstances nivo-météorologiques ne permettaient pas de penser que la piste ouverte la veille, le serait le lendemain. S'étant engagé à partir d'un point intermédiaire et une heure avant l'heure d'ouverture possible de la piste, il se mettait dans l'impossibilité de savoir si la piste était ouverte. Quant au pisteur-secouriste, il a pris le risque de déclencher l'avalanche sans avoir la certitude absolue que les militaires dont il connaissait la présence, ne s'engageraient pas sur une zone dangereuse alors qu'il devait procéder à un tir de déclenchement.

3.10. Avalanche à La Grave (31/01/1988)

Arrêt de la chambre administrative d'appel de Lyon du 01/02/1995.

3.10.1. Les circonstances

Le 31 janvier 1988, deux amis avaient décidé d'aller faire des cascades de glace à l'Alpe-d'Huez. Toutefois, compte tenu du trafic routier ce jour-là, ils modifièrent leur projet et partirent faire du ski aux vallons de la Meije (commune de La Grave, Hautes-Alpes). Seul le premier tronçon était ouvert, car le risque d'avalanches était important au-dessus de 2000 m. A la troisième descente, un des deux skieurs fut victime d'une avalanche alors qu'ils s'étaient engagés sur un itinéraire en traversée.

3.10.2. Le jugement

La juridiction d'appel a retenu la responsabilité du maire et a condamné la commune à réparer le préjudice des ayants cause au motif « (...) qu'alors que les conditions météorologiques et l'enneigement laissaient prévoir le déclenchement d'avalanches avec une quasi-certitude sur l'ensemble des itinéraires de ski de haute montagne desservis par le téléphérique de la Meije au-dessus de 2000 mètres, le maire de La Grave n'a pris aucune mesure particulière pour prévenir un tel danger ; qu'ainsi en ne diffusant aucune information particulière à l'usage des skieurs empruntant le téléphérique, les mettant en garde contre la probabilité de déclenchement d'avalanches, le maire de la commune de La Grave a commis dans l'exercice de ses pouvoirs de police une faute lourde de nature à engager la responsabilité de la commune ». La victime a été déclarée responsable à moitié au motif « (...) qu'elle avait choisi de skier sur un itinéraire "dangereux par son exposition et sa pente" ». Mais la juridiction souligne qu'on ne peut lui reprocher de ne pas s'être munie d'un appareil de détection ni de s'être abstenue d'avoir pris contact avec la gendarmerie pour se renseigner sur le risque météorologique.

3.10.3. Analyse

Cet arrêt de la cour administrative d'appel de Lyon apporte un éclairage nouveau sur le devoir d'information des élus et la nature de l'espace montagnard. Ainsi, en rapprochant la faute imputée au maire de l'absence de reproches dont bénéficie le skieur, on revient sur des années de campagne de prévention par laquelle on conseille aux skieurs et aux alpinistes de se renseigner sur les risques liés à la météorologie ! Non dit la justice administrative, c'est le maire qui doit aller au-devant de l'information ; la collectivité la leur doit. Comme le dit M. Allibert, « le juge administratif semble donc prendre en compte plus l'élément de socialisation d'un secteur (la desserte par une remontée mécanique) que la nature spécifique de la zone (haute montagne) ».

3. N.D.L.R. : L'interprétation de l'accident n'engage que la responsabilité de son auteur ; il n'est pas certain qu'on fasse actuellement une pareille lecture des causes du déclenchement !

3.11. Avalanche de Sarenne (Alpe-d'Huez)

Arrêt de la Cour d'appel de Grenoble du 25 février 1998

3.11.1. Les circonstances

Le 1er janvier 1996, vers midi, trois coulées de neige descendirent de façon quasi simultanée les pentes sommitales du glacier de Sarenne où se situent plusieurs pistes desservies par le téléphérique du pic Blanc (3 323 m) sur le territoire de la commune du Freney-d'Oisans. C'est une société d'économie mixte qui assure l'exploitation du domaine skiable. L'une de ces coulées recouvra plusieurs skieurs qui se trouvaient sur une piste ; l'un d'eux décéda.

3.11.2. Le jugement

Étaient poursuivis pour homicide involontaire le directeur du service des pistes, le chef de secteur de la SATA en qualité de personne morale pénalement responsable outre deux pisteurs-secouristes qui ont été relaxés.

Par jugement du 15 mai 1997, le tribunal correctionnel de Grenoble condamna les deux prévenus à la peine de six mois d'emprisonnement avec sursis, qui devait être confirmée par la cour d'Appel. En vertu des dispositions de l'article R.131-36 du code pénal, le comité d'entreprise de la SATA était avisé des poursuites et se déclara inquiète des conséquences d'une condamnation de l'entreprise sur la réputation de la station.

Il est ressorti du rapport établi par le Centre d'Études de la Neige de Grenoble que la cassure du manteau neigeux, variable selon les endroits, atteignait plus d'1,5 m sur une pente de 35° en moyenne et mettait en évidence une couche de neige fragile à la base ; les mesures de résistance au cisaillement ont montré que la résistance de cette couche était voisine de la contrainte motrice imposée par la gravité, ce qui constitue un indice d'instabilité marquée. Les experts de la SATA estimaient qu'ils fallait écarter l'hypothèse d'un déclenchement par des skieurs hors-piste compte tenu de l'existence de trois coulées en des lieux éloignés et sur des pentes orientées différemment. Ils suggéraient l'existence d'un mouvement du glacier ou un effondrement du manteau neigeux.

Le tribunal a retenu la responsabilité pénale de la SATA et des deux autres prévenus aux motifs que les pentes supérieures étaient dans un état d'instabilité très marquée, proche du déclenchement naturel spontané, que l'accumulation d'une très grosse quantité de neige fraîche était nécessairement connue et que le risque était donc prévisible ; il releva en outre que l'absence de précédents connus en ce lieu et la force de l'habitude avait aboli leur esprit critique ; l'ouverture de la piste de Sarenne était constitutive d'une faute. En ce qui concerne les poursuites exercées pénalement contre la SATA sur le fondement de l'article L. 121-2 du Code pénal, celle-ci soutenait que la sécurité sur les pistes ne peut faire l'objet d'une délégation puisque le soin de prévenir les avalanches relève du pouvoir de police du maire selon les dispositions de l'article L. 131-2 du Code des communes ; le tribunal a estimé au contraire que la SATA était titulaire d'une délégation de service public à caractère industriel et commercial aux termes d'un contrat de concession et que si les dispositions de l'article L. 121-2 du Code pénal prévoit que la personne morale est pénalement responsable des infractions commises par ses organes et ses représentants, il ne s'ensuit pas que seuls ses dirigeants doivent nécessairement être poursuivis et que l'expression "organes ou représentants" peut s'appliquer à des salariés.

3.11.3 L'arrêt de la Cour

Devant la Cour de Grenoble, les prévenus soutenaient que les conditions mêmes du déclenchement « en font un événement dont l'origine et la propagation ne sont toujours pas expliquées, qui n'était pas normalement prévisible

compte tenu des vérifications et précautions prises et que la réflexion ayant conduit à l'ouverture n'était pas fautive ».

La SATA contestait le principe de sa responsabilité dès lors que la victime était décédée des suites d'une avalanche dont la prévention ne relève que des seuls pouvoirs de police du maire non susceptibles de délégation, fût-ce dans le cadre de la délégation de service public et industriel et commercial la liant à la commune du Freney-d'Oisans (art. L 131-1 et L. 132-8 du Code des communes). La cour relevait que, si le 1er janvier le bulletin nivo-météorologique de Saint-Martin-d'Hères indiquait un risque marqué d'avalanche (indice 3 évoluant à 4), aucune tentative nouvelle de déclenchement par explosif n'avait été effectuée alors que des essais avaient été effectués la veille et que la piste était ouverte pour la première fois. « L'oubli de cette précaution évidente par suite d'une appréciation erronée de la situation nivologique a joué un rôle causal dans l'accident. » La Cour a retenu la responsabilité pénale du directeur des pistes et du chef de secteur concerné.

3.11.4. Analyse

La responsabilité pénale de la SATA a fait l'objet de motifs exposés minutieusement dans l'arrêt :

- la Cour précise que la sécurité des pistes est l'obligation contractuelle à la charge de la société qui vend les forfaits donnant accès au domaine skiable ;
- l'exploitant des remontées ne peut s'exonérer qu'« en prenant les précautions nécessaires pour que la passage vers les zones non sécurisées dites hors-piste puisse se faire par inadvertance mais au contraire résulte d'un choix délibéré du pratiquant » ;
- l'exploitant doit prendre toutes les précautions nécessaires pour qu'un événement tel qu'un déclenchement accidentel d'avalanche dans le domaine hors-piste n'affecte pas le domaine sécurisé ;
- la Cour a répondu aux arguments de la SATA sur la responsabilité éventuelle du maire que, si la police municipale ne se délègue pas, c'est seulement dans la mesure où le maire exerce son activité par des décisions administratives intervenant sous formes d'arrêtés municipaux ; que si le fait que la police municipale comprenne la prévention des avalanches, le maire n'a pas à prendre la direction quotidienne du service de sécurité du domaine skiable exploité dans un cadre industriel et commercial ;
- la SATA a soutenu que, si les deux prévenus étaient des membres de son personnel, ils ne faisaient pas partie des organes statutaires et ne pouvaient pas la représenter. La Cour a répondu que ce sont eux qui ont normalement exercé le pouvoir de décision de la SATA dans l'obligation de sécurité et qu'ils sont bien dans ce cas concret des représentants de la société pour l'application de l'article L. 121-2 du Code pénal.

La Cour a pris soin de relever les excellents renseignements fournis sur le compte des prévenus, dont l'un est considéré comme l'une des autorités nationales en matière de formation des pisteurs-secouristes et d'artificiers. Il est regrettable que dans cette affaire le Parquet n'ait pas poursuivi le maire ou la commune conformément à une jurisprudence constante des juridictions des ordres administratifs et judiciaires, ce qui aurait sans doute permis de faire le point d'une possible évolution depuis l'arrêt Lafond du 28 avril 1967 alors que le tribunal correctionnel d'Albertville saisi de poursuites contre la commune de Val-d'Isère a jugé que le pouvoir du maire relatif à la sécurité sur les pistes ne peut se déléguer. Il est possible que la mise en cause du maire n'est pas apparue du simple fait que la piste concernée par l'avalanche, si elle fait partie du domaine skiable de l'Alpe-d'Huez, est située sur la commune du Freney-d'Oisans, dont le chef-lieu se trouve dans le fond de la vallée au bord de la route nationale reliant Grenoble à Briançon.

3.12. Avalanche de Val-d'Isère du 23 février 1996

Jugements du tribunal correctionnel d'Albertville des 6 janvier et 7 avril 1997

3.12.1. Circonstances

L'avalanche est survenue le 23 février 1996 à 16h30 deux jours après une petite chute de neige (16 cm) par temps froid (de -16 °C à -10 °C) : partant d'un large panneau dominant la piste de fond de la Daille, elle a parcouru une distance inhabituelle (au regard des conditions nivo-météorologiques) et a enseveli un skieur (appelé ici L), qui décéda. Aucune activité avalancheuse (naturelle ou déclenchée) n'a été observée dans les secteurs de Tignes et Val-d'Isère depuis au moins une semaine [3, 4].

3.12.2. Le jugement

Ont été mis en cause dans deux procédures différentes la commune de Val-d'Isère d'une part, le maire et le chef de la sécurité d'autre part. La commune a été poursuivie pour avoir, en tant que personne morale, par maladresse, imprudence, inattention ou manquement à une obligation de prudence imposée par la loi ou les règlements, omis de fermer la piste alors que le danger d'avalanche était fort, le danger répertorié à cet endroit et le déclenchement préventif non institué au P.I.D.A. et avoir ainsi involontairement causé la mort de L. Mais dans le cas d'une collectivité locale, les dispositions de l'article 121-2 du Code pénal n'autorisent les poursuites qu'à condition que les infractions commises le soient dans l'exercice d'activités susceptibles de faire l'objet d'une délégation de service public.

Alors que le ministère public et la partie civile soutenaient que si le pouvoir de police du maire ne peut se déléguer, la délégation est possible pour le service public de la sécurité, les juges en ont décidé autrement : l'activité visant à prévenir les risques d'avalanche doit relever du pouvoir de police du maire conformément à l'article L. 131-2 du Code des communes ; il n'y avait donc pas de possibilité de délégation et une relaxe fut prononcée. Le Parquet fit appel.

Dans une deuxième procédure, le maire et le chef de la sécurité sur les pistes ont été poursuivis pour la même infraction que ci-dessus. Les prévenus soutenaient que la seule annonce du risque 4 et l'absence du P.I.D.A. ne pouvaient entraîner la fermeture des pistes. Mais le Tribunal a relevé que la piste se trouve au bas de l'avalanche répertoriée sous le nom de la Bouchia ; qu'elle n'avait pas été purgée puisque ne figurant pas au P.I.D.A. ; qu'elle était déjà descendue à plusieurs reprises plus bas que la piste ; que le bulletin météorologique de Bourg-Saint-Maurice du 22 février indiquait un risque 4 à 5 de même que pour le lendemain ; que ces éléments constituaient les fautes pénales devant entraîner une condamnation (en l'espèce une amende de 15 000 F). Les parties en cause n'ont pas interjeté appel ; le jugement est donc définitif.

3.13. Avalanche à Saint-Sorlin-d'Arves du 16 février 1997

Jugement du Tribunal correctionnel d'Albertville du 26 janvier 1998

3.13.1. Les circonstances

Le 16 février 1997, la jeune Marion Labrousse qui skiait sur la piste bleue des Vallons trouvait la mort dans une avalanche. La zone qui domine la piste se trouve sur le versant nord du Petit Perron à une altitude d'environ 2 000 m et la déclivité moyenne de la pente est d'environ 30°. La cassure s'est produite dans une pente convexe orientée au Nord avec une épaisseur variant entre 50 cm et 150 cm dans une zone d'accumulations de neige par le vent. Quels sont les éléments de l'enquête qu'ont retenus les juges pour établir la responsabilité du maire et du chef des pistes ?

3.13.2. Le jugement

Pendant les quatre jours qui ont précédé l'accident, les bulletins météorologiques ont diffusé des avis de tempête en montagne avec de fortes chutes de neige et de forts risques d'avalanches sur l'ensemble des massifs. Le bulletin "Neige et Avalanches" du 15 février du Centre Météorologique de Bourg-Saint-Maurice annonçait sur les massifs de Savoie un risque 4 au-dessus de 1 900 m et précisait : « des départs spontanés de coulées et d'avalanches, le plus souvent de plaques de surface pouvant encore se produire notamment au-dessus de 2 000 m (...) le déclenchement accidentel d'avalanches demeurant fort en de nombreux secteurs » ; le Centre de Saint-Martin-d'Hères précisait pour les 24 heures à venir : « au-dessus de 1 800 à 2 000 m, une forte instabilité subsiste, entretenue par les fortes accumulations de neige fraîche et les plaques instables dues au vent d'ouest qui soufflait pendant les chutes et au vent du nord qui sévit actuellement ».

L'avalanche est répertoriée sur la CLPA dont les services de pistes se sont servis pour l'élaboration du P.I.D.A. ; un arrêté prévoit des déclenchements préventifs par explosifs pour protéger la piste des Vallons.

Il ressort des déclarations du chef des pistes qu'on attendait toujours deux à trois jours de beau temps avant d'ouvrir la piste pour laisser le manteau neigeux se stabiliser.

3.13.3. Analyse

Les juges ont déclaré qu'« en s'abstenant de le faire le 16 février 1997, alors qu'il existait un risque fort et prévisible d'avalanche, le maire de la commune qui est le premier responsable de la sécurité sur les pistes de ski et qui, fort de son expérience de moniteur de ski, n'était pas le plus mal placé pour apprécier les risques en la matière, ainsi que le chef des pistes et de la sécurité de qui relevait la décision d'ouvrir ou de fermer la piste, ont commis des fautes de négligence et d'imprudence en relation certaine avec le décès de Mademoiselle Marion Labrousse, alors que les intéressés avaient le pouvoir, les compétences et les moyens tant techniques que financiers de mettre en œuvre une décision de fermeture de la piste simple à exécuter mais dont il y a tout lieu de penser qu'elle n'a pas été prise par le fait que le jour de l'accident était un dimanche et de surcroît pendant la période de vacances scolaires de février ».

Aux termes du jugement du 26 janvier 1998 du Tribunal correctionnel d'Albertville, les deux prévenus ont été condamnés à la peine de quatre mois d'emprisonnement avec sursis.

Le Tribunal s'est déclaré incompétent pour statuer sur l'action civile « dès lors que sa connaissance relève de la compétence exclusive de la juridiction administrative dans la mesure où la faute commise s'inscrit dans le cadre de l'exercice d'une mission de sécurité publique relevant de la police municipale et n'est pas détachable du service ».

Cette décision est dans la ligne de la jurisprudence en ce qui concerne la responsabilité du maire ; les juges ne se sont pas contentés des indications du bulletin nivo-météorologique mais ont relevé d'autres éléments pour retenir la responsabilité des prévenus.

De plus, ils ont appliqué les dispositions de la loi 13 mai 1996 (article 121-3 nouveau du Code pénal) d'origine sénatoriale, votée pour atténuer la responsabilité des élus.

4. Conclusion

L'examen de ces différentes affaires montré comment et dans quelles circonstances, la responsabilité des skieurs peut être mise en cause, qu'ils soient moniteurs, chef de détachement ou qu'ils skient pour leur propre plaisir ; les

juridictions, après enquête et souvent instruction par un magistrat, s'entourent de tous les moyens mis à leur disposition par la loi pour rassembler les éléments qui interviendront à charge ou à décharge devant les juges. On peut constater que ceux-ci tiennent compte de nombreux paramètres pour apprécier la responsabilité des personnes qui leur sont déférées ; à cet égard, les juges civils procèdent comme leurs collègues des juridictions pénales dès lors que la faute et ses fondements sont les mêmes. Il n'en reste pas moins que parfois la responsabilité est difficile à établir tant l'avalanche est un phénomène naturel complexe et tout le travail de ceux qui étudient ses causes sur le terrain ou en laboratoire tend à apporter à ceux qui sont chargés de rechercher les responsabilités les éléments les plus fiables pour se déterminer. Enfin, il est bon de rappeler en conclusion que si une avalanche peut être déclenchée par l'homme, celui-ci ne sera l'objet de poursuites que dans le cas où il aurait commis une ou plusieurs fautes, lesquelles soit directement, soit indirectement, seraient à l'origine du déclenchement.

✍ Quelques éléments bibliographiques :

[1] L. TUNC et H. MAZEAUD : *Traité théorique et pratique de la responsabilité civile* (1957, Montchrétien, Paris).

[2] P. SARRAZ-BOURNET et J.-L .GRAND : *Droit de l'alpinisme et sauvetage* (1988, P.U.G. Grenoble).

Voir aussi les articles parus dans *Neige et Avalanches* :

[3] J.-F. Meffre : "Sécurité avalanche : obligation de résultat ?", *Neige et Avalanches* 81 (1998) 22-26.

[4] P. Sarraz-Bournet : "Avalanches mortelles", *Neige et Avalanches* 79 (1997) 23-24.

– M. ALLIBERT : "A qui appartient la neige (jugement du 17 avril 1986, commune de la Morte) ?", *Neige et Avalanches* **49** (1989) 23-24.

– M. ALLIBERT : "Le remboursement des frais de secours", *Neige et Avalanches* **50** (1990) 23-27.

– M. ALLIBERT : "A l'impossible, nul n'est tenu (jugement du tribunal administratif du 30 novembre 1989, commune de la Morte)", *Neige et Avalanches* **51** (1990) 22-24.

– M. ALLIBERT : "Du nouveau ? Pas sûr (commentaires sur les derniers textes du J.O. concernant la sécurité)", *Neige et Avalanches* **53/54** (1991) 4-11.

– J. SONNIER : "La responsabilité des maires en matière d'avalanches", *Neige et Avalanches* **60** (1992) 14-15.

– M. ALLIBERT : "La haute montagne : espace de droit !", *Neige et Avalanches* 71 (1995)16-20.

GLOSSAIRE

UTILISATION DU GLOSSAIRE

Le glossaire renvoie aux termes spécifiques utilisés dans le cadre de cet ouvrage. Dans quelques cas, on indique des termes ou des sens utilisés par ailleurs. Un dictionnaire de nivologie par Gaston Tuaillon est en cours de préparation (ANENA).

Chaque entrée est indiquée en caractère gras; elle est suivie de son genre entre parenthèse :

- adj. : adjectif
- n.m. : nom masculin
- n.f. : nom féminin
- loc.m. : locution masculine
- loc.f. : locution féminine
- sigle : sigle

En caractère italique, on propose une traduction en langue anglaise. Dans quelques cas, les concepts ne correspondent pas entre langues et il faut se résoudre à proposer plusieurs traductions ou des termes synonymes. On précise ensuite le(s) sens de l'entrée. Si elle admet plusieurs acceptions ou recouvre des concepts différents, les définitions sont alors généralement séparées d'un point virgule.

accidentel, -le (adj.), *accidental* : qui est dû à un intervenant (être, objet ou phénomène) extérieur; qui provoque un accident; qui est causé involontairement.

aérosol (n.f.), *airborne, aerosol, snow dust cloud* : nuage résultant du mélange de poussières de neige avec l'air (concentration solide inférieure à 10 %). La structure est composée de centres tourbillonnaires se déplaçant à de très grandes vitesses (se mesurant en centaines de mètres par seconde).

aire de départ (loc.f.), *starting zone* : superficie délimitée par la mise en mouvement de la neige durant la phase de départ; dans le cas des avalanches avec départ en plaque, l'aire est définie par les lignes de rupture.

albédo (n.m.), *albedo* : rapport du flux réfléchi sur le flux incident pour le rayonnement solaire. C'est une fonction de la longueur d'onde qui dépend de la nature de la neige.

ancrage (n.m.), *anchor* : obstacle (arbre, rocher...) qui ancre le manteau neigeux, en freinant localement sa reptation; dans le bilan des forces exercées sur une plaque de neige à la rupture, un ancrage est une surface de frottement; attache d'un ouvrage à vent.

artificiel, -le (adj.), *artificial* : se dit d'avalanche dont le déclenchement est dû à l'homme : passage à skis, explosion...

avalanche (n.f.), *avalanche* : écoulement gravitaire rapide de neige. C'est un phénomène naturel qui consiste en un déplacement d'une masse importante de neige (par opposition à une coulée de neige) à des vitesses dépassant le mètre par seconde (par opposition à la reptation, dont la vitesse se mesure en mm/jour). L'ordre de grandeur de la masse est le millier de tonnes, celui du volume est le millier de m^3. La dénivelée se mesure en centaine de mètres.

avalanche coulante ou dense (loc.f.), *flowing (or dense) avalanche* : avalanche de neige coulant au sol dans sa phase d'écoulement et qui est donc astreinte à suivre le relief.

avalanche de couloir (loc.f.), *channelled avalanche* : avalanche canalisée par un couloir dans la zone de transit.

avalanche de fond (loc.f.), *full-depth (or ground) avalanche* : avalanche qui concerne dans la zone d'accumulation le manteau neigeux sur toute son épaisseur. Elle glisse sur le sol.

avalanche de glissement (loc.f.), *glide avalanche* : avalanche de neige très humide, surtout dans les régions de montagne sous influence maritime (Japon, Norvège, Rocheuses Canadiennes...), où le glissement du manteau neigeux provoque une fissuration et, à plus ou moins longue échéance, une avalanche.

avalanche de versant (loc.f), *unconfined avalanche* : avalanche qui s'écoule sur une pente ouverte, un versant.

avalanche en aérosol (loc.f.), *airborne avalanche, dust avalanche* : avalanche sous forme d'aérosol dans sa phase d'écoulement. C'est un écoulement aérien. Voir aérosol.

avalanche exceptionnelle (loc.f.), *exceptional avalanche* : avalanche majeure, dont l'une de ses caractéristiques est hors du commun : ampleur, rareté, impact catastrophique ou singularité.

avalanche immédiate (loc.f.), *immediate, instantaneous avalanche* : avalanche qui part immédiatement après le début d'une chute de pluie.

avalanche majeure (loc.f.), *major avalanche* : avalanche qui parcourt les 3 zones d'un site.

avalanche mixte (loc.f.), *mixed avalanche* : avalanche possédant une partie dense et une autre partie en aérosol. Les deux écoulements peuvent être autonomes ou dépendants.

avalanche pâteuse (loc.f.), *slush avalanche* : avalanche mobilisant de la neige très fortement humidifiée (TEL>8 %), dont la consistance rappelle celle du yaourt. Ce type d'avalanche peut parcourir de grandes distances.

avalanche retardée (loc.f.), *delayed avalanche; delayed-action avalanche* : avalanche qui part après une chute de pluie, lorsque l'eau de pluie a pénétré profondément dans le manteau neigeux ; avalanche dont le déclenchement n'est dû ni au passage d'une dépression, ni à un réchauffement.

avalanche superficielle (loc.f.), *surface-layer avalanche* : avalanche dont le départ ne concerne que des couches superficielles du manteau neigeux.

barkhane (n.m.), *snow barcan* : sculpture de la neige en surface du manteau neigeux, en forme de croissant, due à un dépôt de neige par le vent.

bassin (n.m.), *bowl* : large cuvette dans la zone d'accumulation.

bloc norvégien (loc.m.), *rutschblock test* : test permettant d'évaluer la stabilité d'un bloc de neige prédécoupé afin d'apprécier le risque d'avalanche.

BRA (sigle), *avalanche hazard report* : sigle pour bulletin d'estimation du risque d'avalanche diffusé par Météo-France pour la prévision du risque d'avalanche et des conditions nivologiques.

chaleur latente (loc.f.), *latent heat* : quantité de chaleur à fournir pour un corps (ou fourni par un corps) lors d'un changement de phase.

charriage (n.m.), *drifting, rolling* : mode de transport de la neige par le vent se manifestant par un glissement des grains juste à la surface du manteau neigeux. Synonyme : reptation.

chasse-neige (n.f.), *blowing snow* : transport de neige par le vent, caractérisé en altitude par des tourbillons de neige au-dessus des crêtes.

CLPA (sigle) : sigle pour carte de localisation probable des avalanches.

cohésion (n.f.), *cohesion* : capacité d'un matériau à rester en bloc lorsqu'il est soumis à une sollicitation extérieure (définition à l'échelle macroscopique). Lien existant entre les grains à l'échelle microscopique. On distingue : cohésion de feutrage, frittage, capillaire, de regel.

cohésion capillaire (loc.f.) *capillary cohesion* : cohésion due à la présence d'une pellicule d'eau liquide autour des grains (ronds).

cohésion de regel (loc.f.) : cohésion due au gel de l'eau liquide au sein du manteau neigeux.

coin suisse (loc.m.), *rutschblock test* : test basé sur la stabilité d'un coin prédécoupé et chargé afin d'apprécier le risque d'avalanche.

contrainte (n.f.), *stress* : force de contact (dF) s'exerçant sur une surface élémentaire (infinitésimale dS) et rapportée à l'aire de cette surface : s=dF/dS (en Pa).

corniche (n.f.), *cornice* : accumulation de neige (poussée par le vent) le long d'une crête.

corps (n.m.), *body* : partie principale de l'avalanche.

couche fragile (loc.f.), *weak layer* : couche de neige de faible cohésion (gobelets, faces planes).

couche mince (loc.f.) *thin layer* : couche de neige de faible épaisseur, en général de faible cohésion et constituée de neige roulée, de givre, de gobelets ou de faces planes.
couche super-fragile (loc.f.), *super-weak layer* : strate de neige se développant dans une couche mince et qui est supposée être à l'origine de départs en plaque.
couloir (n.m.), *gully, channel* : profil de terrain encaissé dont la largeur est très inférieure à la longueur.
coulée (n.f.), *sluff* : déplacement gravitaire rapide de neige. Sa masse est beaucoup plus faible que celle d'une avalanche, elle n'affecte en général qu'une zone d'un site et ses phases se confondent.
crête (n.f.), *ridge* : ligne de partage entre deux pentes d'exposition opposée.
critique (adj.), *critical* : se dit d'un paramètre dont la valeur devient décisive et influente sur l'évolution générale du système ; se dit d'un phénomène ou d'un système dont l'état varie rapidement et brusquement, parfois de manière discontinue, lorsque l'on fait varier même faiblement un des paramètres, en général, à l'approche d'un point seuil.
croûte (n.f.), *crust* : couche composée de neige dure sur une faible épaisseur (quelques centimètres). Tous les grains sont capables de former des croûtes, mais les plus fréquentes sont les croûtes de grains ronds.
croûte de regel (loc.f.), *meltwater crust* : croûte due au regel de l'eau liquide à la surface du manteau neigeux.
déclenchement (n.m.), *release, triggering* : mise en mouvement de la neige ; pour le BRA, phénomène de rupture accidentelle du manteau neigeux provoquant une coulée ou une avalanche.
déclivité (n.f.), *slope* : angle que fait une pente par rapport à l'horizontale. Elle est exprimée dans le livre en ° (ailleurs, elle est souvent exprimée en %).
décrochement (n.f.), *release* : mise en mouvement spontanée ou artificielle de l'ensemble ou d'une partie du manteau neigeux suivant une fracture (ou cassure) linéaire.
départ (n.m.), *start* : mise en mouvement de la neige ; phénomène de rupture spontanée du manteau neigeux provoquant une coulée ou une avalanche.
départ en plaque (loc.m.), *slab start* : mise en mouvement de la neige par fissuration linéaire des couches superficielles du manteau neigeux.
départ mixte (loc.m.), *mixed start* : départ ponctuel qui provoque un départ en plaque.
départ ponctuel (loc.m.), *loose snow avalanche* : mise en mouvement d'une neige sans cohésion qui part d'un point.
dépôt (n.m.), *snow deposit* : accumulation locale de neige due à une avalanche (v. zone de dépôt), due au vent (zone de suraccumulation), sur un obstacle (câble, mur...). Voir zone de dépôt.
drainage (n.m.), *funicular regime* : évacuation de l'eau liquide contenue au sein du manteau neigeux très humide.
dureté (n.f.), *hardness* : résistance d'une surface à la pénétration d'un objet. Dans le cas de la neige, on l'estime à partir d'un test manuel ou d'un sondage par battage.
effet de rayon de courbure (loc.m.), *rounding, equilibrium form curvature effect* : processus durant lequel les parties saillantes d'un cristal se subliment tandis que les parties creuses sont le siège de la condensation solide. Ce processus est prédominant par rapport au givrage lorsque le gradient de température est faible.
épaisseur (n.f.), *depth* : mesure selon la normale à la pente de la dimension du manteau neigeux ou de l'écoulement. On relie l'épaisseur (E) à la hauteur (H) avec la pente (θ) : $E=H\cos\theta$.

exposition (n.f.), *orientation, exposure* : orientation d'une pente au soleil ou au vent ; estimation du danger auquel est soumis le skieur dans une pente (barre rocheuse, pente raide...).

feutrage (n.m.) : processus d'assemblage des cristaux par imbrication de leurs branches.

flocon (n.m.), *snowflake* : agglomérat de cristaux de neige précipitée.

fluage (n.m.), *creep* : déformation lente subie par un matériau soumis à une contrainte permanente.

flux d'origine géothermique (loc.m.) : flux de chaleur émanant du centre de la terre. Ce flux est de 2 à 5 W/m^2 c'est-à-dire qu'il apporte 20 Joules/m^2/an à la base du manteau.

foehn (n.m.), *chinook* : vent chaud et sec dû généralement dans les Alpes à un retour d'est.

frittage (n.m.), *sintering* : processus d'agglomération des grains qui se soudent au niveau de leurs points de contact. La cohésion devient bonne lorsque le frittage est fort.

front (n.m.), *front* : partie aval du contour d'une avalanche. C'est une surface de discontinuité du point de vue cinématique ; zone de contact entre deux masses d'air (chaude et froide).

front de reprise (loc.m.) : surface de reprise au sein du manteau neigeux au passage de l'avalanche.

germe (n.m.), *ice splinter* : forme élémentaire de cristal de glace autour d'un noyau de condensation ou de congélation.

givrage (n.m.), *recrystallization, kinetic growth form* : processus de formation de grains à faces planes et de gobelets, devenant prépondérant par rapport à l'effet de rayon de courbure aux forts gradients (G>0,2°/cm).

givre de profondeur (loc.m.), *depth hoar* : autre nom donné à une couche de gobelets.

givre de surface (loc.m.), *hoarfrost* : dépôt de glace résultant de la congélation de gouttelettes en surfusion sur des surfaces.

givre opaque (loc.m.), *rime* : dépôt cristallin en forme de flammes sur des surfaces froides (rocher, câble, poteaux...) résultant de la condensation solide de la vapeur d'eau.

gobelet (n.m.), *cup crystal* : cristal de neige résultant d'une métamorphose de fort gradient. Sa taille est comprise entre 2 et 5 mm.

gradient (n.m.), *gradient* : ici, on parle exclusivement de gradient de température calculé selon la normale à la pente (non nécessairement horizontale) et défini comme étant la variation de température par unité de longueur.

grain à faces planes (loc.m.), *faceted grain* : cristal de neige résultant de la métamorphose de moyen gradient.

grain fin (loc.m.), *rounded grain* : cristal de neige résultant de la métamorphose de faible gradient.

grain rond (loc.m.), *melt-freeze particles* : cristal de neige résultant de la métamorphose de neige mouillée. Sa taille est comprise entre 1 et 2 mm.

grêle (n.f.), *hail* : type de précipitation solide constituée de morceaux de glace d'un diamètre variant entre 5 et 50 mm, parfois plus. De forme sphérique, le grêlon est constitué de couches de glace successives.

grésil (n.m.), *graupel* : type de neige précipitée (appelé encore neige roulée) sous forme de cristaux de glace ; le grésil est constitué de cristaux ayant traversé ou séjourné dans des masses nuageuses turbulentes formées de goutelettes surfondues. Celles-ci, au contact du cristal, vont se congeler (givrage du cristal).

Si le phénomène dure assez longtemps, le cristal disparaît complétement sous une gangue de particules de glace opaque et prend l'aspect d'une boule de "mimosa".

hauteur (n.m.), *depth, height* : mesure selon la verticale du manteau neigeux ou de l'écoulement.

interface (n.f.), *interface* : frontière assurant la liaison entre deux couches.

isotherme (n.f.), *isotherm* : altitude représentant la surface dans l'atmosphère où tous les points (loin de l'influence du sol) sont à la même température (0 °C ou -10 °C).

ligne de fracture (loc.f.), *crown fracture line* : fracture amont lors d'un départ en plaque.

lombarde (n.f.) : vent violent comparable au fœhn soufflant sur la chaîne frontalière avec l'Italie lors du passage de dépressions venant du golfe de Gênes.

marche d'escalier (loc.f.), *step-shaped* : départ concernant successivement plusieurs couches de sorte que le profil en long du manteau neigeux après le départ rappelle des escaliers.

manteau neigeux (loc.m.), *snow pack, snow cover* : ensemble résultant de la superposition des couches de neige correspondant chacune à un épisode météorologique (précipitation, transport par le vent).

métamorphose (n.f.), *metamorphism* : changement de forme d'un cristal de neige déposé à la suite de transformations mécaniques et surtout thermodynamiques.

métamorphose de faible gradient (loc.f.), *equilibrium form, equi-temperature metamorphism* : métamorphose de neige sèche commandée par un gradient faible ($G<0,1$ °C/cm). L'effet prédominant est l'effet de rayon de courbure, qui conduit au frittage et à la formation de grains fins.

métamorphose de fort gradient (loc.f.), *temperature gradient metamorphism* : métamorphose de neige sèche commandée par un gradient fort ($G>0,2$ °C/cm). Elle est responsable de la formation de gobelets.

métamorphose de moyen gradient (loc.f.) : métamorphose de neige sèche commandée par un gradient moyen ($0,1<G<0,2$ °C/cm), où le givrage concurrence l'effet de rayon de courbure. Elle aboutit à la formation de grains à faces planes.

métamorphose de neige humide (loc.f.), *melt-freeze metamorphism* : métamorphose concernant la neige humide (TEL>0%). Elle aboutit à la formation de grains ronds.

métamorphose de neige sèche (loc.f.), *dry-snow metamorphism* : métamorphose concernant de la neige sèche (TEL=0%). Selon le gradient de température, on considère les métamorphoses de faible, moyen ou fort gradient. La température influe sur l'efficacité et la rapidité de ces transformations thermodynamiques.

micro-relief (n.m.) : accident de terrain de faibles dimensions (de l'ordre du m).

naturel, -le (adj.), *natural* : qui est propre à la nature ; se dit d'avalanche dont la cause du départ est intervenue sans élément extérieur.

nébulosité (n.f.), *nebulosity, cloud cover* : fraction du ciel couverte par des nuages à un moment donné. Les météorologistes la mesurent en octa (1 octa = 1/8 du ciel couvert).

neige (n.f.), *snow* : cristal de glace ou amas de cristaux de glace (flocon) ; accumulation de ces cristaux.

neige croûtée (loc.f.), *crust* : couche de neige dont la surface présente une croûte plus ou moins cassante due au regel, au vent, à la pluie...

neige fondante (loc.f.), *melting snow* : neige composée de grains ronds regelés et qui commencent à fondre en surface sous l'action du soleil.

neige fraîche (loc.f.), *new snow* : neige récente encore composée de particules reconnaissables.

neige humide (loc.f.), *damp, wet snow* : neige contenant de l'eau sous forme liquide (TEL>0%). Sa température est toujours de 0 °C.

neige mouillée (loc.f.), *rotten snow, slush snow* : neige très humidifiée (pourrie) possédant une TEL importante.

neige poudreuse (loc.f.), *powder, featherlike snow* : neige récente peu transformée caractérisée par une TEL nulle, une faible masse volumique et une cohésion faible (particules reconnaissables). Certaines neiges transformées (couche de faces planes) peuvent garder ou acquérir un aspect poudreux.

neige profonde (loc.f.) : neige poudreuse d'épaisseur importante.

neige roulée (loc.f.), *graupel, pellet snow* : voir grésil.

neige sèche (loc.f.), *dry snow* : neige qui ne contient pas d'eau (TEL=0%) sous forme liquide.

neige soufflée (loc.f.), *drift snow, wind blown snow* : neige ayant subi une action du vent (transport ou érosion). Les zones d'érosion sont en général caractérisées par une surface irrégulière (neige dure, zastrugis, rides...).

neige trafollée (loc.f.) : neige de surface déjà tracée par des skieurs. C'est un terme du langage familier.

neige transformée (loc.f.), *spring snow* : neige (totalement) métamorphosée ayant subi un cycle de gel/dégel et composée de grains ronds. La couche superficielle présente une croûte très dure le matin qui fond durant la journée.

névé (n.m.), *firn* : plaque de neige isolée, mais relativement importante, persistant l'été, de masse volumique importante (supérieure à 500 kg/m^3).

occlusion (n.f.), *occlusion* : phénomène durant lequel l'air chaud rejeté en altitude par de l'air froid rattrape une nouvelle zone d'air froid.

panache (n.m.), *plume* : petit nuage de neige expulsée au-dessus du corps de l'avalanche et sans contribution à la dynamique de l'ensemble.

panneau (n.m.), *panel* : unité géographique de base dans la subdivision de la zone d'accumulation. La troncature en panneaux est réalisée par l'expert en fonction des conditions nivologiques (accumulation de la neige, formation du manteau) et des possibilités de décrochement. Ce sont les unités de fonctionnement de l'avalanche dans sa phase de départ. Deux panneaux peuvent recouvrir une même partie.

particule reconnaissable (loc.f.), *partly branched, snow slightly settled, settling snow* : grain altéré de neige rappelant encore la forme originelle du cristal dont il est issu.

pénitent (n.m.) : glace en forme de dent inclinée à 45° vers le sud et résultant d'une évaporation rapide de l'eau à la surface du manteau neigeux.

percolation (n.f.), *percolation* : écoulement de l'eau liquide (pluie, fonte) au sein du manteau.

période de retour (loc.f.), *return period* : fréquence, temps statistique nécessaire pour qu'un phénomène d'ampleur ou d'extension donnée se reproduise.

phase (n.f.), *phase, stage* : stade (temporel) suivi par une avalanche déterminable par sa cinématique ; on distingue le départ, l'écoulement à proprement parler et l'arrêt de l'avalanche.

phase d'arrêt (loc.f.), *stopping phase* : stade durant lequel l'avalanche ralentit et s'arrête sur la zone de dépôt.

phase d'écoulement (loc.f.), *streaming, flowing phase* : stade durant lequel l'avalanche s'écoule dans la zone de transit.

phase de départ (loc.f.), *starting phase* : stade durant lequel la neige se met en mouvement dans la zone d'accumulation.

plaque (n.f.), *slab* : surface mise en mouvement au moment de la rupture au sein du manteau neigeux ; ensemble de couches se démarquant du reste du manteau neigeux dans un profil de battage. Voir départ en plaque, structure en plaque, plaque à vent.

plaque à vent (loc.f.), *wind slab* : accumulation de neige transportée par le vent.

plastique (adj.), *plastic* : se dit d'une déformation irréversible après que le seuil d'élasticité a été dépassé.

pluie (n.f.), *rain* : précipitations arrivant au sol sous forme de gouttes d'eau (liquide).

pont de glace (loc.m.), *neck, bond* : liaison entre deux grains résultant d'un frittage.

pression (n.f.), *pressure* : contrainte isotrope exercée par l'atmosphère ou tout autre fluide ; plus généralement, contrainte normale à une paroi.

pression de saturation (loc.f.), *saturation vapor pressure* : c'est le seuil de pression (appelé encore pression de vapeur saturante) au-dessus duquel il y a condensation et au-dessous duquel il y a sublimation ou évaporation. La pression de saturation dépend de la température et de la surface de sublimation ou d'évaporation : c'est une fonction croissante de la température et du rayon de courbure de la surface si elle est concave (décroissante si elle est convexe).

prise de cohésion (loc.f.), *quick sintering* : phénomène rapide (quelques heures) durant lequel la neige fraîche commence à changer de cohésion (frittage).

probabilité de déclenchement (loc.f.), *release probability* : probabilité qu'une avalanche ait lieu dans un laps de temps donné et pour une famille de pentes, de manteaux neigeux donnée.

profil par battage (loc.m.), *rammsonde profile* : profil établi à l'aide d'un sondage de battage qui représente sous forme d'histogramme la résistance au battage (ou à la pénétration) en fonction de la profondeur. Il permet de se faire une idée de la stratification et de la dureté du manteau neigeux.

profil stratigraphique (loc.m.), *stratigraphic profile* : coupe du manteau neigeux réalisée à partir d'une tranchée selon la verticale permettant de mettre en évidence les strates du manteau neigeux.

queue (n.f.), *tail* : partie postérieure de l'avalanche.

redoux (n.m.), *warming* : réchauffement de l'air avec ou sans précipitations.

reprise (n.f.), *snow incorporation drifting* : phénomène d'incorporation de la neige du manteau dans la masse de l'avalanche ; mise en suspension de neige au sol et transport par le vent.

reptation (n.f.), *creep* : déplacement gravitaire de l'ensemble du manteau neigeux le long du sol. La reptation résulte du fluage au sein du manteau et du glissement du manteau sur le sol. Sa vitesse est de l'ordre du mm/jour. Ce terme est également synonyme de charriage.

résistance (n.f.), *strength* : force ou contrainte maximale que peut supporter sans rupture un matériau.

résistance au battage (loc.f.), *ramstrength* : résistance exercée par la neige lorsqu'on la soumet à un sondage par battage.

ride (n.f.), *ripple, wave* : forme d'érosion de la surface du manteau neigeux due au vent ressemblant à des vaguelettes assez régulièrement espacées.

risque (n.m.), *risk, hazard* : estimation d'un danger ; aléa dommageable.

saltation (n.f.), *saltation* : mode de transport de la neige par le vent se manifestant par une mise en mouvement des grains qui rebondissent en effectuant des "sauts de puce".

sastrugi (n.m.), *sastrugi* : voir zastrugis.

scénario majeur (loc.m.), *major scenario* : séquence des événements météorologiques et nivologiques conduisant à la formation d'avalanches majeures.

scissomètre (n.m.), *shear-frame* : instrument destiné à mesurer la résistance au cisaillement de la neige.

seuil de saturation (loc.m.), *saturation yield* : masse de vapeur d'eau (donnée en g) maximale contenu par 1 m^3 d'air à une température donnée, au-delà du seuil la vapeur se condense. C'est une fonction croissante de la température.

site (n.m.), *avalanche path* : unité géographique de superficie minimale dans laquelle toutes les avalanches majeures partageant la même zone d'écoulement s'écoulent.

spontané (adj.), *spontaneous* : avalanche dont la cause est interne au manteau neigeux.

sondage par battage (loc.m.), *ramtest* : méthode d'investigation du manteau neigeux, consistant à associer une résistance mécanique (à la pénétration) au nombre de coups nécessaire pour enfoncer un tube métallique dans le manteau d'une distance donnée. On le représente sous forme d'un histogramme des résistances en fonction de la hauteur.

stabilité (n.m.), *stability* : équilibre des contraintes au sein du manteau neigeux.

strate (n.f.), *layer* : couche de neige constitutive du manteau et résultant d'une précipitation de neige ou du transport de neige par le vent. Chaque strate possède des propriétés mécaniques propres et relativement homogènes.

stratigraphie (n.f.), *layering* : étude des strates constituant le manteau neigeux, le plus souvent réalisée à partir d'un sondage selon la verticale.

structure en plaque (loc.f.), *slab pattern* : ensemble de couches dans un histogramme de battage, dont la résistance au battage devient importante et permet de les distinguer du reste du manteau neigeux.

suraccumulation (n.f.), *accumulation* : zone d'accumulation de neige transportée par le vent.

surface de glissement (loc.f.), *bed surface, gliding surface* : surface sur laquelle une plaque de neige glisse, en général il s'agit d'une couche fragile, d'une couche mince ou d'une croûte.

surfusion (n.f.), *surfusion* : phénomène permettant d'expliquer la persistance de l'état liquide à des températures inférieures à 0 °C ; c'est un processus instable qui aboutit à la condensation lorsqu'il est perturbé même faiblement (choc thermique, rencontre avec des poussières...).

suspension (n.f.), *suspension* : mode de transport (par diffusion turbulente) de la neige par le vent se manifestant par une projection des grains dans l'air sur parfois plusieurs dizaines de mètres ; processus de formation des aérosols.

synoptique (adj.), *prevailing* : v. vent.

talweg, thalweg (n.m.), *thalweg* : ligne joignant les points les plus bas du fond de vallée.

tassement (n.m.), *settlement* : diminution du volume de la neige du fait de la métamorphose ou de contraintes de compression.

température (n.f.), *temperature* : grandeur physique traduisant de manière objective à l'état macroscopique la sensation de chaud et de froid, à l'état microscopique l'agitation moléculaire (mouvement, échange de chaleur...).

temps de frittage (loc.m.), *sintering time* : temps nécessaire à la construction d'un pont de glace entre deux grains. Théoriquement, il est défini comme le temps requis pour le développement d'un pont de glace entre deux sphères identiques. Il dépend de la taille du grain et de la température de l'air.

teneur en eau liquide (loc.f), *liquid water content* : il existe plusieurs définitions selon que l'on parle de teneur massique ou de teneur volumique. La teneur mas-

sique est la masse d'eau liquide contenue par rapport à la masse totale d'un échantillon. On obtient en laboratoire cette mesure par centrifugation ou calorimétrie. Plus usuelle de nos jours, la teneur volumique est définie comme le rapport du volume d'eau liquide sur le volume total de l'échantillon. Elle est réalisable sur le terrain par conductométrie. Sa mesure est en % et son abréviation est TEL.

test de la pelle (loc.f.), *shovel test* : test permettant d'apprécier la stabilité superficielle du manteau neigeux en tirant au moyen d'une pelle un bloc prédécoupé.

test du bâton (loc.f.), *stick test* : test permettant d'apprécier la consistance de la neige de surface en enfonçant son bâton.

valeur en eau liquide (loc.f.), *water equivalent* : valeur du volume d'eau (donnée en mm) obtenue si l'on faisait fondre une tranche verticale de base 1 m^2 du manteau neigeux.

vent (n.m.), *wind* : mouvement d'air provoqué par des causes diverses (variations de pression, de température...) et sur des échelles de distance variables. On distingue le vent synoptique qui souffle en altitude et dont les caractéristiques sont liées à un champ de pression (anticyclone, dépression) ou à une masse d'air, du vent local qui est influencé par la topographie, le vent au sol qui dépend de la rugosité du sol et des micro-reliefs.

vent de l'avalanche (loc.m) *avalanche wind, airblast* : souffle précédant le front de l'avalanche (en général mixte ou en aérosol).

verglas (n.m.), *glazed frost* : dépôt de glace à la surface du couvert neigeux.

versant au vent (loc.m.), *windward slope* : versant exposé au vent.

versant sous le vent (loc.m.), *leeward slope* : versant à l'abri du vent.

vitesse (n.f.), *velocity* : distance parcourue par unité de temps, elle se mesure pour une avalanche en m/s. Pour l'observateur, il s'agit le plus souvent de la vitesse du front de l'avalanche.

vitesse de déformation (loc.f.), *strain rate* : vitesse à laquelle une déformation se produit.

zastrugis (n.m.), *sastrugi* : trace d'érosion à la surface de la neige en forme de vaguelettes anguleuses.

zone d'érosion (loc.f.), *erosion zone* : surface balayée par le vent, qui l'érode et transporte la neige ; syn : zone de reprise, d'ablation éolienne.

zone d'accumulation (loc.f.), *accumulation zone* : sous-unité géographique d'un site où la neige s'accumule lors d'épisodes météorologiques (neigeux) et où se déclenchent les avalanches ; lorsque l'on parle de transport de neige par le vent, extension géographique des suraccumulations.

zone de dépôt (loc.f.), *runout zone, deposition zone (for aerosol)* : sous-unité géographique d'un site où s'arrêtent toutes les avalanches majeures et où est déposée la neige transportée.

zone de transit (loc.f.), *track, zone of transition* : sous-unité géographique d'un site qui est parcourue par toutes les avalanches majeures.

banquette (n.f.), *terrace* : terrassement effectué dans les zones d'accumulation pour réduire la reptation de la neige et son glissement au sol. On distingue des banquettes larges et étroites (de largeur inférieure au mètre).

barrière à neige (loc.f.), *drift snow fence* : barrière destinée à modifier l'écoulement d'air donc le dépôt de neige soufflée pouvant en résulter.

claie (n.f.), *snow bridge* : ouvrage similaire au râtelier, mais avec transverses horizontales.

dent (n.f.), *braking tooth* : ouvrage pyramidal en béton installé en réseau destiné à freiner une avalanche.

digue (n.f.), *arrester bench, deflecter dam* : mur de protection pour tenter de canaliser ou d'arrêter une avalanche.

étrave (n.f.), *wedge splitter* : ouvrage de défense en forme de coin, destiné à protéger un équipement d'une avalanche.

filet (n.m.), *snow net* : nappes triangulaires en acier souple de principe similaire au râtelier.

fraise (n. f.), *snow blower* : outil destiné au déneigement des routes.

râtelier (n.m.), *snow barrier, supporting structure* : ouvrage composé d'un tablier à traverses verticales, destiné à retenir le manteau neigeux dans la zone d'accumulation.

tas (n.m.), *mound* : monticule installé en réseau destiné à freiner une avalanche.

toit-buse (n.m.), *jetroof* : panneau en bois incliné d'environ 40 à 45° destiné à perturber l'écoulement d'air.

tourne (n.f.), *deflector* : ouvrage de défense d'un équipement, destiné à dévier localement une avalanche vers le côté.

vire-vent (n.m) : tablier vertical de forme trapézoïdale destinée à modifier l'écoulement d'air et le dépôt de neige soufflée.

INDEX

accumulation 52, 84, 90, 100, 110, 134, 167, 176, 232, 240, 246, 312
aérosol 40, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 99, 106, 122, 123, 124, 134, 165, 179, 180
voir avalanche en aérosol.
aire d'arrêt 91 ;
de départ 91, 93, 96, 111, 114, 116 ;
de sédimentation 91
aléa 99, 127, 128, 179, 180
altitude 204, 235
ancrage 69, 174, 182, 316
ARVA 6, 110, 187, 210, 215, 216, 223, 253, 285, 289
avalanche accidentelle 98 ;
coulante 92, 122 ;
de couloir 96 ;
de fond 96 ;
de glissement 93 ;
de versant 96 ;
en aérosol 92, 123 ;
exceptionnelle 87, 166, 254 ;
immédiate 102 ;
majeure 90 ;
mixte 92, 124 ;
naturelle 98 ;
pâteuse 99 ;
retardée 102, 118 ;
superficielle 96
banquette 26
barrière à neige 174
battage 136
bloc norvégien 137
voir coin suisse, essai de glissement.
BRA 135, 198
brouillard 45
cadre de cisaillement 136
CATEX 176
CEC 264, 272
chaleur latente 36
chances de survie 279
changement de pente 69, 121
charriage 53
cisaillement 67, 136
claie 174
classification 88
CLPA 133, 177
cohésion 65, 76, 80, 112, 119, 122, 232 ;
capillaire 66, 234 ;
de feutrage 60, 81, 119, 229 ;
de frittage 58, 232 ;
de regel 212, 218
coin suisse 136, 137, 138, 228, 236, 221,224, 248
voir bloc norvégien, essai de glissement.
condensation 37
congère 52, 85, 165, 169, 174, 181
corniche 52, 53,204, 246
couche fragile 81, 105, 106, 115, 121, 228, 229 ;
couche fragile mince 115, 231 ;
couche mince 75
coulée 25, 28, 90, 92
CPT 175
crevasse 108
croûte 77, 82, 84, 85, 103, 105, 106, 114, 120, 142, 180
défense temporaire passive 165
défense permanente active 161
défense permanente passive 161
défense temporaire active 165
dégel 43, 205
dent 179 ;
dent freineuse 162
départ en plaque 93, 114 ;
départ mixte 93 ;
départ ponctuel 93
dépôt 96
détonateur 94, 98, 99, 115, 179, 206
digue 179 ; digue d'arrêt 162
distance d'arrêt 91
DRA 174
dureté 74
effet de foehn 47, 48
effet de souffle 89, 90, 91, 92, 96
EPA 132, 133, 177
essai de glissement 137, 140, 141
voir bloc norvégien, coin suisse.
état critique 121
étrave 166, 172, 184

expert 87, 128, 131, 132, 134, 297
explosif 141
exposition 100, 236
faute civile 297 ;
  faute contractuelle 300 ;
  faute délictuelle 298 ;
  faute pénale 297
feutrage 232,
voir cohésion.
filet 158
foehn 35, 39, 48
forêt 25, 100
fracture 260
frittage 58, 60, 81, 102, 116,
  119, 120, 121, 232
voir cohésion.
front chaud 41, 42, 43, 44, 45 ;
  front froid 42, 43, 44, 45, 46
galerie 132, 167
GAZEX 176
gel 38, 85
gelure 269
givrage 60, 61
givre 51, 84, 114 ;
  givre de surface 51, 77, 100 ;
  givre de profondeur 62
glacier 191
gobelet 62, 77, 114, 117,
  208, 232
gradient de température 59, 60,
  64, 77, 228, 231
grains à faces planes 58, 61, 62, 64,
  106, 108, 145, 226, 229
grains fins 58, 60, 61, 62,
  64, 67, 84, 110, 119
grains ronds 63, 64, 84,
  105, 114
grêle 51
haie brise-vent 182
hauteur 73
histogramme de battage 75, 105
humidification 234
humidité 75
hypothermie 264
inclinaison 23, 99, 137, 182,
  235, 236, 237, 242, 255, 308
indice de stabilité 136, 139
insolation 258
inversion de température 38
isobare 38, 39, 91
isotherme 37, 38, 51, 103,
  198, 200, 201, 226
ligne de fracture 113
lombarde 24, 47, 48
luxation 244, 262
masse volumique 51, 73, 74, 75, 76,
  77, 84, 103, 105, 120, 123, 140,
  143, 229
métamorphose 59, 84, 99, 116, 201,
  208, 228, 238 ;
  de faible gradient 60 ;
  de fort gradient 62 ;
  de moyen gradient 61
modèle 134
modélisation 116, 134
mur de foehn 48
nébulosité 235
neige collante 84 ;
neige croûtée 84 ;
neige fondante 84 ;
neige mouillée 75, 84 ;
neige profonde 84 ;
neige roulée 46, 50, 105, 115 ;
neige sèche 75, 84, 89, 96, 103, 117,
  122, 144 ;
neige soufflée 54, 84 ;
neige trafollée 84 ;
neige transformée 84
normalisation 172, 274 ;
  norme 169, 185
nuage 40, 49
occlusion 42, 45
OPA 132, 133, 177
ophtalmie 273
orientation 100, 137, 182, 187
ORSEC 182
Pandalp 75, 79, 80
panneau 90, 94, 98, 103, 167, 202,
  248, 306
particules reconnaissables 59, 78, 84,
  114, 124
partie dense 106, 124, 180
pelle 221
pénétromètre dynamique 75
PER 161, 162
percolation 85, 102, 118, 119, 232
période de retour 127, 131
perturbation 41, 43
phase 91, 93 ;
  phase d'arrêt 91, 96 ;
  phase d'écoulement 91, 96 ;
  phase de départ 91, 93
PIDA 141, 176, 308
plan de glissement 79, 96, 110, 120
plaque 88, 113 ;
  plaque à vent 54, 79, 84, 229, 306 ;
  plaque friable 229
pluie 38, 71, 85, 102, 118
PLS 259
POS 177

PPR 177, 178
précipitations 26, 36, 42, 49, 51, 60, 71, 232
pression 36, 40, 60, 194, 245
prise de cohésion 60, 81, 234
probabilité de déclenchement 116, 139, 198, 226, 236, 317
profil stratigraphique 74, 75, 80, 110, 138, 144
propagation 116, 119, 120
PSS 181
PZEA 177
qualité critique 89, 119, 229
râtelier 174
reboisement 166, 184
redoux 45, 104
regel 37, 77, 82, 103, 114, 200, 228, 248
reprise 91, 112, 240
reptation 68, 88, 93, 100, 118, 154
résistance au cisaillement 73, 103, 136
retour d'Est 47
revégétalisation 174
risque 24, 127, 129, 135, 141, 178, 209, 225, 301
RTM , 165, 166, 167
rupture 110, 117
rupture de pente 198, 244
saltation 52, 184
scénario, scénario d'avalanche 87, 131
scissomètre 73, 136
secteur chaud 45
sérac 192
série domaniale 167
site 90, 130, 178
sondage 74, 75, 76;
  sondage par battage 288, 294;
  sondage stratigraphique 74, 77, 80
souffle 92, 123
stabilité 98, 99, 100, 110
structure de plaque dure 77
sublimation 35, 52
suraccumulation 54, 224
surcharge 115, 142, 169, 187
suspension 40, 49, 52
tangente à la courbe 192
tas freineur 172
TEL 63, 66, 73, 74, 75, 76, 77, 96, 102, 103, 104, 119
voir teneur en eau liquide.
température 35, 37, 51, 59, 73, 118, 120, 233
teneur en eau liquide 63, 73, 102
voir TEL.
tension 62
test de la pelle 81, 141, 146
théorie du risque accepté 301
toit-buse 174
tourisme 21, 22, 23, 29, 33, 34, 167, 168, 179
tourne 172
traîne 46
traumatisme 157, 265
trousse de secours 275
tunnel 89, 118, 172, 188
végétalisation 172;
  végétation 100
vent 39, 51, 52, 103, 171, 233;
  vent synoptique 39
versant au vent 48, 54, 233, 237, 240;
  versant sous le vent 233, 235, 237, 240
viabilité 169, 181
vire-vent 174
zastrugis 82, 85
zonage 177
zone 90;
  zone d'accumulation 90;
  zone de dépôt 91;
  zone super fragile 132;
  zone de transit 90

Achevé d'imprimer en novembre 1998
Dépôt légal 4e trimestre 1998
Imprimé en CEE.

Christophe ANCEY, *ingénieur* (Cemagref)
Robert BOLOGNESI, *responsable R&D* (GESTER)
Claude CHARLIER, *ingénieur* (Expert indépendant)
Alain DUCLOS, *guide* (Transmontagne)
Françoise et Charles GARDELLE, *historiens*
Jean-Pierre HERRY, *médecin* (ENSA)
Olivier MARCO, *ingénieur* (RTM)
Éric MARTIN, *chef de centre* (Météo-France)
Edmond PAHAUT, *ingénieur* (Météo-France)
François RAPIN, *ingénieur* (Cemagref)
Claude REY, *guide*
Pierre SARRAZ-BOURNET, *juriste*
Claude SERGENT, *ingénieur* (Météo-France)
François SIVARDIÈRE, *ingénieur* (ANENA)
Jacques VILLECROSE, *ingénieur* (Météo-France)
Jean-Paul ZUANON, *chercheur* (CAF)

Préfaces
André Roch *et* Louis de Crécy

Ouvrage collectif sous le patronage de l'ANENA

Association Nationale d'Etudes de la Neige et des Avalanches

Avec l'agrément du Syndicat des guides

METEO FRANCE

ISBN 2-85744-797-3

