



Unité de recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches



Centre d'Etudes de la Neige
Centre Départemental de Météorologie de Chamonix

Rapport d'expertise

à la demande de la Préfecture de Haute-Savoie

Avalanche de Montroc du 9 février 1999
Commune de Chamonix-Mont-Blanc (Haute-Savoie)

Juin 1999

Sommaire

SOMMAIRE	3
OBJET DE L'EXPERTISE	5
PLAN DE SITUATION	6
CHAPITRE 1 : DONNEES HISTORIQUES SUR LES AVALANCHES DANS LE COULOIR DE PECLEREY ET LA VALLEE DE CHAMONIX.	7
1.1 Analyse historique du site avalancheux de Péclerey	7
1.1.1 Méthodologie de l'enquête	7
1.1.2 Paysage et toponymie	8
1.1.3 Les avalanches majeures passées sur le couloir de Péclerey	9
1.1.4 Le sentiment de menace chez les riverains	10
1.2 Le couloir de Péclerey par rapport aux autres sites de la vallée	11
1.2.1 Concomitance avec les crues avalancheuses de la vallée de Chamonix	11
1.2.2 La crue du 9 au 11 février 1999 sur la vallée de Chamonix	12
1.2.3 Importance des dégâts en comparaison d'autres gros phénomènes	13
1.3 Synthèse	13
CHAPITRE 2 : CARTE DE LOCALISATION PROBABLE DES AVALANCHES. PRINCIPES GENERAUX ET CONDITIONS DE REALISATION DE L'EMPRISE DE L'AVALANCHE N° 1.	14
2.1 Principes de réalisation de la carte de localisation probable des avalanches	14
2.1.1 Les bases réglementaires	14
2.1.2 Principe général de réalisation	14
2.1.3 Représentation cartographique	15
2.1.4 Caractéristiques et propriétés	16
2.1.5 Financement - Diffusion	18
2.2 Les conditions de réalisation des cartes d'avalanches à Chamonix	18
2.2.1 Aperçu historique de ces cartes	18
2.2.2 La feuille « Chamonix » de la CLPA (1991) : remarques générales	20
2.2.3 Les avalanches n° 1 et 11 de Montroc	20
CHAPITRE 3 : CONDITIONS NIVO-METEOROLOGIQUES EN FEVRIER 1999	24
3.1 Faits marquants de l'hiver 98-99 sur la Haute-Savoie	24
3.2 Données disponibles pour l'étude de l'épisode du 5 au 9 février	24
3.3 Le manteau neigeux initial	25
3.3.1 Observations des postes du massif du Mont-Blanc	25
3.3.2 Modélisation du manteau neigeux	26

3.4 Les conditions météorologiques du 5 au 9 février (en Haute-Savoie)	26
3.5 Conditions météorologiques à l'échelle des Alpes du Nord	29
3.6 Analyse du caractère exceptionnel des chutes de neige	30
3.7 Examen des conditions de déclenchement	33
3.7.1 Analyse de la stabilité	33
3.7.2 Cause du déclenchement	33
3.7.3 Qualité de la neige sur le trajet	34
CHAPITRE 4 : ANALYSE EXPERTE. RECONSTITUTION DE L'AVALANCHE DU 9 FEVRIER 1999.	35
4.1 Méthodologie de l'analyse experte	35
4.1.1 Principe général	35
4.1.2 Modèles : principes et apports	36
4.2 Reconstitution de l'événement à partir de toutes les données	39
4.2.1 Le site : découpage en zones	39
4.2.2 Phase de départ	41
4.2.3 Phase d'écoulement sur la montagne de Péclerey	42
4.2.4 Phase d'écoulement sur le couloir du Grand Lanchis	42
4.2.5 Phase d'arrêt	43
4.2.6 Synthèse sur la reconstitution de l'avalanche du 9 février 1999	46
CHAPITRE 5 : CONCLUSIONS	48
5.1 Conditions de réalisation de la CLPA	48
5.2 L'avalanche du 9 février 1999 à Montroc	49
5.2.1 Les conditions de déclenchement	49
5.2.2 Descriptif de l'avalanche	49
5.3 Le retour d'expérience	50
REMERCIEMENTS	52

Objet de l'expertise

Une avalanche s'est produite le mardi 9 février 1999 vers 14 h 40, dans le hameau de Montroc, situé dans la partie haute de la commune de Chamonix-Mont-Blanc, vers le lieu-dit «les Poses», de part et d'autre de la route du Tour. L'avalanche est venue du cirque sous le Bec de Lachat dominant la montagne de Péclerey, a franchi l'Arve, a remonté le versant opposé. Douze personnes sont mortes. Une trentaine ont été épargnées ou ont été dégagées vivantes. Vingt chalets ont été touchés par l'avalanche.

A la demande du préfet de Haute-Savoie (lettre datée du 13 février 1999), un rapport d'expertise a été commandé à l'unité de recherche *Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches* du Cemagref pour apporter des précisions sur l'avalanche catastrophique de Montroc du 9 février 1999. Ce rapport porte sur les deux points suivants explicitement demandés par le Préfet :

- les conditions de réalisation de la carte de localisation probable des avalanches et la détermination de l'emprise de l'avalanche n° 1 ;
- les conditions de déclenchement et le descriptif du phénomène ayant causé la catastrophe.

A cette fin, l'unité s'est associée avec le *Centre d'Etudes de la Neige*, unité de recherches de Météo-France et le *Centre Départemental de Météorologie* à Chamonix pour cerner au mieux les conditions nivo-météorologiques au moment de l'accident.

Afin de répondre aux deux points ci-dessus, nous avons organisé notre travail autour de quatre volets. Dans le premier chapitre de ce rapport, nous faisons le point sur toutes les données historiques concernant l'activité avalancheuse du couloir de Péclerey. Certaines de ces données ont déjà été exploitées par le passé, notamment pour la réalisation de la *carte de localisation probable des avalanches* (CLPA) ; d'autres ont été retrouvées à l'occasion du présent travail. Nous avons également cherché à qualifier l'activité avalancheuse sur le couloir de Péclerey d'une part en essayant de dégager un ordre de grandeur de la fréquence des phénomènes connus, d'autre part en la comparant avec l'activité avalancheuse sur le reste de la vallée.

Le second chapitre a pour objet l'intégration des emprises connues d'avalanche dans la CLPA. Nous commençons d'abord par indiquer les grands principes qui président à la réalisation de la CLPA, ses objectifs et ses caractéristiques. Puis, nous retraçons un rapide historique des cartes d'avalanches sur la vallée de Chamonix pour situer la CLPA par rapport à d'autres documents. Enfin, nous expliquons sur quelle base d'informations le report des emprises d'avalanche a été fait dans le cas particulier du couloir de Péclerey.

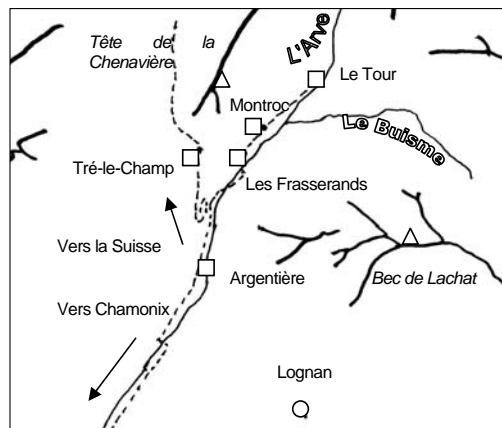
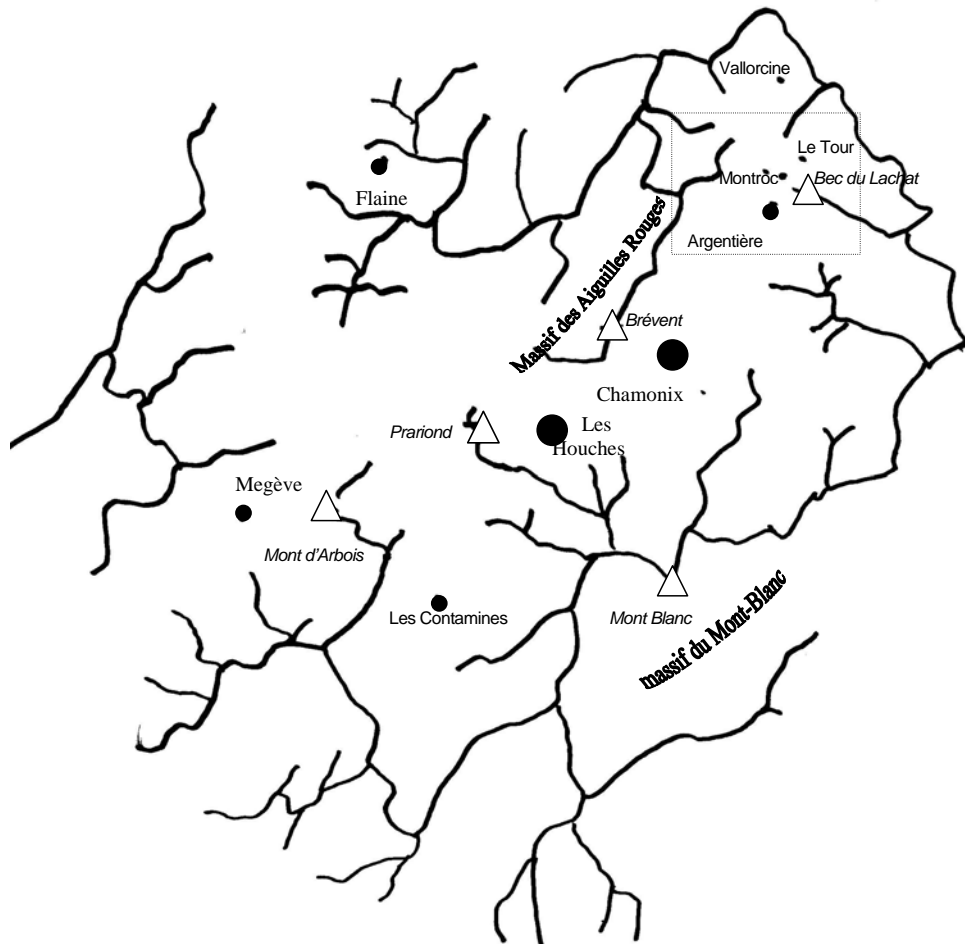
Le troisième chapitre examine les conditions nivo-météorologiques depuis le début de l'hiver jusqu'au 9 février 1999 et plus particulièrement depuis le début du mois de février 1999. L'accent est mis sur l'estimation d'une période de retour des précipitations de neige (en termes de cumul) par comparaison directe avec des épisodes connus et par utilisation de méthodes statistiques.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous proposons une reconstitution des différentes phases de l'avalanche du 9 février sur Montroc. A cet effet, nous avons utilisé une gamme variée de données, qu'il a fallu hiérarchiser, recouper, puis synthétiser : résultats de modèles numériques, observations de terrain, analyse experte, témoignage.

Enfin, en conclusion, nous présentons une synthèse de notre expertise en répondant plus particulièrement aux deux points cités ci-dessus. Nous donnons notre avis sur l'avalanche catastrophique de Montroc et indiquons dans les grandes lignes le retour d'expériences que l'on peut en attendre.

Plan de situation

(Echelle au 1 : 250 000)



Chapitre 1 : Données historiques sur les avalanches dans le couloir de Péclerey et la vallée de Chamonix.

1.1 Analyse historique du site avalancheux de Péclerey

1.1.1 Méthodologie de l'enquête

L'avalanche du 9 février 1999 à Montroc a principalement concerné le couloir de Péclerey, référencé comme étant le couloir n° 1 sur la carte de localisation probable des avalanches (CLPA), jointe en annexe. Ce paragraphe synthétise les témoignages et données historiques recueillis sur l'activité avalancheuse de ce couloir. A cet effet, ont été consultés le fichier de l'Enquête Permanente des Avalanches (EPA) du Cemagref, l'association des Amis du Vieux Chamonix, le fond Payot au Conservatoire d'Art et d'Histoire d'Annecy, le service des archives départementales de la Haute-Savoie, la mairie de Chamonix-Mont-Blanc. Plusieurs personnes ont été contactées, principalement : Jean-Marc Bonino (chef du service *Aménagement et Montagne* à la mairie de Chamonix), René Simond et Maurice Gay (de l'association des Amis du Vieux Chamonix), André Ducroz (retraité), André Arpin (retraité), Charles Gardelle (historien).

Il est assez difficile d'aboutir à une reconstitution historique sûre de l'activité avalancheuse du couloir de Péclerey. En effet, il faut noter que :

- les données historiques concernant ce couloir sont peu nombreuses. Avant la dernière guerre, le seul enjeu menacé par les avalanches est constitué des voies de communication entre le Tour et Montroc (une à deux routes selon l'époque, un pont). Aux Poses, tous les chalets concernés par l'avalanche du 9 février 1999 datent de l'après-guerre ;
- pour la plupart des avalanches, il nous a été impossible de recouper les informations. Ainsi, il n'existe en général qu'une seule source d'information par événement enregistré. Dans certains cas, certaines informations sont contradictoires. C'est le cas par exemple de l'avalanche de 1945 indiquée par Armand Charlet et contestée par ailleurs ;
- dans tous les cas, il ne nous a pas été possible d'avoir un relevé topographique de l'emprise de l'avalanche et/ ou d'autres éléments (dégâts) ;
- normalement, le couloir fait l'objet d'un suivi régulier dans le cadre de l'EPA depuis le début du siècle. Cependant, pour des raisons diverses (notamment lors des deux guerres mondiales), ce suivi peut être lacunaire. De plus, selon l'agent forestier ayant effectué les relevés et selon le fond topographique à sa disposition, les informations concernant les altitudes (départ et arrivée) peuvent être plus ou moins inexactes ou ne pas correspondre aux données actuelles ;
- du point de vue topographique, il est important de noter que le couloir est caractérisé par un net radoucissement de la pente entre 1800 et 2000 m d'altitude environ (alpage de Péclerey). Cela a des conséquences importantes sur la dynamique des avalanches : certaines avalanches, dites mineures, n'affectent qu'une partie du site (la partie basse ou haute) tandis que les avalanches majeures le parcourent entièrement. Parmi les avalanches mineures recensées figurent uniquement les avalanches de la partie basse. Quoique les avalanches mineures soient bien plus fréquentes que les avalanches majeures nous focaliserons ici notre attention sur ces dernières car elles seules sont présumées présenter un risque notable pour le secteur situé de part et d'autre de la route du Tour (lieu-dit les Poses).

Nous ne traiterons ici que des données brutes. L'évolution de la représentation cartographique qui les synthétise fait l'objet d'une partie spécifique dans le chapitre 2. Les documents (photographies, témoignages écrits, cartes) auxquels nous nous référons sont donnés dans les annexes. Nous insistons sur le fait que notre analyse n'est pas une enquête historique au sens strict, mais une exploitation des données que nous avons pu trouver dans le délai imparti à l'expertise. Il est certain qu'un examen plus fouillé, réalisé par des historiens serait à même de compléter notre première analyse.

1.1.2 Paysage et toponymie

L'activité avalancheuse passée est souvent reflétée dans le paysage et parfois la toponymie du site. Dans le cas présent, les photographies aériennes prises l'été (1998) montrent clairement dans la forêt la trace des couloirs d'avalanche de la montagne de Péclerey : la végétation haute (mélèzes) a en effet laissé la place à une population arbustive (aulnes). Cela indique que des avalanches ont influencé l'évolution de la forêt de manière significative durant les cinquante dernières années. Pour aboutir à un tel état de la forêt, il a vraisemblablement fallu que des avalanches majeures se produisent (au moins une en cinquante ans) et que des avalanches mineures empêchent la reprise forestière. Toutefois, comme le couloir tracé dans la forêt était en cours de colonisation par les mélèzes, l'activité sous forme d'avalanche majeure a dû être faible depuis plusieurs années (au moins vingt ans). On peut même ajouter que c'est principalement parce qu'il y a de temps à autre des avalanches majeures qui dégagent des couloirs dans ce versant boisé, que des avalanches mineures peuvent se produire dans la partie basse. Hormis ces traces dans la végétation, nous n'avons pas noté de signes particuliers (croix, oratoire, etc.) dans le paysage qui témoignent d'une activité avalancheuse passée et qui auraient été marqués comme tels par les anciens. Cela peut s'expliquer par l'absence d'enjeux (hormis la route) dans ce secteur jusqu'à une période récente.

Nous avons noté qu'aucun usage n'a fixé de manière définitive le nom du couloir que nous avons appelé 'Péclerey' :

- la carte de localisation probable des avalanches (CLPA de 1991) s'y réfère comme l'avalanche du Grand Lanchis, nom qui est également employé par Isidore Mugnier dans sa chronique mais sous une graphie un peu différente (Grand Lanché) ;
- les forestiers et l'EPA parlent de l'avalanche du pont du Tour ou de Péclerey ;
- la commission municipale de 1973 sur le recensement des avalanches de la vallée mentionne le nom d'avalanches des Plagnards.

La désignation actuelle d'avalanche de Péclerey peut prêter à confusion car la montagne de Péclerey, qui est en fait un vaste versant, possède huit "couloirs" d'avalanches référencées 1, 2, 7, 17,18, 24, 25, et 26 sur la CLPA. La question de savoir si les anciens montagnards distinguaient ou non les couloirs d'avalanches de Péclerey et leur attribuaient un nom respectif reste ouverte.

On peut se demander si la désignation la plus ancienne connue, celle du Grands Lanchis, ne témoigne pas d'un endroit avalancheux. Il est vrai que les racines en '*lanch*' ou '*lavan*' (les Lanchers, le Lavancher) indiquent souvent des lieux exposés aux avalanches, mais les Lanches, toponyme très courant dans les Alpes du Nord, renvoient souvent à de grandes pentes sans grande utilité (pastorale, sylvicole) pour les anciens montagnards.

L'étude toponymique des autres lieux aux alentours ne fournit pas d'élément complémentaire d'intérêt significatif. Par exemple, l'origine et la signification du Bec de Lachat (pointe dominant la zone de départ) sont incertaines quoique le toponyme soit très fréquent dans les Alpes (sous des graphies variées : *Cha*, *Tsa*, *Sa*, *Chat*, etc.). D'après les spécialistes, deux sens peuvent coexister : celui de «hauteur dénudée» et celui de «pâturage plus ou moins haut». Aucun de ces sens ne fait

de Lachat un lieu avalancheux prononcé et il semble qu'il faille plutôt retenir le sens d'alpage. Un alpage laitier organisé autour d'une étable s'étendait sur la vaste pente située entre 1800 et 2100 m. Les anciens avaient pris soin de construire l'abri sur un éperon rocheux (tête du Grand Chantet) et donc assez loin du couloir de Péclerey. Il a été détruit à une date inconnue par un éboulement, puis abandonné. Plus au nord, la seconde pointe dominant la zone de départ est le Bec de la Cluy. Son étymologie est douteuse. Elle pourrait venir de *cui*, qui signifie souffle de l'avalanche (aérosol) en patois. En bref, quelques toponymes autour du couloir de Péclerey pourraient avoir un rapport avec les avalanches. Il apparaît toutefois plus vraisemblable qu'ils témoigneraient plutôt d'une activité pastorale.

1.1.3 Les avalanches majeures passées sur le couloir de Péclerey

Sur la base des archives consultées, cinq avalanches majeures ont été recensées :

- en 1843 : Isidore Mugnier a rapporté dans son journal que le 15 janvier «l'avalanche du Grand Lanché est allée jusqu'aux Vargnoz emportant dans sa course le pont neuf et les mélèzes des Grangettes». Le pont neuf correspond au pont de l'ancienne route du Tour, au niveau de la confluence de l'Arve et du Buisme ;
- en 1908 : le garde forestier a noté dans son carnet qu'une avalanche était descendue dans la soirée du 25 février, probablement coulante, avait emporté le pont neuf, barré l'Arve et coupé le chemin du Tour. Il a reporté les dimensions du dépôt : longueur 90 m, largeur 50 m, et épaisseur 9 m. Elle était remontée jusque vers la cote 1415 m (au-dessus de l'actuelle route du Tour si son relevé est exact) ;
- en 1928 : le garde forestier a observé un très important dépôt d'avalanche sous forme de langue : longueur 250 m, largeur 60 m, épaisseur 8 m. Le dépôt s'étendait sur l'adret jusqu'à environ 1440 m, donc en rive droite (ce qui le situerait bien au-dessus de l'actuelle route du Tour). L'avalanche a eu lieu dans la nuit du 14 au 15 janvier. Le garde a mentionné comme altitude de la zone de départ la cote 1900 m, ce qui n'est pas en accord avec la topographie actuelle compte tenu de la faiblesse de la pente (moins de 20 °) ;
- en 1931 : le garde forestier a noté dans son carnet qu'une avalanche était descendue dans la soirée du 18 mars. Elle serait remontée légèrement sur l'adret jusque vers 1400 m (au-niveau de l'actuelle route) sans occasionner de dégâts. Le dépôt était important : longueur 200 m, largeur 100 m, épaisseur 8 m.
- en 1945 : le guide Armand Charlet a laissé une note écrite (datée de 1973) mentionnant qu'une avalanche s'était produite le 12 février et avait remonté l'adret au moins jusqu'à la route. Cette note précise que les avalanches venant des deux versants se sont rejointes au niveau de la route. Elle a été reprise dans les comptes rendus des commissions municipales sur les avalanches (instaurées dans le cadre de l'arrêté préfectoral du 28 janvier 1963).

Le tableau 1 reprend les caractéristiques brutes des avalanches majeures recensées dans les archives.

Date	cote maximale (m)	Volume (m ³)
15/01/1843	1450	?
25/02/1908	1415	40 000
15/02/1928	1440	120 000
18/03/1931	1400	160 000
12/02/1945	1400	?
09/02/1999	1405	130 000

• Tableau 1 : récapitulatif des avalanches majeures du couloir de Péclerey. Les cotes indiquées sont les cotes maximales atteintes par les avalanches en rive droite de l'Arve d'après les observations faites par les différents témoins. Selon le fond topographique utilisé par l'observateur, les cotes mentionnées peuvent souffrir d'un décalage de quelques mètres par rapport à la cote réelle actuelle. A titre de référence, le lit de l'Arve se situe environ à 1390 m. La route actuelle reliant Montrroc au Tour est à la cote 1410 m sur l'adret.

Aux données archivées et clairement identifiées comme relatives au couloir de Péclerey, s'ajoutent des témoignages provenant de sources diverses, pour lesquels nous ne sommes pas certains que l'événement mentionné corresponde bien au couloir de Péclerey ou bien pour lesquels nous ne disposons que de témoignages oraux. La proximité de plusieurs couloirs d'avalanches parallèles à celui-ci a pu prêter à confusion. Nous avons retenu :

- en 1634 : Louis Chône, chanoine de Sallanches, a rapporté que le 20 janvier des avalanches descendues de la montagne de Péclerey et/ ou de la crête des Frettes ont emporté au niveau du Gros Perrier une caravane venue des Frasserands pour porter secours aux gens du Tour victimes d'une première avalanche ;
- en 1812 : Isodore Mugnier a relaté qu'à la suite de grosses chutes de neige, tous les couloirs d'avalanches d'Argentière au Tour s'étaient purgés ;
- en 1923 : l'abbé Gex dans un article de revue sur la crue avalancheuse de 1923 a mentionné une avalanche le 3 mars. Son volume était de 168 000 m³. Elle causa quelques dégâts (ligne télégraphique arrachée, arbres arrachées, etc.) et coupa la route sur 200 mètres de largeur ;
- en 1970 : Philippe Bassiney, riverain, a déclaré se souvenir qu'en février, une avalanche serait descendue dans le couloir de Péclerey et aurait touché les chalets les plus proches de l'Arve (n° 12 et 13). Il occupait alors l'un de ces chalets.

1.1.4 Le sentiment de menace chez les riverains

Au cours de l'enquête, plusieurs personnes ont déclaré connaître le risque d'avalanche existant aux Poses et avoir mis en garde les autorités ou les habitants de la menace encourue. Il est toujours très difficile d'apprécier, juste après une catastrophe, la véracité de telles craintes, qui s'alimentaient principalement de rumeurs ou de souvenirs très vagues. Il nous a été ainsi rapporté que l'alpage de Péclerey avait été abandonné après la destruction du chalet par une avalanche, alors que c'est un éboulement qui serait à l'origine de sa ruine (sans doute au XV^e s). Cependant, nous avons recueilli des éléments matériels précis qui illustrent la méfiance des montagnards. Ainsi, après chaque grosse chute de neige, Mr Arpin, ancien gérant de l'hôtel des Becs Rouges, affichait un panneau de mise en garde à l'attention de ses clients pour les prévenir du risque d'avalanche sur la route du Tour au niveau des Poses. On rapporte aussi qu'au début du siècle (jusqu'au déneigement de la route), l'itinéraire emprunté par les habitants du Tour pour se rendre à Montrroc évitait soigneusement le secteur des Poses sous la menace de l'avalanche de Péclerey : jusqu'au niveau du Gros Perrier, les montagnards, redoutant tout autant les avalanches du versant de Péclerey que celles du versant des Posettes, suivaient le fond de vallée jusqu'à la confluence du Buisme et de l'Arve, puis remontaient sur l'adret pour rejoindre Montrroc.

1.2 Le couloir de Péclerey par rapport aux autres sites de la vallée

1.2.1 Concomitance avec les crues avalancheuses de la vallée de Chamonix

Nous avons cherché à savoir si les avalanches majeures du couloir de Péclerey étaient concomitantes d'autres avalanches dans la vallée de Chamonix, autrement dit si le couloir participe généralement aux crues avalancheuses dans la vallée ou bien s'il a un fonctionnement indépendant. Nous reportons dans le tableau 2 le nombre d'avalanches survenues dans la vallée le même jour qu'une avalanche majeure partie dans le couloir de Péclerey. On note que sur les quatre principales avalanches majeures du couloir de Péclerey antérieures à celle de 1999, deux sont typiquement intervenues durant des crues avalancheuses importantes qui ont affecté toute la vallée. L'avalanche de 1931 est survenue une semaine après la crue (voir annexes), celle de 1908 fait partie d'une crue de faible ampleur.

Avalanches du couloir de Péclerey	Nombre d'avalanches dans les autres couloirs de la vallée de Chamonix par commune			Nombre total d'avalanches
	<i>Vallorcine</i>	<i>Les Houches</i>	<i>Chamonix-Mont-Blanc</i>	
25/02/08	3	0	7	10
15/02/28	10	8	22	40
18/03/31	1	0	0	1
12/02/45	3	1	19	23
9/02/99	7	1	10	18

• Tableau 2 : nombre d'avalanches survenues dans la vallée de Chamonix les jours où une avalanche majeure est partie dans le couloir de Péclerey. Sont indiquées en gras les crues concernant plus de 20 couloirs. Au total, les trois communes possèdent actuellement 126 couloirs (attention : ce nombre a augmenté au cours de ce siècle) inventoriés dans le fichier de l'EPA. En tout ce sont 2347 événements qui ont été enregistrés depuis le début du siècle jusqu'au 19 février 1999. L'événement de 1931 est décalé d'une semaine par rapport au gros de la crue.

Inversement, nous avons recensé dans l'EPA toutes les crues avalancheuses (définies par l'occurrence d'avalanches dans plusieurs couloirs en l'espace d'une journée ou deux, exceptionnellement plusieurs jours) dans la vallée de Chamonix au cours de ce siècle. Les résultats sont reportés en annexe. On dénombre 39 crues avalancheuses au cours de ce siècle, dont 16 qui ont concerné plus de 20 couloirs. Par ailleurs, on observe que les crues interviennent le plus souvent en février ou en mars (respectivement 14 et 11 crues), plus rarement en janvier (7 crues), en décembre (6 crues), et en avril (1 crue). Parmi les 39 crues recensées sur la vallée, seules cinq ont concerné le couloir de Péclerey.

On en déduit que les avalanches sur le couloir de Péclerey sont généralement concomitantes d'autres avalanches sur la vallée de Chamonix, mais qu'inversement seulement 12 % des crues dans la vallée ont concerné Péclerey. Un calcul sommaire pour estimer la fréquence d'une avalanche sur ce couloir (cf. annexes) donne une période de retour de 20 ans, cohérente avec les données historiques connues.

1.2.2 La crue du 9 au 11 février 1999 sur la vallée de Chamonix

Cette crue a commencé le 9/02/1999. Les avalanches se sont déclenchées successivement : les premières pentes à se purger furent celles orientées au nord-est, les dernières au sud-est. Le tableau ci-dessous (3) récapitule les 18 événements avalancheux naturels par ordre chronologique. Il faut noter que les emprises de la carte de localisation probable des avalanches de 1991 ont été dépassées à huit occasions, soit presque une fois sur deux. Plus que le nombre d'événements, c'est principalement l'extension inhabituelle des avalanches ayant participé à la crue du 9 février 1999 qui rend cet épisode exceptionnel.

Date	Heure de départ	Nom du couloir	N° CLPA Chamonix Edition 91	Remarques	Débordement de l'emprise CLPA
9/02/99	8 h 00	Les Autannes	50	Dégâts poste de vigie + abri pisteur, arrêt 100 m à l'aval du télésiège	oui
9/02/99	8 h 30	Nant des Cheserys	38	Gros dépôt sur voie ferrée, habitations plâtrées, 10 cm de neige sur RN	oui
9/02/99	9 h -15 h	Col des Montets l'Encrenaz	1 Vallorcine	Coupure RN sur 180 m, 10 m de haut	-
9/02/99	9 h 40	Praz Torrent	2 Vallorcine	Coupure RN sur 250 m, obstruction du tunnel de la voie ferrée, coupure de la voie sur 20m, détruit abri de transmission	oui
9/02/99	9 h -15 h	Les Mesures, le tunnel	7 Vallorcine	Arrêt sur RN	-
9/02/99	9 h -15 h	Les Mesures, parking du tunnel	8 Vallorcine	Arrêt sur RN	-
9/02/99	9 h -15 h	Les Mesures, Barantin	9 Vallorcine	Coupure RN et voie ferrée sur 70m	oui
9/02/99	10 h 15	Les Posettes ouest	12 Vallorcine	Voie ferrée obstruée	-
9/02/99	10 h 15, 11 h 30	Glacier du Tour	7-8	Coupure de la route du Tour en amont de Montroc	oui
9/02/99	10 h et 12 h	Les Lanchers	92	Arrêt sur le golf	-
9/02/99	11 h 45	Creux de la Ravine	25 Vallorcine	Trajectoire inhabituelle. Coupure RN et voie ferrée sur 100 m, partie avec la 26 déclenchée artificiellement	oui
9/02/99	12 h 15	La Fis	20	Coupure RN sur 40m de large 2 m de haut, jusqu'à l'Arve	-
9/02/99	13 h 00 14 h	Nant des Montets, la Golette	20	Coupure RN sur 150 m de large 6m de haut, arrêt sur voie ferrée	-
9/02/99	14 h 40	Le Peclerey (Montroc)	1	Destruction de 14 chalets, 12 victimes	oui
9/02/99	17 h 00	La Pendant, la Verte	77	Jusqu'à l'Arve, faible largeur	-
10/02/99	6 h 00	Le Grepon / les Planards	100	Bras médian, jusqu'à jonction pistes bleue/rouge	-
11/02/99	4 h 30	Taconnaz	111 (1 sur les Houches)	Débordements frontal et rive droite du dispositif paravalanche	oui

• Tableau 3 : liste des avalanches de la crue du 9 au 11 février dans la vallée de Chamonix. D'après enquête de terrain et journaux locaux.

1.2.3 Importance des dégâts en comparaison d'autres gros phénomènes

Au cours des trois derniers siècles, la vallée de Chamonix a été touchée à de nombreuses reprises par des avalanches. Nous indiquons ci-après quelques-unes des plus catastrophiques ayant atteint des habitations ou des voies de communication :

- 1634 : le village du Tour dans la vallée de Chamonix (Haute-Savoie) est touché par une avalanche (11 morts) ;
- 1646 : 6 personnes sont ensevelies par une avalanche à Tré-le-Champ (Haute-Savoie, vallée de Chamonix) ;
- 1817 : deux avalanches s'abattent en 3 jours sur les Houches (Haute-Savoie) causant la mort de 7 personnes en tout ;
- 1843 : on compte 8 morts à la Giettaz, 5 morts aux Houches, 2 morts à Vallorcine (Haute-Savoie) ;
- 1847 : on dénombre 7 morts dans la vallée de Chamonix (les Pélerins et la Flégère). Plusieurs hameaux sont touchés (Vers le Nant, les Vorgeats, etc.) ;
- 1914 : crue avalancheuse sur la vallée de Chamonix : les hameaux de Chosalets, des Frasses (3 personnes ensevelies), et de la Rosière atteints, l'hôtel du col des Montets est détruit : Plusieurs bâtiments et hectares de forêt sont détruits ;
- 1922 : une personne tuée par une avalanche au Plagnolet ;
- 1923 : activité avalancheuse très importante sur toutes les Alpes du Nord du Mont-Blanc à l'Oisans avec de très nombreuses voies de communication coupées. Au printemps suivant, l'activité avalancheuse très importante cause également de nombreux dégâts, notamment aux Pélerins (Haute-Savoie) ;
- 1978 : plusieurs avalanches dans la vallée de Chamonix touchent des routes et des habitations (10 morts), dont celle des Posettes au Tour.

Cette liste n'est probablement pas exhaustive. Nous reportons dans les annexes la liste des principales avalanches catastrophiques connues dans les Alpes et Pyrénées françaises. **A notre connaissance, l'avalanche du 9 février 1999 à Montroc a été l'avalanche la plus meurtrière dans la vallée de Chamonix.**

1.3 Synthèse

L'activité avalancheuse du site de Péclerey est difficile à cerner avec certitude. Elle est avérée compte tenu des traces dans la végétation et les quelques archives s'y rapportant. Les phénomènes d'ampleur (avalanches majeures) y semblent peu fréquents surtout depuis une cinquantaine d'années : l'EPA relate des événements de grande ampleur dans la première moitié du siècle puisqu'au moins trois avalanches d'ampleur comparable à l'avalanche du 9 février 1999 s'y seraient produites. Comme cela sera vu au chapitre 2, ces informations n'ont pas pu être complètement reprises dans la CLPA. Ces événements n'ont pas suffisamment marqué la mémoire collective pour qu'elle en garde un souvenir précis. Ils ont en tout cas frappé les esprits des plus anciens, ce qui explique que le sentiment diffus de crainte exprimé par plusieurs riverains soit resté vivace alors même qu'aucune activité avalancheuse majeure n'est à signaler depuis une trentaine d'années. Sur la base des informations recueillies, la fréquence des avalanches majeures est de l'ordre de quelques décennies. Toutefois, la chronique des événements connus est trop peu étendue pour qu'on puisse tenir pour certaine cette valeur. Le fonctionnement du site de Montroc est généralement concomitant des crues de la vallée de Chamonix. La fréquence moyenne des grosses crues avalancheuses est de l'ordre de 7 à 8 ans sur la vallée de Chamonix.

Chapitre 2 : Carte de localisation probable des avalanches. Principes généraux et conditions de réalisation de l'emprise de l'avalanche n° 1.

2.1 Principes de réalisation de la carte de localisation probable des avalanches

2.1.1 Les bases réglementaires

Le rapport de la Commission d'Etude Interministérielle sur la Sécurité des Stations de Montagne, créée à la suite de la catastrophe de Val d'Isère, a recommandé, en juillet 1970, "l'établissement, sous la responsabilité du Ministère de l'Agriculture, d'une carte inventaire des avalanches, officielle, dressée selon une méthode scientifique, ayant un caractère indicatif pour les particuliers mais dont l'observation s'imposera à tous les services publics". Sans attendre, l'étude des premières feuilles fut mise en chantier. Le 21 octobre de la même année, le Gouvernement confiait au Ministère de l'Agriculture l'établissement d'un tel document. Celui-ci précisait par circulaire du 1^{er} février 1971 que ce serait la toute nouvelle division Nivologie du CERAFER (le futur CTGREF, puis Cemagref) qui réaliserait ces cartes, en liaison avec l'Institut Géographique National qui avait proposé la méthode adoptée.

A ce jour plus de 600 000 ha des Alpes et des Pyrénées ont été cartographiés. De nouvelles zones sont ajoutées lorsque des besoins nouveaux se font sentir.

2.1.2 Principe général de réalisation

La réalisation de la CLPA se fait en deux phases distinctes :

- *Etude par photo-interprétation :*

L'étude stéréoscopique de couples de photographies aériennes en noir et blanc prises durant l'été, généralement disponibles à l'échelle du 1:30 000, a pour objet de mettre en évidence certaines traces physiques ou géomorphologiques d'avalanches passées. Les principales traces physiques observées sont les dépôts : éboulis, blocs traînés, moraines nivales, etc. ; les marques dans la végétation : trouées en forêt, selon la ligne de plus grande pente, zones plus clairsemées ou de mélèzin, lignes d'arbres semblant plus jeunes (taille différente de celle des plantes environnantes) ou partiellement arrachés, zones d'arbustes (aulnes, bouleaux plus ou moins buissonnants, sorbiers...), et les traces de destruction : arbres cassés, parfois ruines d'habitations... Ceci permet de caractériser essentiellement le trajet et parfois la zone d'arrêt des avalanches.

La délimitation de la zone d'arrêt relève essentiellement d'une bonne connaissance de la montagne et du comportement des avalanches par la personne chargée de l'étude. Les traces en zone basse, souvent fortement influencée par les activités humaines, disparaissent en effet très vite.

L'étude stéréoscopique permet aussi un examen minutieux de la topographie, ainsi que de divers facteurs favorables au déclenchement des avalanches : pentes fortes (30 à 50°), de dénivelée suffisante, spécialement celles de profil longitudinal convexe, terrain lisse (éboulis fin, dalles, glacier, herbe couchée), présence de sources ou de végétation arbustive (rhododendrons...). Ceci permet de préciser essentiellement les zones de départ.

▪ *Enquête sur le terrain :*

L'étude par photo-interprétation reste toutefois incomplète et sujette à erreurs, tout n'étant pas décelable sur les photographies. Ainsi, on ne pourra pas distinguer, dans certaines circonstances, une zone d'avalanche en forêt avec certains chablis, coupes ou même zones brûlées. C'est pourquoi, le recours à l'expérience des habitants des zones concernées et des professionnels de la montagne (services de Restauration des Terrains en Montagne, de sécurité des pistes, de l'Équipement, etc.) se révèle indispensable. L'enquête menée sur place comporte à la fois la collecte et l'examen critique des renseignements et documents d'archives, et leur confrontation au terrain grâce à un parcours systématique, au moins visuel, de toute la zone à cartographier. Au recensement des avalanches, s'ajoute celui de tous les travaux de protection fixes réalisés dans la zone d'étude. Dès le début de 1991, une première révision des données de l'enquête de terrain a été effectuée. La mise à jour des cartes existant depuis les années 70 sur les Alpes du Nord et les Pyrénées s'est poursuivie jusqu'en 1995. Elle a donné lieu à impression et publication de nouvelles cartes au 1:25 000. Simultanément, à partir de l'automne 1992, une mise à jour informatisée des événements nouveaux survenus au cours de l'hiver précédent est effectuée à la division ETNA, avec le concours des services de Restauration des Terrains en Montagne, détenteurs de la plupart des données disponibles à reporter. Les fichiers correspondants, uniquement consultables sur ordinateur au Cemagref, permettront la réimpression plus rapide des feuilles révisées en 1990-95.

Attention : l'étude par photo-interprétation conduit à la représentation cartographique d'avalanches dont l'existence n'est pas établie avec certitude. Seule l'enquête de terrain permet de se rapprocher de la représentation réelle de toutes les manifestations connues du phénomène.

2.1.3 Représentation cartographique

On distingue plusieurs types de signes figurant les avalanches :

- des zones de couleur à plat (coloris uniforme) dans l'enveloppe maximale des avalanches les mieux délimitées, des flèches lorsque le phénomène est trop étroit pour être représenté exactement à l'échelle ;
- des zones en hachures où tout point peut être concerné par une avalanche qu'on n'aura pas cherché à séparer de ses voisines par une limite précise ;
- enfin, des zones en tirets où les renseignements obtenus sont contradictoires ou trop vagues pour permettre de fixer avec précision les limites du phénomène.

Attention : il n'existe aucune classification hiérarchisée entre ces différentes représentations. En particulier il serait totalement faux de conclure que les flèches ou les zones en hachures sont moins dangereuses que les zones figurant en à plat. Certaines d'entre elles représentent des phénomènes se manifestant sur plusieurs centaines de mètres de dénivelée.

Les informations provenant de la photo-interprétation sont portées en orange ; celles provenant de l'enquête de terrain, en magenta. Les travaux de protection figurent en surcharges noires, ainsi que les numéros attribués aux avalanches de l'enquête figurées en « à plat ». Une page de couverture avec un cartouche de localisation et la date de parution, une notice d'avertissement et la légende complètent le document.

Depuis 1989, les informations thématiques (les deux modes de représentation des avalanches et les travaux) des feuilles rénovées sont numérisées et dotées d'attributs descriptifs. Les données sont introduites dans une base de données géoréférencées de type SIG (système d'information géographique) à l'aide de la table à numériser, à partir de calques, ou directement à l'écran en se basant sur le fond topographique scannérisé et géoréférencé affiché à l'arrière-plan. Des tables attributaires contiennent les données concernant la localisation des éléments reportés (commune, département, année de mise à jour, codes nécessaires à l'impression). Elles peuvent être consultées sur écran à la Division ETNA du Cemagref à l'aide du logiciel ARC/INFO.

2.1.4 Caractéristiques et propriétés

2.1.4.1 Des constatations

La carte est établie ou mise à jour à une date donnée. Tous les renseignements connus à cette date et considérés comme sûrs, toutes les observations réalisées jusqu'alors sont retenus. Le cartographe n'effectue aucune étude prospective destinée à cerner des secteurs de risque ou des zones susceptibles d'être un jour recouvertes ou atteintes par une avalanche. Il rapporte fidèlement les informations rassemblées auprès des témoins ou connaisseurs jugés les plus dignes de confiance (dans le cas des domaines skiables, par exemple, les membres des services de sécurité des pistes font toujours partie de nos informateurs). Il exprime uniquement ce que ceux-ci ont bien voulu communiquer aux enquêteurs.

La carte fait donc simplement état des faits connus et rapportés au jour ou elle est dressée ou révisée et n'a absolument pas pour rôle d'exprimer l'opinion des personnes interrogées, a fortiori du cartographe, sur les manifestations futures des mêmes couloirs d'avalanches. N'importe quel événement ne peut être reporté si son emprise n'est pas connue avec suffisamment de précision. Il n'y a donc pas identité entre zones colorées et zones de risque d'une part, ni entre zones blanches et zones sûres, d'autre part.

2.1.4.2 Des différences avec les cartes de risque

La CLPA ne peut être utilisée directement comme une carte d'aléa constitutive d'un plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPR). L'établissement de cette dernière requiert le dessin d'un document différent où fréquence et intensité du phénomène sont prises en compte à travers une analyse fine du terrain menée par un expert. Bien qu'elle ne puisse y être reportée telle quelle, la CLPA reste cependant un élément d'appréciation important dans la réalisation de ces cartes. Elle peut être insérée dans le dossier PPR au titre de "*carte informative des phénomènes naturels*", pour ce qui concerne les seules avalanches, bien entendu. Elle est encore plus éloignée du document cartographique réglementaire du PPR. Celui-ci, établi sur fond cadastral, généralement au 1:5 000 ou au 1/2 000, fixe le niveau du risque sur le territoire étudié, et donc la constructibilité des terrains. Celle-ci ne peut en aucun cas être établie directement sur la base des contours de la CLPA. Une mention portée dans un cartouche sur les CLPA imprimées le rappelle aux utilisateurs.

2.1.4.3 Conséquences pratiques

Une avalanche peut dépasser les limites admises jusqu'à présent, portées en magenta sur la CLPA, ce qui entraînera la modification de ce document. Deux explications sont possibles :

- soit de nouveaux éléments d'information sur les avalanches passées ont été portés à la connaissance des enquêteurs ;
- soit le nouvel événement a été plus important que par le passé. Par exemple, certaines avalanches progressent vers l'aval d'année en année, en se frayant un chemin dans la forêt.

Lorsque des travaux de protection ont été réalisés, le risque est notablement diminué. Il tend parfois à disparaître. La carte reste cependant colorée dans les limites correspondant aux observations antérieures aux travaux, tandis que les protections apparaissent sous forme de surcharges noires. En effet, modifier les limites de l'avalanche en raison de ces travaux reviendrait à porter une appréciation technique sur leur efficacité et sur leur état d'entretien présent et futur. L'attention de l'utilisateur de la carte renseignée de cette manière est attirée sur le fait que le secteur a historiquement supporté une avalanche mais que des travaux ont vraisemblablement atténué le risque.

2.1.4.4 Valeur des renseignements

- *Valeur de la photo-interprétation*

La photo-interprétation permet de relever soit des manifestations évidentes du phénomène étudié, soit d'établir de simples présomptions. Elle permet de retrouver des phénomènes anciens sortis des mémoires et prend toute son importance dans les secteurs peu ou pas connus. En tant que document technique, un de ses grands avantages réside dans son indépendance vis-à-vis de toute considération humaine, économique ou politique. Cet avantage ne peut malheureusement masquer les insuffisances et la subjectivité de l'interprétation des clichés aériens. C'est pourquoi, des études sont en cours à la division ETNA pour automatiser partiellement le processus, ou du moins, fournir une aide à la cartographie, grâce à l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain, sous ARC/INFO.

- *Résultats à attendre de l'enquête sur le terrain*

Cette enquête apporte un complément indispensable et des confirmations dont on ne pourrait se passer. Malheureusement, elle ne permet pas de renseigner correctement la carte dans les zones peu fréquentées. A proximité des lieux habités, les couloirs sont plus nettement individualisés et délimités, leurs manifestations d'activité ayant eu des effets particulièrement précis sur un territoire dans lequel les repères sont nombreux. En revanche, il est parfois beaucoup moins aisé d'y obtenir des informations de la bouche de ceux qui sont le plus directement concernés en raison d'intérêts fonciers et économiques. Cependant, une évolution nette des mentalités face à la mise en évidence du risque d'avalanche a été notée au cours des dernières années : la CLPA est maintenant considérée comme un outil indispensable à la gestion du territoire plutôt que comme une pesante contrainte.

2.1.4.5 Echelle

La CLPA est un document à l'échelle du 1:25 000 (parfois 1:20 000 pour les plus anciennes), qui correspond à celle de la carte de base française. L'échelle de la prise de vue, la précision des limites des traces que la photo-interprétation met en évidence, ainsi que la précision des renseignements conservés dans les mémoires des habitants, ne permettent pas une résolution plus fine. L'incertitude moyenne sur les limites des phénomènes reportés semble être de 20 à 50 mètres.

Compte tenu de cette incertitude, un agrandissement simple de la carte ne peut donc être admis dans le cadre d'élaboration de documents à plus grande échelle sans une étude complémentaire approfondie. Une attitude différente reviendrait à multiplier localement les erreurs, sans aucun gain de précision.

2.1.4.6 Usage

- *Aménagement en montagne*

Les CLPA ont été dressées en vue d'essayer d'apporter une solution aux problèmes d'urbanisme, de sécurité dans l'équipement et l'aménagement de la montagne (routes, remontées mécaniques), posés par les avalanches, et sont de nature à éviter bien des erreurs dans l'implantation d'aménagements, dès le stade de l'avant-projet ; elles ne sont, au contraire, pas adaptées à la demande des skieurs et randonneurs qui ont besoin de connaître les relations entre conditions nivo-météorologiques et déclenchements, éléments qui ne sont pas pris en compte dans le document. Les avalanches faisant partie intégrante de l'environnement montagnard hivernal, tout skieur y est confronté, spécialement dès qu'il s'éloigne des zones de pistes, normalement sécurisées. La CLPA ne pourra en aucun cas lui servir à sélectionner (ou éviter !) un cheminement, tous ceux habituellement fréquentés traversant en général de nombreux couloirs ; c'est la pratique, l'expérience, et l'observation attentive des conditions nivo-météorologiques, qui lui permettront de décider, avec l'aide des informations apportées par les bulletins spécialisés diffusés par Météo-France.

- *Documents administratifs techniques*

Les CLPA constituent avant tout des documents techniques à l'usage des maires et des services administratifs ou techniques des collectivités locales ou de l'Etat. Elles sont donc dressées pour être lues et utilisées par des spécialistes qui doivent savoir comment elles ont été établies, bien connaître la nature des renseignements qu'elles contiennent et apprécier en connaissance de cause leur présentation et l'usage qu'ils peuvent en faire. Outre le rôle important qu'elles jouent dans l'établissement des cartes de risque (PPR), les CLPA sont devenues des documents de travail indispensables à la base de la bonne gestion d'une route ou d'un domaine skiable.

Commentaire [BG1]: NON : ce sont les services des collectivités

- *Valeur et portée administrative*

Les CLPA sont contraignantes pour les administrations, mais ne peuvent être opposées aux tiers, pour qui elles n'ont qu'une valeur indicative (cf. circulaire interministérielle n° 71-409 du 24 août 1971, point III). Toutefois on doit indiquer que les autorités judiciaires ont récemment pu étendre l'obligation¹ de prise en compte des données de la CLPA, attribuant ainsi à ce document des qualités et des objectifs qui ne lui appartiennent pas même si, bien entendu, il peut constituer un élément de nature à aider à la manifestation de la vérité.

2.1.5 Financement - Diffusion

Toutes les cartes de base (1970-78), à part quelques secteurs limités, ont été entièrement financées par le budget de l'État. Les travaux d'établissement et de révision des CLPA de toutes les Alpes françaises et des Pyrénées sont très coûteux. En Rhône-Alpes, la rénovation a commencé dès 1990. Son financement, direct ou indirect, a été assuré conjointement et principalement par : le ministère de l'Agriculture - direction de l'Espace Rural et de la Forêt et les services de Restauration des Terrains en Montagne, la Région, le ministère de l'Environnement, ainsi que par le Cemagref, Groupement de Grenoble - Unité ETNA. Par ailleurs, de nouvelles feuilles sont aujourd'hui en cours de réalisation en région Rhône-Alpes, financées selon le même principe par la Région (20 %) et l'Etat (CPER – 80 %).

Ces documents sont distribués aux services de l'Etat et des collectivités territoriales concernés ainsi qu'aux différents informateurs qui assurent les observations nécessaires à leur mise à jour permanente. Ils sont publics et sont consultables dans les mairies et à l'unité ETNA du Cemagref. Ils peuvent être achetés également à l'unité ETNA.

2.2 Les conditions de réalisation des cartes d'avalanches à Chamonix

2.2.1 Aperçu historique de ces cartes

Plusieurs documents cartographiques ont été réalisés sur la vallée de Chamonix pour représenter les zones d'avalanches (se reporter aux annexes pour les cartes) :

- **1945** : l'histoire de la réalisation des cartes d'avalanches à Chamonix commence sur une initiative locale avec l'établissement de la carte dite de 1945. Celle-ci ressemblait à une carte d'aléa, dans la mesure où le territoire était considéré en trois couleurs : rouge, jaune et blanc (voir extrait en annexe des pièces techniques). Par la suite, des adaptations ont été apportées à ce document, à la suite des travaux de particuliers ainsi que des conclusions de commissions d'études des avalanches mises en place localement dans la vallée ;

¹ des guides ou des moniteurs de ski ont été condamnés pour n'avoir pas tenu compte des renseignements de la CLPA.

- **1971** : à la suite des décisions gouvernementales de 1970 - 71, la réalisation de la Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA) a été lancée, en 1971 pour la partie de la vallée à l'aval des Tines, en 1972 pour la partie en amont. La photo-interprétation a été réalisée par l'Institut Géographique National à Saint-Mandé. L'équipe d'enquête de terrain était constituée de deux enquêteurs de l'IGN et d'un agent du CTGREF (pour 1972). Dans le contexte de l'époque, la mise en chantier de la CLPA, considérée comme un obstacle au développement immobilier (période du « Plan Neige »), a été accueillie avec circonspection par les autorités locales. Le sentiment qu'il nous reste de cette période est que nos interlocuteurs cherchaient principalement à faire cadrer au mieux la nouvelle carte avec le document 1945 rectifié dans les années 60, de façon à ne pas perturber l'économie générale des projets d'équipement basés sur ce dernier document. Aussi, la collecte des renseignements, puis l'adoption des limites devant figurer sur le document imprimé donnèrent lieu à de nombreuses discussions. Une procédure particulière, assimilable à celle d'une enquête publique fut utilisée, bien que non prévue par la circulaire interministérielle n° 71-409 du 24 août 1971, pour présenter le document aux habitants et recueillir leurs avis. Ces avis figurent dans un cahier, pour ce qui concerne la partie basse de la vallée (enquête de 1971). Le nombre anormalement élevé de zones en tirets (c'est-à-dire « pour lesquelles des renseignements contradictoires ont été recueillis » selon la légende) figurant les zones d'arrêt sur ces cartes illustre bien les difficultés qu'ont rencontrées les enquêteurs pour essayer d'afficher de la manière la plus exacte possible les contours des phénomènes observés jusqu'alors (voir en annexe cette CLPA pour le hameau de Montroc) ;
- **1973-76** : cette période a vu la mise en place du premier *Plan de zones exposées aux avalanches* (PZEA), réalisé sur la foi des informations figurant dans la récente CLPA, à la suite de nombreuses visites de terrain où furent évaluées les conséquences possibles de toutes les avalanches figurant dans ce document. Ceci, de manière à distinguer trois zones sur la carte du PZEA de manière schématique : **blanche**, dite alors sans risque, **rouge**, à risque élevé, donc inconstructible et **bleue**, où la construction pourrait avoir lieu moyennant soit l'implantation d'ouvrages de défense collectifs ou rapprochés soit le respect d'un règlement comportant, par exemple, des renforts architecturaux. Le CTGREF fut appelé à intervenir dans l'établissement des zonages, dans le cadre de la commission « risques naturels » du POS, présidée par le DDA, en tant que détenteur de la méthode de cartographie à adopter pour la rédaction de ce type de document. Les zones bleues et rouges du PZEA devaient en effet être intégrées au POS comme des servitudes modifiant la constructibilité des terrains de la vallée. De nombreuses réunions furent nécessaires pour faire adopter ses limites, après discussion hameau par hameau. On imagine bien que les conseillers municipaux, comme les habitants, essayèrent de modérer les conséquences possibles de l'adoption d'un tel document ;
- **1978** : en février, quelques avalanches particulièrement importantes, comme celle ayant causé la mort de plusieurs personnes au Tour, s'étant produites, une nouvelle version du PZEA fut établie, présentant une dizaine de modifications, et adoptée en fin d'année par le conseil municipal. A cette occasion et bien qu'aucun événement remarquable ne s'y soit produit, le CTGREF a fait rajouter une zone bleue, barrant la vallée, en raison des remarques faites par M. Armand Charlet lors de la réalisation du premier PZEA. Ce plan rénové est resté en vigueur jusqu'à la réalisation, dans la deuxième moitié des années 80, du *plan d'exposition aux risques* (PER) ;
- **1987-88** : le PER, réalisé par le Service de Restauration des Terrains en Montagne de la Haute-Savoie, a reconsidéré le problème des avalanches dans la vallée. Cependant, notons que le document de référence est resté la CLPA de 1971 et 1972. Le Cemagref n'a pas participé à cette étape des travaux de cartographie réalisés dans la vallée ;
- **1991** : au moment de l'approbation de ce PER par le Conseil d'Etat, en 1992, un nouveau document était apparu : la version rénovée et mise à jour des deux CLPA de 1971 et 1972. A la suite de l'enquête de mise à jour, terminée en août 1991, la nouvelle CLPA avait été imprimée

en décembre de la même année 1991 à l'IGN, et distribuée aux services destinataires du 21 au 23 janvier 1992 (voir en annexe cette CLPA pour le hameau de Montroc).

A notre connaissance, aucune autre carte mentionnant les avalanches n'a été réalisée sur la vallée depuis cette date. Par ailleurs, la mise à jour informatique de la CLPA, a été assurée normalement sur la base des indications fournies par les agents du Service RTM et à la suite de nos propres observations. Une version intégrant les huit débordements de cet hiver est en préparation. On joint en annexe un avant-projet de cette carte modifiée, en ce qui concerne l'avalanche de Montroc.

2.2.2 La feuille « Chamonix » de la CLPA (1991) : remarques générales

Outre l'indispensable consultation des archives du Service RTM, nous avons procédé aux mises à jour sur la base de :

- la consultation des carnets d'observation, dont une copie avait été retrouvée, qui avaient servi de base à l'Enquête Permanente des Avalanches (EPA) de l'ONF. Un certain nombre d'éléments concernant les parties basses, les plus dignes de confiance à cause des détails rapportés, n'avaient pu être exploités lors de la première édition ;
- une observation hiver après hiver des événements les plus significatifs survenus hors limites de la première CLPA, au cours des vingt années séparant les deux éditions ;
- de nouveaux témoins ou d'autres archives ;
- la consultation des remarques rassemblées lors de l'enquête ayant suivi les premiers travaux du PZEA en 1973 ;
- l'agrandissement de la zone d'étude aux domaines skiables, étudiés partiellement en 71-72.

Ceci nous a conduits à considérablement modifier le document de 1971-72, même si des informations plus précises n'ont pu être recueillies sur tous les couloirs, compte tenu des contraintes de délai et en l'absence de témoins sûrs. La recherche de l'exhaustivité, en matière d'enquête sur les avalanches passées, ne peut s'arrêter à l'édition d'une carte : une recherche permanente de nouveaux indices doit permettre d'approcher celle-ci, au fil des années.

2.2.3 Les avalanches n° 1 et 11 de Montroc

2.2.3.1 Descriptif des feuilles (éditions de 1972 et 1992)

- **Première version** (Vallorcine - Argentière, édition de 1972, 1:20000 ; voir carte en annexe) : avalanche n°1 (Le Grand Lanchis). La zone de départ, établie par photo-interprétation et enquête comme débutant vers la cote 1800 m (ligne de faite du premier versant dominant les Poses), est indiquée avec une largeur de 180 m, avec trois branches. La zone d'arrivée est indiquée :
 - selon la photo-interprétation : comme « avalanche » jusqu'en limite de l'Arve, et en « zone présumée dangereuse » jusqu'au contact de la route du Tour (vers la cote 1410 m) ;
 - selon l'enquête de terrain : comme « avalanche » au-delà de l'Arve presque jusqu'à la route et en « zone présumée dangereuse » jusqu'au contact de la route.

À noter :

- depuis l'altitude 1450 m environ, selon la photo-interprétation, une « avalanche » divergente vers l'ouest (en direction du centre de Montroc) jusqu'à l'Arve ;
- au-dessus de 1800 m et bien connectée à l'« avalanche » au-dessous, une « zone présumée dangereuse » par photo-interprétation (seulement) sur la montagne de Péclerey puis, vers 2050 m, selon la photo-interprétation, une « avalanche » qui vient buter contre un raidissement vers 2400 m ;
- une large « zone présumée dangereuse » par photo-interprétation depuis cette « avalanche » sommitale mais vers le Nord (le hameau du Tour).

À Montroc et provenant du versant opposé (Tête du Chenavier), l'avalanche n°11 s'arrête (selon la photo-interprétation et l'enquête) au pied de pente, à l'aval de la cote 1410 m, et avec une zone doublement présumée dangereuse (selon la photo-interprétation et l'enquête de terrain) jusqu'à la route du Tour.

- **Seconde version** (Chamonix, édition de 1991, 1:25000 ; voir carte en annexe) : avalanche n°1. La photo-interprétation est identique à l'ancienne carte ; les modifications ne portent que sur l'enquête de terrain :
 - emprise de l' «avalanche » sur Montroc (les Poses), légèrement au-delà de la route du Tour et plus vers l'ouest ;
 - au-dessus de 1930 m, une « zone avalancheuse » jusque vers 2430 m, quelques dizaines de mètres plus à l'amont que l'« avalanche » établie par photo-interprétation.

À noter :

- une « avalanche » s'orientant vers le nord-ouest ayant son sommet vers 2200 m dans la combe sous le Bec de la Cuy, mais sans liaison avec la n°1 (avalanche non référencée sur la CLPA) ;
- l'extension de l'emprise, sur Montroc, jusqu'au contact à proximité de la route du Tour, de l'avalanche n°11 avec la n°1. La partie terminale de l'avalanche n° 1 a été légèrement étendue au-delà de la route ; mais il s'est agi, plutôt, de transformer une zone en tirets en une zone de couleur « à plat » et surtout de faire rejoindre l'avalanche n° 11, venue du versant des Posettes, à l'avalanche n° 1 au niveau de la route du Tour.

2.2.3.2 Sources d'information sur Montroc et interprétation dans la CLPA (de 1992)

- **Témoignages**

Pour l'avalanche n° 1, la fiche signalétique d'enquête de l'édition de 1972 note :

- un départ vers 1820 m et une limite aval à 1390 m ;
- un profil concave car il «franchit l'Arve» ;
- un chalet «menacé dans l'emprise maximum» de l'avalanche ;
- l'ancien pont sur l'Arve emporté en 1908 ;
- dans les remarques que le «souffle va jusqu'à la route» ; mais les effets avalancheux à ce niveau sont discutés (un témoignage indiquant que «le front de neige ne dépasse pas la route », un autre «a vu des branchages au bord de la route») ;
- aucun dégât corporel n'est signalé.

Autant que nous puissions nous en souvenir, l'essentiel des modifications apportées entre les deux éditions de 1971 et 1992 sur les couloirs n° 1 et 11 repose sur une déclaration écrite d'Armand Charlet, célèbre guide de Tré-le-Champ, hameau voisin de Montroc qui a écrit : « les avalanches n° 1 et 11 (citées par leur nom) se sont rejointes sur la route² du Tour le 12 février 1945 ». Ce témoignage a été enregistré lors de la réalisation du premier *Plan des zones exposées aux avalanches* (PZEA) ainsi que le 25 avril 1973 dans les comptes rendus des commissions municipales sur les avalanches (instaurées par arrêté préfectoral du 28 janvier 1963).

- **Observations**

La partie haute du versant (sous le Bec de Lachat) a été pourvue de hachures sur la base d'observations directes du terrain durant les années précédant la révision.

² Après vérification, il s'avère qu'à cette époque, la route du Tour passait déjà à son emplacement actuel ; notamment elle figure sur le plan cadastral de 1924 (et levé en 1923).

▪ **Enquête Permanente des Avalanches ; carnet forestier**

Il s'agit dans ce cas des avalanches référencées sous le numéro 31 (nom retenu : couloir du Pont du Tour, puis : de Péclerey). Nous reportons dans le tableau 4 les données du fichier informatisé actuel de l'EPA.

Date	Cote de départ (m)	Cote d'arrêt (m)
25/02/1908	2400	1415
15/02/1928	1900	1440
18/03/1931	2000	1400
?/11/44	1700	1400
16/04/1975	1700	1400
26/01/77	1700	1450
16/02/92	1700	1450
21/11/92	1950	1400
09/02/1999	2400	1415

• Tableau 4 : récapitulatif des avalanches du couloir de Péclerey. Les cotes indiquées sont les cotes maximales atteintes par les avalanches d'après les observations faites par les différents agents forestiers en charge du secteur. Selon le fond topographique utilisé par l'observateur, les cotes mentionnées peuvent souffrir d'un décalage de plusieurs mètres par rapport à la cote actuelle. A titre de référence, le lit de l'Arve se situe environ à 1390 m. La route actuelle reliant Montrroc au Tour est à la cote 1410 m sur l'adret.

Attention : nous indiquons ici les renseignements fournis tels quels par le fichier informatique de l'EPA. Il est important de souligner que ce fichier n'intègre pas tous les éléments notés dans les carnets (notamment la nature des dégâts). En l'état, le fichier de l'EPA ne permet pas de préciser si les avalanches recensées ont franchi ou non l'Arve.

Au chapitre 1, nous avons analysé plus en détail le carnet forestier qui a livré les informations originales, reprises ultérieurement par l'EPA. C'est bien l'analyse des données complémentaires (volume du dépôt et largeur, nature des dégâts) mentionnées dans le carnet forestier qui permet de lever le doute sur le franchissement ou non de l'Arve par les avalanches recensées dans l'EPA : dans le cas des avalanches de 1908, 1928, 1931, il y a eu franchissement de l'Arve par les avalanches. En revanche, pour les événements de 1944, 1975, 1977, 1992, on a affaire à des avalanches mineures n'ayant concerné que la zone basse en rive gauche du site.

Il a été difficile et il reste difficile d'exploiter pleinement toutes les informations du carnet forestier, car :

- elles contiennent des informations visiblement erronées, notamment en ce qui concerne les cotes de départ³ ;
- le doute est permis sur les cotes d'arrivée également, soit que le forestier ait fait sommairement ses observations, soit que le fond topographique sur lequel il s'est appuyé, soit trop éloigné du fond actuel, soit qu'il ait reporté en fait des limites d'aérosol, qui ne sont pas prises en compte dans la CLPA ;
- les informations ne sont pas géoréférencées contrairement au témoignage d'Armand Charlet, qui fait mention explicite d'un point fixe (la route).

Si elles sont difficilement utilisables en tant que telles dans la CLPA, les observations contenues dans le carnet forestier ont confirmé que des avalanches peuvent franchir l'Arve et ont poussé à retenir le témoignage d'Armand Charlet comme pertinent, malgré les nombreuses mises en cause, parfois très virulentes, dont il a été l'objet (notons également que l'événement qu'il relate est absent du fichier de l'EPA, ce qui n'est pas contradictoire, car la France était encore en guerre et le suivi de l'EPA en veille).

³ Certaines cotes de départ nous semblent peu vraisemblables car elles correspondent à des zones relativement peu inclinées pour lesquelles un déclenchement d'avalanche ne semble guère possible ; exemples de cote : 1900, 1950, 2000.

Aussi, lors de la seconde édition de la CLPA, sur la base de toutes ces informations, il a été décidé de faire figurer, en couleur à plat magenta, sur la partie basse du site (sous la montagne de Péclerey) l'emprise mentionnée par A. Charlet pour l'avalanche de février 1945. Sa largeur maximale sur l'adret est de 200 m

3.1 Faits marquants de l'hiver 98-99 sur la Haute-Savoie

Novembre et Décembre 98 :

L'hiver a du mal à s'établir et les quelques perturbations qui atteignent la Haute-Savoie ne donnent que de faibles chutes de neige. La neige tombe le plus souvent jusqu'en plaine ou basses vallées sauf le 12 décembre où la pluie remonte au-dessus de 2000 m d'altitude. L'année 1998 se termine par un épisode de föhn violent sur la vallée de Chamonix.

A la fin de décembre, à altitude et exposition équivalentes, l'enneigement est plutôt meilleur sur le Chablais et les Aravis que sur le Mont-Blanc. On trouve vers 1000 m : 15 cm de neige en versant Nord, rien en versant sud et vers 2000 m : 50 cm à 1 m de neige. Ce faible enneigement de début de saison a favorisé la formation de couches fragiles, de neige de faible cohésion. Hormis dans les versants sud, le manteau neigeux est généralement assez mal stabilisé au-dessus de 2000 m.

Janvier 99 :

Il neige le 2 (20 à 30 cm vers 1500 m), puis c'est le retour du soleil jusqu'au 7. Du 8 au 14, une série de perturbations déferlent sur la France. De fréquentes chutes de neige se produisent, on relève 50 à 70 cm, localement 90 cm, de neige fraîche cumulée. Ces précipitations sont souvent accompagnées de vent fort en montagne, entrecoupées par une journée de foehn violent sur le massif du Mont-Blanc le 10. Du 15 au 25, sous l'influence d'un anticyclone, le temps est calme et ensoleillé.

A partir du 26 et jusqu'au 29, la neige tombe en abondance. Des perturbations circulent dans un rapide flux de Nord-Ouest assez froid, la limite pluie-neige se situe vers 600 m. En 4 jours, il est tombé 10 à 20 cm de neige fraîche en plaine, 80 à 110 cm vers 1000 m, près de 150 cm au Tour et à Lognan.

Février 99 :

Du 30 janvier au 4 février, des hautes pressions s'installent sur le proche atlantique. Cette situation de blocage maintient un violent courant de Nord à Nord-Est sur la Haute-Savoie. Le temps est froid, sans précipitation, mais les vents sont violents et d'importants phénomènes de transport de neige sont observés.

3.2 Données disponibles pour l'étude de l'épisode du 5 au 9 février

Pour le massif du Mont-Blanc, Météo-France dispose de plusieurs sources de données de différentes natures:

- des mesures biquotidiennes, notamment de températures et hauteurs de neige, sont réalisées dans cinq postes du réseau d'observations nivo-météorologiques : Les Contamines (1870 m), Megève (1070 m), Chamonix (1050 m), Lognan (1970 m et des mesures en altitude à 3300 m), Le Tour (1470 m) ;
- des informations sur l'état interne du manteau neigeux sont fournies chaque semaine par des sondages par battage et profils stratigraphiques sur plusieurs sites de la vallée de Chamonix : Lognan (N 2780 m), Plan de l'Aiguille (N 2300 m), Plan Praz (SE 1950 m) ou Brévent (S 2380 m), Prarion (Plat 1850 m), Megève (NO 2000 m) ;
- des stations automatiques (Chamonix (1037 m), Aiguilles Rouges (2330 m), Mont d'Arbois(1827 m)), fournissent des mesures horaires ou tri-horaires de température, vent, hauteur de neige ;

- des modèles d'analyse et de prévision météorologiques ARPEGE et ALADIN. Des modèles spécifiques pour la neige, en particulier un système d'analyse de données météorologiques adapté au relief : SAFRAN et un modèle d'évolution du manteau neigeux : CROCUS. Ces modèles sont systématiquement mis en œuvre par Météo-France lors de la prévision du risque d'avalanches.

3.3 Le manteau neigeux initial

Aucune mesure du manteau neigeux (sondage par battage, profil stratigraphique) n'a pu être réalisée après l'accident dans la zone de départ de l'avalanche. Pour estimer quel était le manteau neigeux initial, nous disposons des mesures régulières faites dans le cadre du réseau nivométéorologique et des résultats de la modélisation de l'évolution du manteau neigeux dans une pente type du massif.

3.3.1 Observations des postes du massif du Mont-Blanc

Avant le début de l'épisode, on dispose de plusieurs sondages et profils (présentés dans les annexes). On observe :

- en versant sud, les mesures du 5 février au Brévent montrent un manteau neigeux bien stabilisé en profondeur (1,20 m de grains ronds denses) et 50 cm de neige grain fin dense qui correspondent aux chutes de janvier. A noter que la dernière chute de fin janvier a été complètement balayée par le vent ;
- en versant nord, deux types de manteau neigeux sont observés le 2 février :
 - à Lognan, où la neige a été le plus souvent accumulée par le vent, le manteau neigeux est épais, stable, constitué de grains fins denses,
 - au Plan de l'Aiguille, les couches profondes du manteau neigeux sont fragiles, constituées de grains à faces planes ou gobelets sur près d'un mètre d'épaisseur. En surface, on retrouve les chutes de neige de janvier sous la forme de 80 cm de neige encore peu consolidée.
- Au Prarion et à Megève, le 2 février, des couches fragiles sont présentes en profondeur. Ces sites étant moins soumis aux effets du vent que les précédents, on retrouve 50 à 70 cm de neige récente peu consolidée dans les couches supérieures du manteau neigeux.

Après l'épisode, des mesures ont été effectuées au Plan de l'Aiguille le 11 février. L'accroissement de l'équivalent en eau du manteau neigeux est de 100 mm environ. L'effet du vent sur ce site a été important car on estime la lame d'eau tombée durant l'épisode à 200 mm environ (la moitié de la chute aurait donc été déplacée sous l'effet du transport). Malgré des températures très froides, la neige récente s'est déjà bien densifiée sous l'effet du poids des chutes de neige, les résistances sont croissantes à partir de la surface sur 1,40 m d'épaisseur. Ce sondage réalisé environ 36 heures après la fin des précipitations représente mal l'état du manteau neigeux tel qu'il devait être au moment du déclenchement de l'avalanche de Montroc, notamment dans le premier mètre sous la surface où la neige devait être nettement plus légère, de plus faible résistance et de plus faible cohésion. Le 16 février, un sondage accompagné d'un profil a été fait au Prarion. Sur ce site, on trouve un accroissement de l'équivalent en eau du manteau neigeux de 200 mm.

3.3.2 Modélisation du manteau neigeux

La structure⁴ à la date 9 février 1999 (à 6 heures du matin) a été établie par les modèles Safran-Crocus-Mepra utilisés pour le suivi et la prévision du risque d'avalanches (cf. annexes). Le système expert Mépra donne le diagnostic suivant : risque de déclenchement spontané d'avalanche (naturelle) très fort, risque de déclenchement accidentel fort, type d'avalanche de neige récente et sèche. La simulation a mis en évidence :

- de 3,10 m à 1,70 m : 1,40 m de neige récente correspondant aux chutes de neige depuis le 5 février et encore en cours. Dans la partie supérieure on trouve 1 m de neige très récente, froide, dont la densité varie entre 80 et 135 kg/m³. Au-dessous, on trouve 40 cm de neige récente un peu plus dense (150 kg/m³), avec une cohésion un peu plus forte ;
- de 1,70 m à 1,60 m : une petite couche de grains à faces planes, de faible cohésion, indiquée comme niveau d'instabilité. Elle correspond aux chutes de fin d'épisode, le 29 janvier. Cette neige est alors restée en surface les jours suivants avec un temps sec et clair qui a permis sa transformation rapide ;
- de 1,60 m au sol : 50 cm de neige qui résulte de l'épisode neigeux du 26 au 29 janvier, tassée, transformée en grains fins d'assez bonne cohésion ; puis 1,10 m de vieille neige du début de saison, transformée en grains à faces planes ou gobelets.

Ce résultat de simulation est une approximation de l'état réel du manteau neigeux dans la zone de départ de l'avalanche (en particulier les phénomènes locaux de transport de neige par le vent ne sont pas pris en compte). Les grandes caractéristiques du profil simulé doivent s'y retrouver, notamment :

- une grande quantité de neige récente froide et de faible cohésion, plus d'1,5 m d'épaisseur en tenant compte des chutes de neige de la matinée du 9 ;
- cette neige a une densité faible, voisine de 110 kg/m³, un peu plus dans la partie inférieure à cause du tassement ainsi que dans la partie supérieure avec le radoucissement dans la matinée ;
- une couche fragile est probablement présente à la base de cette neige récente. En effet, même si des vents violents ont soufflé du 30 au 1^{er}, il est possible que toute la neige récente de l'épisode de fin janvier n'ait pas été arrachée dans cette pente et que la neige de surface ait pu se transformer en grains anguleux (grains à faces planes) après cette période ;
- des couches profondes constituées en grande partie de faces planes ou gobelets.

3.4 Les conditions météorologiques du 5 au 9 février (en Haute-Savoie)

Des précipitations commencent dans l'après-midi du 5, elles vont se poursuivre toute la journée du samedi 6 à basse altitude. Dimanche 7, encore de la neige forte jusqu'en début d'après-midi, faible à modérée ensuite. Durant tout le début de période, l'isotherme -10°C se situe vers 2500 m. Lundi 8, les températures sont en baisse, le ciel reste couvert mais les précipitations se sont arrêtées. Le vent forçit l'après-midi et des chutes intenses de neige très légère reprennent dans la nuit.

Le mardi 9, en matinée, la neige continue à tomber, avec une très forte intensité le matin entre 8 h et 13 h, on relève par exemple 28 cm aux Contamines. Ces précipitations sont accompagnées d'un net radoucissement, même si les températures sont restées négatives en altitude et très faiblement positives en fond de vallée (+0,4°C à Chamonix à 12 h) et d'un renforcement du vent (voir Fig. 1). A Lognan, le vent depuis le début de l'épisode, était de direction sud à sud-ouest en bas, ouest en altitude, il s'oriente mardi à l'ouest en bas, sud-ouest en altitude. Le renforcement du vent et le radoucissement sont aussi notables sur les stations automatiques des Aiguilles Rouges et du Mont

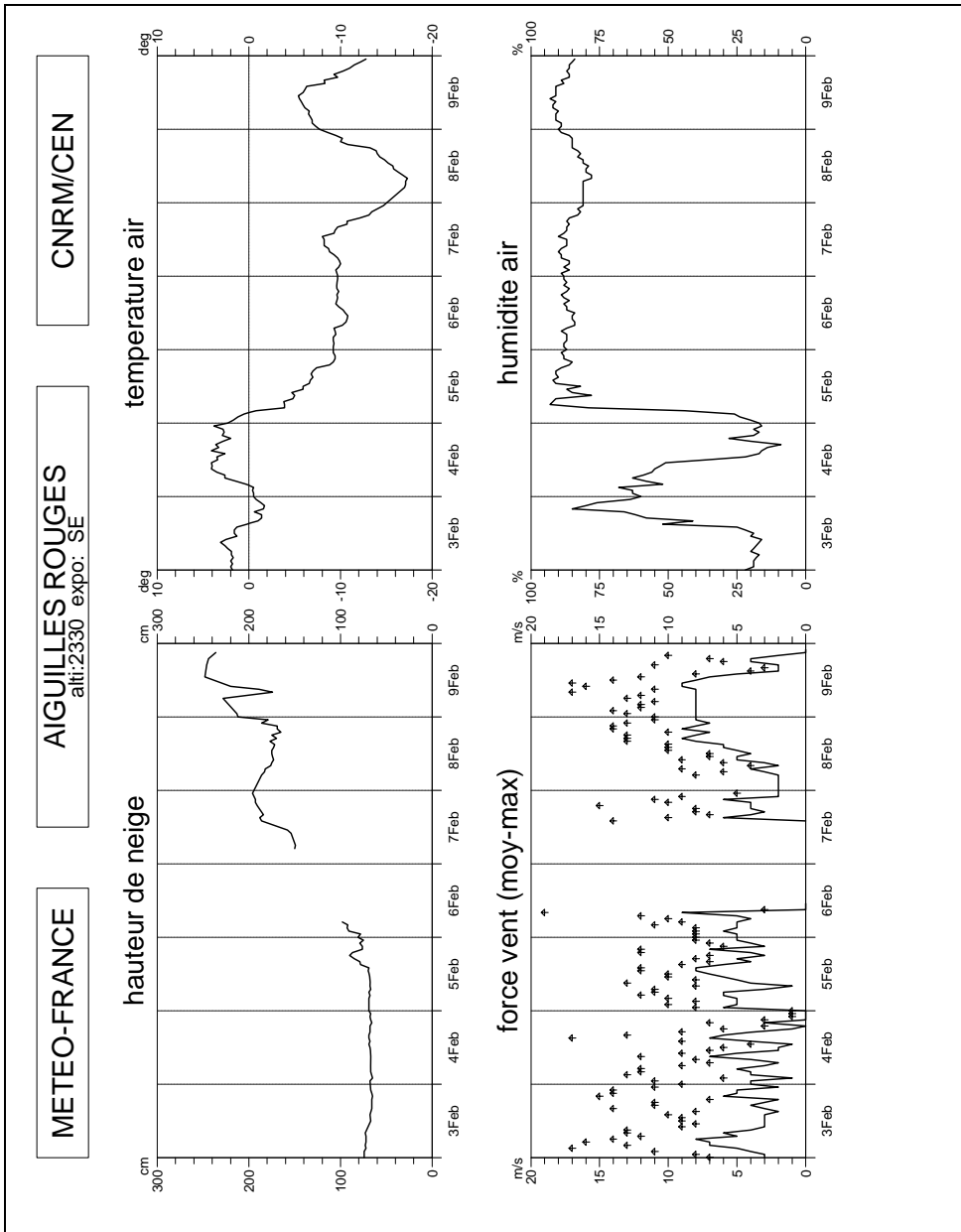
⁴ Le manteau neigeux simulé correspond à un manteau neigeux « typique » du massif du Mont-Blanc, pour une altitude de 2400 m, une exposition nord et une pente 40 degrés, ce qui se rapproche au mieux des caractéristiques de la zone de départ de l'avalanche

d'Arbois. Des phénomènes de transport de neige sont signalés par le poste de Lognan : forte chasse neige de Nord à 8 h et 13 h. On peut les noter aussi sur la station automatique des Aiguilles Rouges : entre 6 h et 8 h, la hauteur de neige baisse de 50 cm puis augmente à nouveau rapidement entre 8 h et 10 h (hausse de 45 cm). Le tableau 5 récapitule les cumuls de neige sur les postes voisins de Montroc. Au Tour, le poste le plus proche de la zone de départ du couloir de Péclerey, les cumuls de neige ont atteint 225 cm en 5 jours.

Poste Cumul	Chamonix 1050 m	Le Tour 1470 m	Lognan 1970 m	Les Contamines 1870 m	Megève 1070 m
du 5 au 6/02	10	36	35	27	20
du 5 au 7/02	30	82	85	77	70
du 5 au 8/02	73	128	125	122	105
du 5 au 9/02	113*	178	181	173	151
du 5 au 10/02	139*	225	221	221	171

• Tableau 5 : cumul des chutes de neige fraîche (en cm) en 24 h depuis le 5/02 à 8 h, jusqu'au jour J à 8 h.

(* : valeurs estimées suite à un relevé absent ou douteux)



• Figure 1 : observations de la station automatique nivôse des Aiguilles Rouges du 3 au 9 février 1999.

3.5 Conditions météorologiques à l'échelle des Alpes du Nord

Afin de mieux situer les conditions qui ont régné pendant l'épisode du 5 au 10 février sur la vallée de Chamonix par rapport au reste des Alpes du Nord, un aperçu rapide de la situation météorologique sur les Alpes est donné ci-dessous.

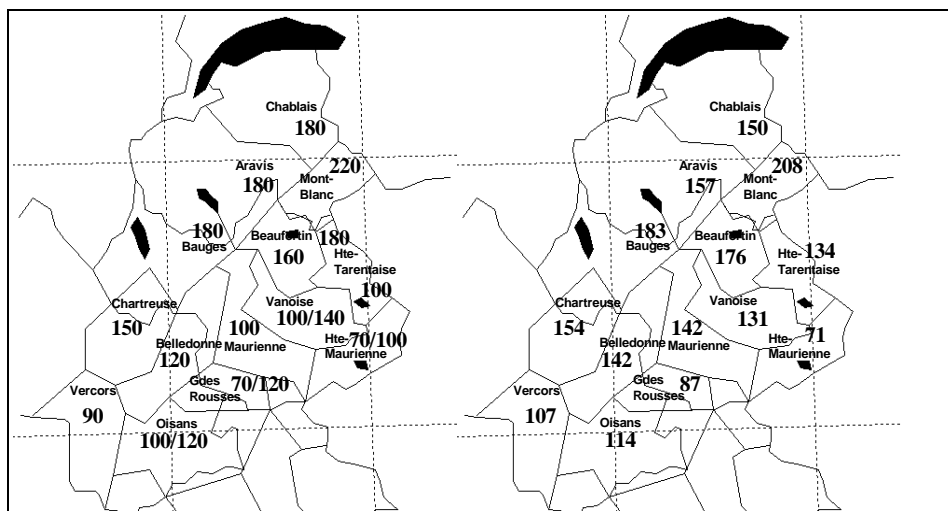
Situation générale :

Dans un rapide courant de nord-ouest, puis ouest mardi en altitude, trois perturbations se succèdent du vendredi 5 au mardi 9 février en soirée. Les températures restent froides et la limite pluie-neige se situe le plus souvent vers 500 mètres d'altitude ou plus basse, elle remonte temporairement dimanche et mardi matin dans les secteurs chauds, vers 1000 à 1200 m sur les Préalpes. Après chaque perturbation, les traînes de nord-ouest sont actives avec un fort effet de soulèvement sur les reliefs qui maintient des précipitations le plus souvent continues en montagne. Une franche accalmie a toutefois lieu dans la journée de lundi.

Données chiffrées :

Pour l'épisode, les cumuls des précipitations entre le 5 février à 8 h et le 10 à 8 h sont présentés ci-dessous. Les cumuls de neige fraîche en 24 h sont relevés dans les postes du réseau d'observation nivo-météorologique. Les lames d'eau cumulées sur la même période sont analysées par le modèle Safran (les lames d'eau observées étant peu fiables dans le cas de très fortes chutes de neige à cause de problèmes de mesure).

Le massif le plus touché par les précipitations est le Mont-Blanc. Les autres massifs de Haute-Savoie, le Nord de la Haute-Tarentaise et les Préalpes des Savoies (Chablais, Aravis, Bauges) ont également connu de très forts cumuls de neige fraîche.



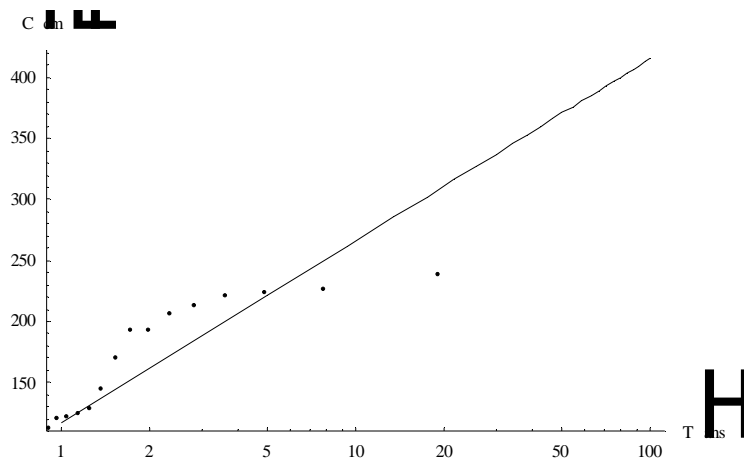
• Figure 2 : cumul de neige fraîche sur 5 jours (cm) à gauche et lames d'eau cumulées sur 5 jours (mm) à droite selon les massifs. Les valeurs de cumul sont issues du réseau d'observation tandis que les lames d'eau sont obtenues par SAFRAN (à 1800 m).

3.6 Analyse du caractère exceptionnel des chutes de neige

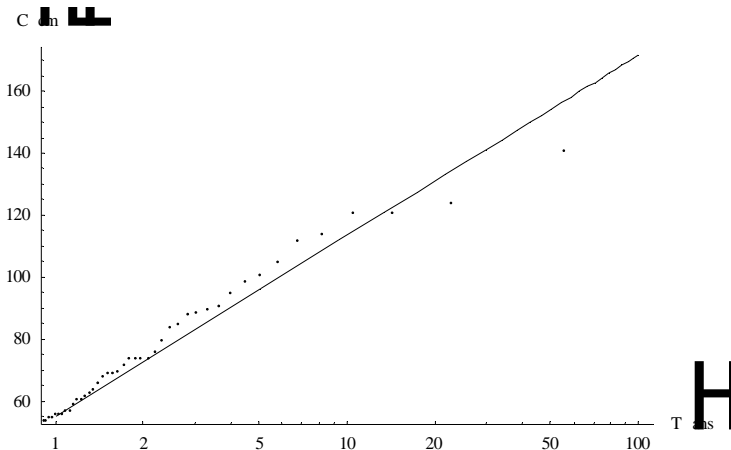
L'avalanche de Montroc du 9 février 1999 est consécutive à de fortes chutes de neige sur les Alpes du Nord. Après une fin de mois de janvier très neigeuse (1,5 m de cumul au Tour) suivie d'une courte période sans précipitations mais très ventée, les précipitations reprennent le 5 février et se poursuivent quasiment sans discontinuité jusqu'au mardi 9. Les chutes de neige sont soutenues, ventées et accompagnées de températures froides. Les températures remontent légèrement le 9 février ; des chutes de pluie sont même enregistrées à Chamonix pendant quelques minutes. Sur les cinq jours qu'a duré l'épisode, la somme des cumuls journaliers de neige a atteint d'après les estimations 2,25 m au Tour, 1,8 m à Vallorcine, 1,4 m à Chamonix. On peut faire remarquer que pour les deux postes les plus proches de la zone de départ du couloir de Péclerey :

- sur le poste du Tour (1470 m), distant de moins de 2 km, fonctionnant depuis 13 ans (1985/86), six épisodes ont entraîné des cumuls de plus de 2 mètres. L'épisode de février 1999 est celui qui a la plus forte intensité moyenne (45 cm/j) et sur 5 jours, mais il n'a ni le plus fort cumul, ni la plus forte intensité journalière ; des situations très critiques ont également été enregistrées comme en février 1988 où il est tombé 4,3 m de neige en deux épisodes ou bien février 1995 où l'intensité journalière maximale a été de 80 cm/j contre 58 cm/j pour février 1999. Compte tenu du faible nombre d'années de mesures, il est délicat d'en tirer une statistique fiable. En appliquant la méthode du renouvellement⁵, nous sommes quand même parvenus à tirer une première estimation de la période de retour de l'épisode météorologique du 6 au 10 février 1999 (en termes de précipitation neigeuse). Nous avons représenté dans la figure 3 la courbe statistique (liant cumuls et périodes de retour) à laquelle nous sommes arrivés. La période de retour des cumuls de neige est trouvée être égale à 5 ans environ. Notons que, même si la loi empirique établie vérifie le test de vraisemblance (χ^2), l'allure générale n'est pas très bonne, principalement à cause du manque de données (La chronique ne comporte pas de données issus des hivers à forts cumuls comme 1984, 1981, 1978, etc.). Cette difficulté est accrue par la tendance au déficit de neige enregistrée cette dernière décennie, qui peut biaiser la tendance ;
- sur le poste de Chamonix (1050 m), distant d'environ 10 km, fonctionnant depuis 39 ans, sept épisodes avec des cumuls de neige supérieurs à 1 m sont connus. L'épisode de février 1999 est le plus fort en cumul (1,4 m) mais non en intensité (28 cm/j contre 40 cm/j en février 1984). En comparaison, les épisodes de février 1978 et janvier 1981 (associés à d'importantes crues avalancheuses) n'ont donné respectivement que 0,94 m et 1,23 m. De même que pour le poste du Tour, nous avons appliqué la méthode du renouvellement pour estimer la période de retour (cf. Fig. 4) : nous trouvons qu'elle vaut environ 35 ans. La différence de 30 ans entre la période de retour estimée au Tour et celle de Chamonix s'explique principalement par la température et l'altitude : pour la plupart des épisodes précédents, légèrement plus chauds, le poste de Chamonix pouvait se trouver à certains moments au-dessous de la limite pluie/ neige tandis que pour l'épisode de février 1999, les températures sont restées systématiquement négatives : les précipitations ont donc tout le temps eu lieu sous forme de neige. Situé plus haut et en fond de vallée, le poste du Tour est moins sensible aux remontées de la limite pluie/ neige. Examinées du point de vue de la lame d'eau (hauteur d'eau équivalente), les précipitations du 6 au 10 février 1999 ne présentent pas de caractère exceptionnel sur Chamonix : on peut ainsi situer leur période de retour autour de 3 à 4 ans (aussi bien pour l'épisode sur son intégralité que pour la journée ayant connu le plus fort cumul) ;
- sur le poste de Flaine (1640 m) fonctionnant depuis 24 ans (1974/75), trois épisodes ont apporté des cumuls de neige plus importants qu'en février 1999 (1,92 m) mais février 1999 figure (avec février 1984) parmi les intensités records.

⁵ Cette méthode est couramment utilisée en hydrologie pour obtenir une statistique entre une grandeur représentative d'un phénomène et sa fréquence. Elle consiste à caler une loi de Poisson et une loi de type exponentielle simple (mais d'autres lois peuvent être utilisées) sur un échantillon de données. Cet échantillon de données est établi en prenant toutes les valeurs au-dessus d'un certain seuil parmi toutes les données correspondant à N années de mesures.



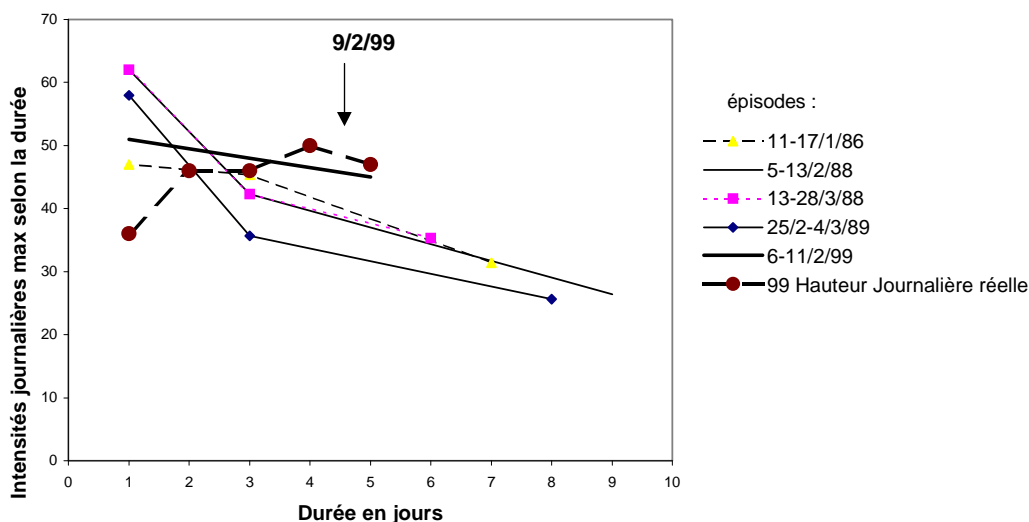
• Figure 3 : distribution empirique des cumuls de neige C (en cm) sur un épisode neigeux (de durée quelconque) en fonction de la période de retour T (en ans) sur la station du Tour (1470 m). Le cumul est calculé comme étant la somme des cumuls bi-journaliers (mesurés deux fois par jour) entre le début et la fin de l'épisode neigeux. La durée des épisodes considérés est généralement de quelques jours. Nous avons sélectionné toutes les valeurs de cumul dépassant 80 cm. En tout, nous avons trouvé 23 chutes de neige en 13 ans satisfaisant à $C > 80$ cm. La courbe continue représente la loi calée par la méthode du renouvellement (Poisson + exponentielle simple) : $C(T) = 80 + 64,8 \text{ Log}(1,77 T)$. La loi satisfait au test de vraisemblance du χ^2 . Avec un cumul de 225 cm, l'épisode du 6-10/02/99 a une période de retour de 5 ans.



• Figure 4 : distribution empirique des cumuls de neige C (en cm) sur un épisode neigeux (de durée quelconque) en fonction de la période de retour T (en ans) sur la station de Chamonix (1050 m). Le cumul est calculé comme étant la somme des cumuls bi-journaliers (mesurés deux fois par jour) entre le début et la fin de l'épisode neigeux. La durée des épisodes considérés est généralement de quelques jours. Attention, les données sont issues du poste du CEDONIGLA entre 1959 et 1990 et du CDM depuis 1991. Nous avons sélectionné toutes les valeurs de cumul dépassant 50 cm. En tout, nous avons trouvé 48 chutes de neige en 39 ans satisfaisant à $C > 80$ cm. La courbe continue représente la loi calée par la méthode du renouvellement (Poisson + exponentielle simple) : $C(T) = 50 + 25,3 \text{ Log}(1,23 T)$. La loi satisfait au test de vraisemblance du χ^2 . Avec un cumul de 140 cm, l'épisode du 6-10/02/99 a une période de retour de 35 ans.

Le caractère remarquable des chutes de neige de l'épisode du 5 au 9 apparaît dans le fait que celui-ci correspond d'une part à la plus forte intensité moyenne de chute de neige observée au Tour et au plus fort cumul à Chamonix (pour la définition du cumul telle qu'elle a été adoptée ici). D'autres records, comme la plus forte intensité journalière, n'ont cependant pas été dépassés. Sur la figure 5, nous avons tracé pour les différents épisodes météorologiques connus depuis 1986 sur le Tour les intensités maximales sur un jour, trois jours, et les intensités moyennes sur la durée de l'épisode. On retrouve que, si l'intensité maximale sur un jour des chutes de neige pour l'épisode du 6 au 11 février 1999 n'est pas la plus forte valeur, en revanche l'intensité moyenne est de loin la plus élevée ; les cumuls journaliers ont été très réguliers, avec un maximum le 9 février. A l'instar de ce qui s'est passé lors des dernières grandes crues catastrophiques (Nîmes, Vaison-la-Romaine), le caractère exceptionnel des précipitations est peut-être à rechercher dans la continuité de l'intensité pendant l'épisode plutôt que dans les maxima.

La situation à Montroc a vraisemblablement été très peu différente de celle du Tour étant donné la faible distance séparant les deux hameaux. On en déduit que **les chutes de neige sur Montroc n'ont de pas caractère exceptionnel en termes de cumul de neige et de lame d'eau. Les différentes méthodes statistiques employées donnent pour les cumuls de neige une période de retour d'environ 5 ans. Inversement ces chutes de neige se démarquent nettement des précédentes précipitations par leur caractère soutenu et régulier.** A Chamonix, compte tenu des températures très froides, elles ont un caractère plus rare avec une période de retour de l'ordre de 35 ans (la durée de retour de la lame d'eau à Chamonix, incluant également les épisodes de pluie, est de l'ordre de 3 ou 4 ans).



• Figure 5 : distribution des intensités maximales de chutes de neige en fonction de la durée pour chacun des gros épisodes sur le Tour depuis 1986 et distribution des cumuls de neige journaliers pour l'épisode du 6 au 11 février 1999. Hormis la dernière courbe, il s'agit des maxima en un jour, trois jours, et de la moyenne sur la durée totale des intensités indépendamment de la chronologie de chaque chute. Au contraire la dernière courbe donne les hauteurs de neige en séquence dans la chronologie.

La période de retour des chutes de neige (de l'ordre de 5 ans) tranche nettement avec la fréquence des avalanches sur Montroc (plutôt de l'ordre de 20 ans) et le caractère exceptionnel de la crue de février 1999 (compte tenu de l'importance des dégâts et de l'emprise inhabituelle pour une bonne moitié des avalanches). Une voie possible d'explication, suggérée à travers la figure 5, serait de dire que le cumul total de neige n'est pas le seul critère pertinent qui peut expliquer physiquement

et statistiquement une crue avalancheuse. On peut avancer que d'autres facteurs (vraisemblablement l'intensité des chutes, mais aussi sans doute le vent, la température, chutes de neige précédentes, etc.) sont également à prendre en compte.

A cet effet, nous avons recherché dans les données nivo-météorologiques des épisodes critiques, c'est-à-dire caractérisés par de forts cumuls de neige sur quelques jours. Nous avons dépouillé à cet effet les données des postes du Tour et celles de Chamonix⁶. Aucune règle directe et générale n'a pu être établie pour relier les crues avalancheuses sur tout le massif du Mont-Blanc à des cumuls critiques de neige. On ne peut donc pas lier simplement période de retour des chutes et fréquence des avalanches et il s'ensuit qu'au vu des connaissances actuelles, le décalage entre la période de retour des chutes de neige et l'ampleur de l'activité avalancheuse n'est pas contradictoire en soi.

3.7 Examen des conditions de déclenchement

Pour tenter d'établir les conditions les plus probables de déclenchement de l'avalanche, on dispose de deux types d'informations :

- observations de la zone de départ de l'avalanche depuis un hélicoptère ;
- estimation de l'état initial du manteau neigeux (cf. supra).

3.7.1 Analyse de la stabilité

Depuis un hélicoptère le 10 février au matin (source RTM), une cassure d'un à deux mètres d'épaisseur a été observée sous le Bec de Lachat. Au vu des observations sur le terrain (qui indiquent que seule la partie supérieure du manteau neigeux a été emportée) et des simulations du manteau neigeux, on peut considérer que cette épaisseur correspond à la couche de neige résultant des chutes de neige sur les cinq jours précédents.

La cassure linéaire indique que l'avalanche s'est déclenchée sous forme d'une **plaque, probablement friable**⁷. L'état initial supposé du manteau neigeux présente cette structure de plaque friable. La base de la couche de neige la plus récente a subi un tassement, sa cohésion a augmenté ; elle repose sur une couche fragile de grains à faces planes.

3.7.2 Cause du déclenchement

La cause du déclenchement de l'avalanche est **naturelle** (départ spontané). C'est une surcharge de neige sur le manteau neigeux qui a très probablement provoqué le déclenchement. Plusieurs hypothèses peuvent être émises sans qu'il soit possible de déterminer laquelle est la plus probable :

- la charge liée aux chutes de neige en cours a été suffisante pour atteindre le déséquilibre et provoquer le déclenchement ;
- coulée (purge naturelle en cours de chute de neige) dans les raides pentes rocheuses qui dominent la zone de départ, et déclenchant l'avalanche principale ;
- chute d'une corniche, permettant de déclencher (directement ou indirectement) l'avalanche principale (mais aucun élément visuel n'est probant en ce sens).

⁶ En fait pour le poste de Chamonix, il y a eu deux postes localisés à des endroits différents. Nous avons pris pour la période 1959-1990 celui implanté au CEDONIGLA et la nouvelle station pour 1991-99.

⁷ On appelle *plaque friable* un manteau neigeux constitué d'une couche de neige récente (particules reconnaissables parfois mélangées à des grains fins) reposant sur une couche de faible cohésion (faces planes, gobelets, neige fraîche,...). La neige récente, malgré un aspect encore poudreux a pris une cohésion suffisante pour qu'une cassure puisse se propager dans cette couche. Les blocs de neige se disloquent ensuite rapidement lorsque l'avalanche est en mouvement (par comparaison lors d'une avalanche de plaque dure on retrouve de gros blocs au niveau du dépôt).

3.7.3 Qualité de la neige sur le trajet

Sur tout le trajet de l'avalanche, le manteau neigeux était sec et froid. D'après les résultats de la modélisation du manteau neigeux (par la chaîne Safran/ Crocus/ Mépra), on trouve une grande quantité de neige fraîche facilement mobilisable : plus d'un mètre de neige légère de faible cohésion, ayant une densité assez faible (inférieure à 150 kg/m^3). On peut également estimer qu'au-dessous des couches correspondant aux dernières chutes de neige, il y avait une couche de neige d'assez bonne cohésion, puis une couche de gobelets de cohésion très mauvaise. Cette structure est compatible avec l'observation selon laquelle, par endroits, la totalité du manteau neigeux a été emportée.

Chapitre 4 : Analyse experte. Reconstitution de l'avalanche du 9 février 1999.

4.1 Méthodologie de l'analyse experte

4.1.1 Principe général

Les connaissances sur des phénomènes naturels aussi complexes que les avalanches sont encore trop imparfaites pour qu'on puisse, même *a posteriori*, spécifier les causes et le déroulement d'un événement avec une grande précision. Pour arriver à une reconstitution la plus cohérente possible de l'avalanche du 9 février 1999 sur Montroc, nous avons recoupé toutes les sources d'information à notre disposition :

- observations de terrain : elles permettent d'une part d'appréhender le fonctionnement général du site (découpage en différentes zones vis-à-vis des avalanches majeures), d'autre part de recueillir des indices du passage de l'avalanche du 9 février 1999 (dégâts, empreise). L'analyse des photographies aériennes permet également de se faire une idée générale sur la direction des flux et l'influence du relief. Plusieurs visites de terrain ont été réalisées au cours de l'hiver et du printemps ; chacune d'elles a amené des éléments intéressants et offert un éclairage différent. Les données de terrain sont foisonnantes. Elles ne sont pas toujours exploitables compte tenu de l'incertitude sur leur qualité (les travaux de secours ont largement et rapidement modifié l'état du dépôt, il n'est pas certain que tous les signes correspondent à l'avalanche qui nous intéresse). Il ne s'est pas dégagé une vue entièrement cohérente et totalement objective qui aboutisse à une interprétation de tous les indices recueillis, mais pour autant, aucun élément parmi les plus notables n'a dû être écarté ou est resté sans explication ;
- témoignages : même si ceux-ci sont maigres dans le cas présent, ils permettent d'apporter des indications précieuses sur ce qui a pu se passer dans la zone d'arrêt. Le plus souvent, ce sont des récits lus dans la presse et il n'a été possible ni de questionner tous les témoins (notamment les victimes survivantes), ni d'accéder aux constats de gendarmerie ;
- résultats de modèles de calcul : à l'heure actuelle, il existe un nombre important de modèles de calcul (un rapide panorama est dressé en annexe). Parmi les plus usités actuellement en France, on peut citer les *modèles empiriques*, dont l'emploi est courant en ingénierie et les *modèles de simulation*, qui sont encore en cours de développement et commencent à être utilisés dans des expertises pointues. C'est principalement l'échelle considérée pour les calculs qui les distingue :
 - les modèles empiriques se fondent sur des équations décrivant le mouvement global de l'avalanche : en général, les équations auxquelles on aboutit se résolvent facilement,
 - les modèles de simulation sont basées sur un jeu d'équations locales de conservation, issues de la mécanique des milieux continus ; l'intégration de ces équations est nécessairement numérique, ce qui est très gourmand en temps de calcul. Par exemple, une simulation de l'avalanche de Montroc à l'aide du modèle bi-couche (cf. infra) développé au Cemagref requiert actuellement 4 jours de calcul contre quelques minutes pour un modèle empirique.

Si les modèles de simulation reposent sur un niveau de description bien plus fin que celui des modèles empiriques, ils ne constituent pas encore un outil qui permette de trancher sur la nature des phénomènes physiques dans une avalanche, car ils reposent sur une description physique assez simplifiée. La situation est donc différente de l'hydraulique classique, où les outils numériques sont aujourd'hui à même de reconstituer assez fidèlement une crue. A défaut de lever l'incertitude sur le déroulement de l'avalanche, ces modèles permettent quand

même d'aboutir à une approximation des caractéristiques de l'avalanche (vitesse, hauteur, pression). Une différence également notable entre modèles empiriques et de simulation est que les premiers travaillent en prédétermination, c'est-à-dire qu'hormis la hauteur de neige, tous les paramètres sont choisis selon des directives ou parmi des gammes usuellement employées en ingénierie ; ces valeurs ont été déterminées au fil des années par calage sur un grand nombre d'événements. Au contraire, les modèles de simulation (développés au Cemagref) ne disposent pas encore d'une base suffisante d'événements ayant pu servir à leur validation ou au calage des paramètres. Les paramètres ont été calés à partir d'expériences sur maquette réalisées sur de la neige sèche au col du Lac Blanc.

Le travail de reconstitution a donc consisté à recenser les données existantes, à les hiérarchiser (selon leur vraisemblance, le degré de confiance que l'on peut attribuer, etc.), à les comparer entre elles. Une lecture du terrain (analyse de photographies aériennes, du fond topographique, et observations) a permis de distinguer quatre zones particulières du site et du même coup nous a incités à considérer quatre étapes pour l'avalanche du 9 février 1999 : une phase de déclenchement, deux phases d'écoulement, et une phase d'arrêt. Ci-après, pour chacune des phases, nous indiquons les indices (observations, témoignages) qui ont fondé notre réflexion, puis l'interprétation que nous en faisons. Les modèles utilisés nous permettent de quantifier certaines grandeurs comme la vitesse ou la hauteur. Comme nous estimons que l'avalanche du 9 février 1999 était un phénomène intermédiaire entre une avalanche coulante et un pur aérosol, nous admettons que les caractéristiques de l'écoulement peuvent être encadrées par celles données par les modèles VSG (avalanche coulante) et AVAER (aérosol). Ces estimations ont été corroborées par le modèle bi-couche.

Nous présentons juste après le principe des trois modèles que nous avons employés ; le résultat de leur exploitation est donné en annexes. Nous renvoyons également le lecteur aux annexes pour la terminologie et l'analyse des principaux phénomènes physiques en jeu dans les avalanches (description et modélisation).

4.1.2 Modèles : principes et apports

Nous avons utilisé deux modèles empiriques de calcul des avalanches :

- pour les avalanches coulantes : le modèle de Voellmy. Nous utiliserons la variante dite VSG (Voellmy-Salm-Gubler) datée de 1991 du modèle de Voellmy telle qu'elle est détaillée dans l'opuscule « *Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen* », Rapport n° 47 par B. Salm, A. Burkard, et H.U. Gubler (IFENA, Davos, Suisse). Une traduction de ce livret existe en français et est disponible sur simple demande au Cemagref ;
- pour les avalanches en aérosol : le modèle de Béghin. Nous utiliserons la variante développée par Rapin datée de 1992 telle qu'elle est détaillée dans l'article « *The french theory for the snow avalanche with aerosol* », par F. Rapin, publié dans les comptes rendus de l'Université européenne d'été sur les risques naturels tenue à Chamonix en 1992 (Cemagref éditions, 1995).

En sus, un modèle numérique dit bi-couche, actuellement en cours de développement au Cemagref de Grenoble a fourni certains résultats comme une trajectoire et un champ de pression. Ce modèle est présenté dans un article de M. Naaim et F. Naaim-Bouvet, intitulé « Modélisation des avalanches mixtes de neige sèche », paru dans la Houille Blanche (1999), n° 5.

Le tableau 6 récapitule les principales caractéristiques des modèles employés.

Modèle :	Modèle VSG	Modèle AVAER	Modèle bi-couche
<i>Type d'avalanche décrit</i>	Coulante	Aérosol	Tout type sec
<i>Type de mouvement</i>	Unidimensionnel	Unidimensionnel	tridimensionnel
<i>Reprise</i>	Non	Possible	Oui
<i>Nombre de paramètres rhéologiques</i>	2	2	3
<i>Nombre de paramètres géométriques</i>	Profils en long, travers	Profils en long, travers	Modèle de terrain 3D
<i>Nombre de conditions initiales</i>	3	4	2
<i>Calage des paramètres</i>	Directives suisses	Expériences	Expériences
<i>Validation</i>	Très importante (terrain)	Importante (laboratoire)	En cours
<i>Degré de confiance</i>	Bon	Assez bon	
<i>Résultats fournis</i>	Vitesse, hauteur, pression, distance d'arrêt	Géométrie, vitesse, pressions	Géométrie, vitesse, pression, concentration
<i>Remarques</i>	Donne des vitesses très approximatives dans la zone d'arrêt ; procédure spécifique en cas de pentes négatives, très sensible au paramètre de frottement (μ)	Problème des conditions initiales, pas de procédure disponible en cas de pentes négatives	Modèle en cours de développement

• Tableau 6 : récapitulatif des caractéristiques des modèles d'avalanche employés dans la reconstitution.

4.1.3.1 Le modèle de Voellmy

Le modèle VSG ignore l'incorporation de neige (reprise) en cours d'écoulement. D'un point de vue mécanique, il nécessite de déterminer seulement deux paramètres : un coefficient dit de frottement solide (μ) et un autre coefficient dit de frottement turbulent (ε). Le frottement solide μ traduit la fluidité de la neige mobilisée par l'avalanche ; on considère en général qu'il diminue lorsque la taille de l'avalanche augmente. Le coefficient turbulent ε reflète l'influence de la rugosité du site ; c'est normalement une grandeur intrinsèque du site.

Pour Montroc, la valeur des coefficients a été choisie sur la base de la notice suisse (référéncée ci-dessus) de 1991. Il a été possible d'utiliser le modèle sur tout le site avec une mise en œuvre facile. Comme profil de terrain, nous avons considéré celui représenté à la figure 7. Notons que la procédure de calcul des caractéristiques lors de la remontée sur les Poses n'est pas inscrite dans les directives suisses de 1991. Pour cette zone, nous avons utilisé deux formules d'estimation de la distance d'arrêt disponibles dans la littérature technique. Comme conditions initiales, nous avons estimé que l'épaisseur de la couche déclenchée à 2400 m était de 1,5 m.

4.1.3.2 Le modèle AVAER

AVAER est un logiciel qui permet une estimation des caractéristiques géométriques, de vitesse et d'impact des avalanches aérosol. Il a été conçu à partir des nombreuses expérimentations conduites en laboratoire par Pierre Béghin à la division Nivologie du Cemagref. Ce logiciel travaille sur un profil en long, pouvant tenir compte des élargissements possibles. Il peut être mis en œuvre assez rapidement. Il a été utilisé dans plusieurs cas d'ingénierie où des avalanches en aérosol étaient à étudier.

A Montroc, AVAER n'a été utilisé que sur le tronçon inférieur du site (au-dessous de la cote 1800 m) dominant directement la vallée de l'Arve. A l'amont, compte tenu de la faiblesse des pentes,

nous présumons que l'avalanche du 9 février 1999 n'était pas un pur aérosol. En rive droite de l'Arve, au niveau des Poses (où étaient construits les chalets détruits), la pente remontante ne permet pas d'utiliser ce logiciel dans de bonnes conditions de similitude.

4.1.3.3 Le modèle bi-couche

La modélisation bi-couche a été développée pour étudier tout particulièrement les avalanches mobilisant de la neige fraîche sèche et sans cohésion. Elle traite l'écoulement depuis son déclenchement jusqu'à son arrêt. Dans cette modélisation, l'avalanche est décomposée en deux couches :

- la couche inférieure se comporte comme un écoulement fortement concentré de neige sèche (avalanche coulante). En fonction du taux de cisaillement et du nombre de Froude, l'écoulement est décrit soit par un modèle frictionnel (Coulomb), emprunté à la mécanique des sols, soit par un modèle inertiel (Bagnold), emprunté à la mécanique des milieux granulaires rapides. Ce modèle appliqué aux avalanches a été calé avec des expérimentations réalisées sur de la neige sèche dans une maquette au Col du Lac Blanc. La reprise de neige par l'avalanche ou son dépôt est traitée de la manière suivante : les échanges de masse et de quantité de mouvement sont régis par des modèles d'érosion et de dépôt semblables à ceux développés pour l'écoulement en aérosol (voir ci-dessous).
- la couche supérieure consiste en une suspension diluée de neige dans l'air (aérosol) ; l'écoulement y est fortement turbulent ; la dissipation d'énergie est dominée par la turbulence du fluide interstitiel. La formation et le développement de l'aérosol résultent de l'érosion au sommet de la couche inférieure en mouvement. Cette interface est traitée par un modèle issu d'une théorie employée pour décrire la saltation de particules dans un fluide (transport de neige par le vent). Le flux de la masse prélevée est supposé proportionnel à la différence entre les contraintes exercées par l'aérosol et la résistance à l'arrachement des particules dans l'écoulement dense. Ce modèle d'érosion est complété par un modèle de dépôt, qui opère lorsque la turbulence diminue. Ces deux modèles d'érosion et de dépôt ont été calibrés par des essais en soufflerie diphasique et par les expérimentations du Col du Lac Blanc, réalisés notamment à l'occasion des travaux de recherche conduits dans le domaine du transport de neige par le vent.

Dès sa conception ce modèle bi-couche a été construit pour utiliser la topographie sous sa forme tridimensionnelle. Le maillage sur lequel les calculs sont réalisés est le modèle numérique du terrain. Une particularité de ce modèle évite à l'utilisateur de prédéfinir la trajectoire de l'avalanche. Les principaux résultats sont : la hauteur et la trajectoire de l'avalanche, les champs de pression et de vitesse. Dans le cas présent, à défaut de disposer dans le délai imparti d'un véritable modèle numérique de terrain, nous avons numérisé les courbes de niveau de la carte IGN au 1:25 000. Le pas du modèle de terrain ainsi réalisé est de 5 m. La précision de ce plan est évidemment limitée, notamment dans la zone de dépôt, où notre modèle numérique de terrain rend assez mal compte de la topographie (par exemple la moraine à la confluence entre l'Arve et le Buisme, qui a joué un rôle important dans l'étalement de l'avalanche, mais que nous n'avons pu prendre en compte ; cela peut expliquer l'écart sur la figure 6 entre l'emprise réelle et l'emprise simulée de l'avalanche). En tout état de cause, cela permet déjà d'avoir une première approximation du phénomène étudié

En dehors de paramètres physiques, tels que ceux nécessaires au traitement de la turbulence, et dont les valeurs sont fixées par ailleurs, le modèle bi-couche nécessite de connaître trois paramètres mécaniques : l'angle de frottement, le coefficient de restitution lors de chocs entre particules de neige, et le coefficient d'érosion. Les deux premiers paramètres ont été calés pour de la neige fraîche sèche lors d'expérimentations sur maquette au col du Lac Blanc. La valeur du coefficient d'érosion provient d'essais réalisés lors des expérimentations du transport de la neige par le vent. Dans le cas présent, nous avons utilisé telles quelles les valeurs de ces paramètres ; nous n'avons pas cherché à les ajuster pour affiner les prédictions. Comme conditions initiales,

seules la surface de la zone de départ et la hauteur de la neige dans la zone de départ ainsi que la hauteur de neige éventuellement mobilisable dans l'ensemble du couloir peuvent être modifiées par l'utilisateur. Nous avons admis que le manteau neigeux était homogène. Dans la zone de départ, nous avons supposé que l'épaisseur du décrochement était de 1,5 m. Nous avons considéré un manteau neigeux disponible et éventuellement mobilisable d'une épaisseur de 1 m sur l'ensemble du parcours.



• Figure 6 : pressions maximales développées, supérieures à 5 kPa, selon la modélisation bi-couche ; on estime qu'en deçà de cette valeur les éventuels dégâts produits par l'avalanche sont peu significatifs. Plus la couleur est foncée, plus la pression est forte. On notera : l'élargissement très significatif de l'avalanche sur la montagne de Péclerey, l'accélération importante dans le couloir du Grand Lanchis (forte pression). L'emprise simulée correspond à peu près au niveau des Poses à l'emprise observée, mais au niveau du couloir n° 2, elle surestime la zone de dépôt (probablement à cause de l'imprécision du modèle de terrain utilisé).

Les précurseurs de ce modèle bi-couche ont été utilisés lors de la reconstitution d'avalanches passées : Arinsal (Andorre), le Bourgeat (Haute-Savoie), la Drayre (Isère), Claret (Isère), Méribel (Savoie). Ce modèle a aussi permis de retrouver les caractéristiques de quatre autres avalanches bien documentées. Ces avalanches se sont produites en Suisse, en Italie, en Islande et en Espagne. Ce travail de comparaison entre les résultats simulés et observés a été réalisé dans le cadre du projet Européen SAME.

4.2 Reconstitution de l'événement à partir de toutes les données

4.2.1 Le site : découpage en zones

Géographiquement, le site est délimité principalement :

- au nord par la rive gauche du Buisme, mais il faut absolument prendre en compte une extension sur l'adret en rive droite de l'Arve et du Buisme (sans qu'une cote limite se dégage nettement) ;
- au sud, par l'arête du Bec de Lachat jusqu'au point coté 2572 m (jonction des arêtes venant du Bec de Lachat et du Bec de la Cluy) ;
- à l'est, par une ligne joignant les altitudes extrêmes 2572 m, le Bec de la Cluy (2334 m), la passerelle sur le Buisme (point coté 1470 m) et le point coté 1391 m (au creux de l'Arve) ;
- à l'ouest par le prolongement de la crête du Grand Chantet descendant du Bec de la Cluy jusqu'au point coté 1382 m (sur l'adret).

L'orientation générale est au nord-ouest. Le point sommital du bassin versant est à 2572 m et son point le plus bas (lit de l'Arve) se trouve vers 1390 m. Du point de vue du fonctionnement

avalancheux, la limite amont du site débute en fait sous les pentes rocheuses sommitales, soit vers 2430 m tandis que sa limite aval s'étend sur le versant opposé en rive droite de l'Arve jusque vers la cote 1420 m. La différence d'altitude est alors de 1010 m environ correspondant à une dénivelée descendante de 1040 m et à une remontée de 30 m environ. La pente moyenne générale (jusqu'à l'Arve) est 51% (27°), c'est-à-dire moyenne. On peut organiser *grosso modo* le site en 4 tronçons successifs :

La **zone d'accumulation** (2572-2250 m), dans laquelle a eu lieu le départ, avec :

- pour limites externes : une arête sommitale comprise entre 2570 m à l'est et 2440 m au centre (Bec de Lachat) puis 2150 m vers le nord-ouest, une arête sommitale comprise entre 2570 m à l'est et 2334 m (Bec de la Cluy) au nord-ouest ;
- une combe (avec un seul affleurement rocheux vers 2320 m au centre nord) d'une dizaine d'hectares, (pente moyenne 74 %, soit 36°), surmontée par :
 - une pente rocheuse très raide (environ 50°) vers le sud,
 - une pente moins rocheuse raide (environ 45°) vers le nord-est ;
 - en rive gauche, un bord limitant tout étalement de l'écoulement ou débordement vers l'ouest ;
 - en rive droite, un bord existant mais peu marqué.

Le **secteur d'écoulement supérieur**, appelé *montagne de Péclerey* (2250-1800 m) avec :

- une limite depuis environ 2250 m à l'est vers la ligne 1800 m à l'ouest ;
- une pente assez régulière et plutôt faible (comprise entre 28 et 18°) dont plus de 700 m de long inclinés à moins de 20° ;
- une allure générale moutonnée (alternance à grande échelle de creux et de bosses) due à la présence d'un glacier rocheux : ce n'est pas un plan incliné lisse ;
- la disparition de la limite latérale en rive droite (arête nord-ouest du Bec de la Cluy), en particulier sous la cote 2000 m.

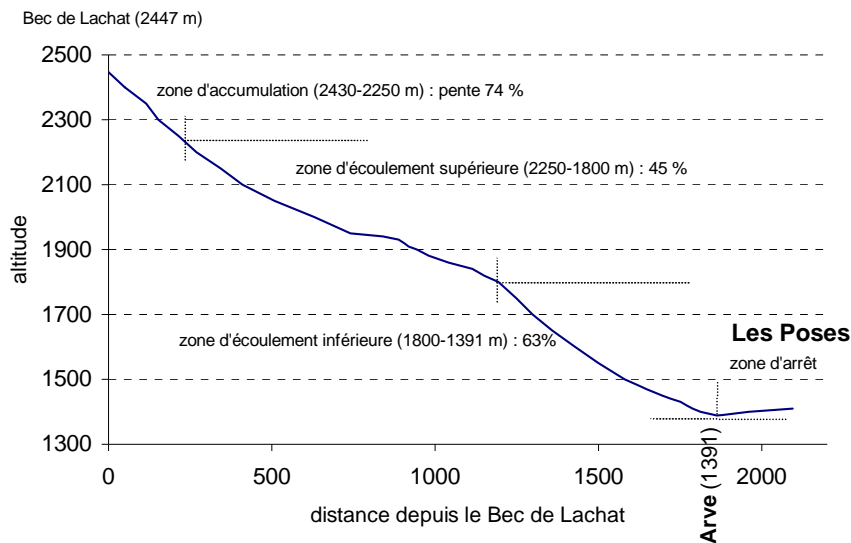
A noter : l'élargissement accompagné de la disparition des lignes de crête en provenance du sommet est à même d'orienter les avalanches dans différentes directions (de nord-ouest à nord-est) selon les panneaux déclenchés dans la zone de départ. Par la suite, nous restreignons le descriptif au couloir n° 1.

Le **secteur d'écoulement inférieur** (1800-1390 m) avec pour le couloir n° 1 :

- une limite depuis 1800 m au sud-est à 1391 m au nord-ouest (lit de l'Arve) ;
- un très brutal accroissement de pente au départ (45°) sur quelques dizaines de mètres ;
- un net changement de direction (près de 20°) vers le nord-est pour le couloir n° 1 ;
- une pente de forme parabolique variant de 45° à 15° ;
- une pente moyenne de 63 % (32°), c'est-à-dire moyenne ;
- une trouée dans le mélézin, d'une largeur de 180-200 m, avec une lentille de mélézin au centre et vers le nord-est.

La **zone d'arrêt** (1390-1420 m) avec pour le couloir n° 1 :

- une limite entre les altitudes 1391 m au sud-est et 1410 m au nord-ouest (remontée topographique) ;
- une remontée assez douce (de l'ordre de 6°), sauf en rive droite du couloir n° 1 où il existe une butte intermédiaire (couverte de mélèzes) entre l'Arve et le ruisseau du Buisme provenant du glacier du Tour ;
- un replat très marqué (mais légèrement incliné, avec une pente de l'ordre de 3°) au niveau des chalets des Poses (quelques mètres de dénivelée).



• Figure 7 : profil en long du site avalancheux.

Certaines des caractéristiques essentielles de l'avalanche sont regroupées selon les différentes phases dans un tableau 8 du paragraphe 4.2.6 de synthèse.

4.2.2 Phase de départ

4.2.2.1 Observations

Une ligne de rupture concernant deux plaques superposées est bien visible (voir photographies 1 à 4), en particulier vers le sud et vers le fond à l'est, à mi-hauteur du versant (à la limite inférieure des rochers émergents) ; cette cassure est assez linéaire et relativement peu découpée. L'épaisseur totale est de 1 à 2 m. Elle n'a aucun caractère extraordinaire ; c'est une valeur couramment observée dans les Alpes. Seule la partie supérieure du manteau neigeux a donc été mise en mouvement.

Une corniche sur l'arête est-ouest, débordant vers le nord, est importante et localement particulièrement grosse (5 à 8 m), mais sans aucune rupture brutale apparente au moment de notre première visite : cela n'a donc probablement pas été le détonateur. Lors du survol en hélicoptère du vendredi 12 février, nous avons observé une petite rupture de plaque sous la corniche de l'arête sud dans la partie rocheuse (voir photographie 2) : ceci a pu constituer le détonateur de l'ensemble. Par ailleurs, l'effet d'un vent remontant la vallée (de sud-sud-ouest) est bien visible, en particulier grâce aux signes d'érosion observés sur la face ouest du Bec Rouge inférieur (les observations du vendredi 12 février ont mis en évidence également l'effet du vent repassé de secteur nord depuis le mercredi 10).

Les extrémités latérales de la combe, c'est-à-dire les pentes fortes exposées au nord, pourtant très chargées, comme celles exposées à l'ouest, n'ont pas été très concernées : c'est la partie centrale, exposée à l'ouest-nord-ouest, de l'ensemble de la zone potentielle de départ qui a été mobilisée. La largeur totale de l'avalanche est alors d'environ 250 m.

4.2.2.2 Interprétation

Ainsi que le montre l'interprétation des données nivo-météorologiques et sur la base des observations qui ont pu être faites juste après l'accident, nous estimons que le déclenchement est dû :

- soit à l'effet *d'éléments détonateurs*, c'est-à-dire :
 - la chute possible mais non visible d'un bout de corniche de l'arête sud,
 - le départ visible (photographie) d'une petite plaque sous la corniche de l'arête sud ;
- soit à l'instabilité du manteau provoquée par la surcharge de neige fraîche.

La pente forte et la faible cohésion des couches de neige mobilisées ont contribué à donner une vitesse rapidement importante (25 à 30 m/s) à l'écoulement.

Le volume de neige mobilisé s'estime à environ 90 000 m³ avec une masse volumique de 100 à 150 kg/m³. La partie supérieure déclenchée correspond vraisemblablement aux dernières chutes de neige (du 5 au 9 février 1999).

4.2.3 Phase d'écoulement sur la montagne de Péclerey

4.2.3.1 Observations

Sous cette zone de départ, les photographies d'hélicoptère (voir photographies n° 4 et 5) montrent des signes distincts du passage de l'avalanche et de son étalement : l'aspect de surface est alors granuleux. Il y eu divergence latérale : une partie de l'avalanche s'est écoulée en direction du couloir n° 2 et même au-delà vers le nord-est. La pente s'affaiblit avec un tronçon de plus de 700 m de long à moins de 20° (35%). La reprise de la neige par l'avalanche a dû y être partielle.

4.2.3.2 Interprétation

Dans le secteur d'écoulement supérieur (montagne de Péclerey entre 2100 et 1800 m d'altitude), l'avalanche :

- est encore relativement dense mais avec de la neige fraîche sans cohésion et très froide (d'une consistance similaire à de la farine) ;
- progresse sous forme de lame (de nappe) de neige ;
- reprend un peu de neige superficielle légère, ce qui maintient une certaine concentration ;
- développe, vraisemblablement, un panache, mais sans effet dynamique significatif ;
- décélère progressivement tout en arrivant à se maintenir à une vitesse suffisante (de l'ordre de 20 m/s) à cause de la neige sèche très légère rencontrée et des diverses petites accélérations locales du terrain (dues au moutonnement du sol).

L'avalanche garde au départ une largeur constante (250 m), puis s'agrandit progressivement sur la montagne de Péclerey, à partir de la cote 2000 m avec un débordement sur la rive droite pour atteindre une valeur d'environ 400 m à la rupture de pente vers la cote 1800 m (les couloirs n°1 (vers Montroc) et n°2 (vers Le Tour) de la CLPA sont concernés). Le volume repris peut s'estimer à environ 150 000 m³ sur la montagne de Péclerey et on peut estimer que les deux tiers du total transitent par le couloir numéro 1, ce qui conduit à environ 160 000 m³.

4.2.4 Phase d'écoulement sur le couloir du Grand Lanchis

4.2.4.1 Observations

Les visites de terrain ont montré que le couloir n°1 est encore bien marqué en rive droite par une lentille de mélèzin qui subsiste vers 1500 m d'altitude, mais en rive gauche la limite forestière a

reculé de plusieurs mètres, ce qui conduit à une largeur d'environ 150 m. Vers l'amont, il reste très peu de neige en place (reprise d'environ 90 000 m³) ; quelques rares mélèzes subsistent près de la rupture de pente et ils sont décapités (voir photographie 5). Vers l'aval, un faible dépôt superficiel (quelques dizaines de cm) rugueux et diffus (petites boules friables) est recouvert par quelques centimètres de neige plus récente.

Le couloir n°2 est également élargi sur sa rive gauche ; l'avalanche s'y est faite sentir jusqu'à la route du Tour et même au-delà (cf. photographie aérienne jointe en annexe). Le lit de l'Arve est comblé par le dépôt de l'avalanche, mais il se devine encore (photographie 9).

4.2.4.2 Interprétation

La forte rupture de pente vers 1800 m entraîne une modification sensible de la dynamique, qui se traduit par :

- une aération de l'écoulement (forte incorporation d'air), ce qui génère un aérosol ;
- une accélération notable de tous les flux en mouvement, ce qui limite l'élargissement et maintient une concentration assez forte.

Sur ce versant toute la neige récente est reprise. A l'arrivée sur l'Arve, on estime que :

- un élargissement progressif se produit car la pente s'atténue ;
- la vitesse moyenne est très forte, comprise entre 25 et 50 m/s ;
- la masse volumique moyenne de l'avalanche est comprise entre 50 et 150 kg/m³ ;
- la hauteur de la partie dense de l'avalanche est comprise entre 2 et 5 m, mais un aérosol bourgeonne au-dessus (hauteur supérieure à 25 m) et finit par précéder le flux dense de l'avalanche.

Sur la fin de ce tronçon, l'avalanche possède des caractéristiques tantôt plus proches de celles des aérosols (neige très légère, grande vitesse), tantôt proches de celles des avalanches coulantes (centre de gravité proche du sol, faible hauteur d'écoulement dense).

4.2.5 Phase d'arrêt

4.2.5.1 Observations, témoignages

Le dépôt a été estimé à 250 m de long, 150 m de large, et environ 4 mètres d'épaisseur en moyenne. Ceci conduit à un volume voisin de 150 000 m³ avec une masse volumique moyenne de 250 kg/m³. À l'aval de la route (vers le sud-est), l'épaisseur du dépôt s'évalue entre 4 et 8 m : les premiers niveaux des habitations ont tous été détruits et recouverts. Cette épaisseur s'atténue progressivement et assez insensiblement vers l'amont passant de 2 à 5 m. Vingt chalets sont concernés (avec des dégâts matériels plus ou moins importants). Le tableau 7 recense le nombre de chalets touchés par zone du PER.

Zone PER		Blanche	Bleue	Total
Nombre de chalets	atteints	3	3	6
	détruits	9	5	14
Total		12	8	20

- Tableau 7 : récapitulatif des chalets concernés par l'avalanche. On indique le nombre de chalets situés dans les zones du plan d'exposition aux risques (concernant le risque d'avalanche). Attention, la zone bleue mentionnée correspond en partie aux risques induits conjointement par le couloir n° 11 (avalanche venant des Posettes) et par le couloir n° 1 de la CLPA.

Une numérotation des chalets est faite sur plan cadastral joint (photographie RGD) dans les annexes. Un relevé de l'emprise a été réalisé par un géomètre accompagné d'un huissier dans les jours suivant l'accident ; il correspond à notre propre relevé effectué le lendemain de l'accident avec l'aide du RTM, mais les visites de terrain ultérieures ont montré que ces deux relevés sous-estimaient la distance d'arrêt : un toit de garage transporté et découvert ultérieurement au-delà de cette limite, vers la montagne des Posettes.

D'après le PGHM, les dégâts occasionnés aux habitations tels qu'ils ont pu être observés par les sauveteurs sont les suivants :

- les structures des 20 chalets étaient à peu près identiques : soubassement en dur (maçonnerie ou béton) et partie supérieure (habitation principale) totalement en bois, avec quelques exceptions (chalets n°13, 15 et 16 : en béton) ;
- toutes les habitations concernées sont postérieures à la seconde guerre mondiale.

Depuis l'Arve vers la route et au-delà, il a été noté :

- chalet n°12 : sa partie supérieure a été déplacée sur une quinzaine de mètres vers l'ouest, elle aurait également effectué un demi-tour ;
- chalet n°13 : détruit ;
- chalets n° 11 et 14 : détruits et des grandes parties de la structure supérieure ont été déplacées au-delà de la route sur plus de vingt-cinq mètres vers le nord-ouest ;
- chalet 15 : coupé en deux et la partie supérieure a basculé vers l'amont ;
- chalets n° 16 et 17 : entièrement détruits et les débris ont traversé la route ;
- chalets n° 6, 7, et 8 : détruits, la toiture du n°6 a probablement été déportée vers le nord ;
- chalet n°5 : détruit et le garage souterrain rempli de neige ;
- chalet n°1 : ouvertures aval forcées par la neige, sous-sol et salle-à-manger remplis de neige, pignon plâtré.

En partant de l'Arve et en remontant l'adret, on a pu noter les éléments suivants lors des différentes visites (le mercredi 10, le vendredi 12, le mardi 16 février, le mercredi 31 mars et le mercredi 12 mai) :

- sur la rive gauche de l'Arve, le dépôt dans le couloir est nul sous la cassure de pente (vers 1800 m) et faible à l'aval sauf à proximité immédiate de l'Arve (photographies n° 7 et 9) ; de part et d'autre, les arbres en lisière sont plaqués de neige sur leur face exposée et ébranchés en drapeau sur une quinzaine de mètres de hauteur ; quelques arbres sont couchés ou arrachés, surtout à l'aval rive gauche ;
- le lit de l'Arve est comblé de neige : la rivière est invisible sur plusieurs dizaines de mètres, ce qui n'est pas le cas plus bas (photographies n° 6 et 9) ;
- le dépôt s'accroît nettement juste à l'aval du chalet n°13 : supérieur à 6-8 m (photographies n° 10 et 11) ;
- telle qu'elle a été observée, la partie supérieure du chalet n° 12 a été arrachée, puis transportée vers l'ouest sur une quinzaine de mètres et pivotée (photographie n° 16). Hormis une tôle pliée et les ouvertures éventrées, la structure en bois semble en bon état et paradoxalement peu abîmée par ce transport ;
- le chalet n°13 ainsi que le sous-bassement du n°12 n'étaient toujours pas été repérables dans les jours suivants ;
- les chalets n° 11 et 15 étaient littéralement «explosés». Seuls subsistent les soubassements en béton. Les sous-sols étaient pleins de neige.
- le chalet n°16 en béton armé a été coupé en deux, la partie supérieure a basculé vers l'amont au delà de la route (photographie n° 12) ; la façade (pignon aveugle) orientée vers l'avalanche et renforcée (béton armé) a largement basculé vers l'amont, sans être disloquée ;
- les chalets n° 17 et 18 ont été totalement détruits jusqu'à leurs soubassements. Les débris ont été transportés sur plusieurs dizaines de mètres vers l'amont ;
- au niveau de la route, la neige a une hauteur supérieure à 2 m et est très dense (impossible d'y enfoncer un doigt) ;

- les chalets n° 19 et 20 ont été plâtrés mais aucun dégât sur les ouvertures n'a été observé (photographies n° 11 et 14) . Les mélèzes à proximité ont leurs branches détruites sur plusieurs mètres de hauteur sur toutes leurs faces regardant l'avalanche. Derrière ces mélèzes un dépôt de boules de taille inférieure au poing est bien visible (le 16/02) (photographie n° 18). Les poutres de charpente et les dessous de toiture sont plâtrés ;
- le chalet n°9 est également plâtré (photographies n° 15), il n'y a plus de rambarde au balcon et la neige est rentrée à l'intérieur par les ouvertures du niveau de ce balcon ;
- le chalet situé sur la parcelle 4109 (à l'est du n°9) n'a aucun dégât : de nombreux objets fragiles (barrières en plastique, luminaires, etc.) sont encore présents ;
- des débris de branches de mélèzes (petites branches) sont visibles à proximité des chalets du gros Perrier, sur les toitures et jusqu'à la pente descendant des Posettes ;
- des carcasses de voiture sont observables au-delà de route. Pour chacune d'elles, la carrosserie est détruite mais le châssis ne semble pas trop endommagé ;
- les arbres en lisière de la pente des Posettes sont plâtrés (entre les chalet n°1 et n°9) ;
- les ouvertures du chalet n°1 regardant vers l'aval ont été forcées par la neige : le sous-sol et le rez-de-chaussée ont été remplis de neige (photographies n° 17). Pas d'autres dégâts apparents. Les mélèzes derrière cette bâtisse sont plâtrés sur une quinzaine de mètres, mais une différence dans la quantité déposée suggère que la partie supérieure (les cinq derniers mètres) était moins dense ;
- le chalet n°3 est seulement plâtré sur sa face aval ;
- le chalet n°5 (voisin du n°3) est détruit (photographies n° 17). Seul son sous-sol (garage souterrain) subsiste mais il a été rempli de neige ; des poutres en béton armé ont été pliées (armature métallique : Ø10 tordues) ;
- le toit d'un petit chalet (garage ?), très peu endommagé sur la partie visible, a été retrouvé (visible en avril-mai) au niveau du début de la forêt remontant en direction de la tête de la Chenavière, vers la cote 1425 m.

Le dépôt est ondulé sur la face remontante, sans franche limite latérale, à surface parfois rugueuse (photographies n° 10). Dès notre première visite, nous avons trouvé qu'il a été presque complètement remanié en surface sur la zone des habitations détruites et vers l'amont (pour plate-forme DZ) durant les opérations de secours (photographies n° 7 et 9) .

Il a été possible de recueillir quelques témoignages épars sur l'accident. Nous avons également synthétisé les informations données par la presse écrite. Une revue de presse a été réalisée ; compte tenu de son volume, ce document n'est pas annexé mais est disponible au Cemagref. A ce stade de notre travail⁸, nous n'avons pas interrogé les victimes compte tenu de leur probable état de choc.

Parmi les riverains, voisins des chalets sinistrés, la plupart ont surtout ressenti un léger tremblement mais rien entendu. Ainsi, alors que son chalet se situe à 25 m de la bordure ouest du dépôt de l'avalanche, André Arpin ne s'est pas immédiatement rendu compte qu'une avalanche venait d'avoir lieu. La famille Pavy louant un chalet situé à une cinquantaine de mètres du dépôt de l'avalanche se souvient d'un grand souffle qui fit trembler les vitres puis d'un grand calme⁹. A notre connaissance, l'un des rares témoins oculaires est Peter Borggaard, gérant de l'hôtel des Becs Rouges. Au moment de l'accident, il déneigeait le toit du bâtiment. De sa position, il n'a pas pu observer assez bien le phénomène. En revanche, il se souvient nettement qu'à 14 h 40, au moment du déclenchement de l'avalanche, il a entendu :

- d'abord un ronflement qu'il a attribué à une chute de séracs en provenance du glacier du Tour,
- puis, après quelques secondes, le craquement des arbres cassés et emportés par l'écoulement,

⁸ Cela a été réalisé par le peloton de gendarmerie de haute montagne de Chamonix, mais une enquête étant en cours, les procès-verbaux ne sont pas consultables.

⁹ Témoignage tiré du quotidien Le Figaro du 11 février 1999.

- ensuite, un bruit sourd correspondant, semble-il, au moment où l'avalanche est arrivée au niveau du lit de l'Arve.

Mr Borggaard se souvient alors avoir ressenti le souffle de l'avalanche qui l'a renversé.

Dans la presse écrite, nous avons trouvé deux témoignages de victimes :

- la famille Venon, logeant dans le gros chalet situé 40 m à l'est du n° 9, s'apprêtait à sortir au moment de l'avalanche. L'un des enfants a entendu « comme un train, un brouhaha énorme se ruant sur eux ». Il dit avoir vu un nuage de neige dévalant la montagne. Un autre a été projeté contre le mur extérieur du chalet¹⁰ ;
- madame Florence du Manoir, logeant avec ses deux enfants dans le chalet n° 9, a entendu « comme un coup de tonnerre faisant trembler les baies vitrées ». Elle rapporte également qu'« il y a eu comme un souffle, les fenêtres ont éclaté, de la neige est entrée dans la maison ». Elle a vu qu'« un immense nuage blanc enveloppait le chalet »¹¹.

A noter : les visites de terrain de la fin du printemps nous ont montré que l'emprise de l'avalanche était légèrement plus grande que celle reportée dans le relevé effectué par l'huissier juste après l'accident (cf. annexes). Notamment, la toiture d'un petit chalet, invisible de février à avril 1999, était parfaitement observable au début du mois de mai : il s'était immobilisé contre les premières lignes de mélèzes vers la cote 1425 m, ce qui ne laissait aucun doute au fait que l'avalanche ait pu parvenir jusqu'à cette cote. Le projet de CLPA révisée (cf. annexes) rend compte de manière plus précise de l'emprise de l'avalanche sur la base de tous les éléments notés.

4.2.5.2 Interprétation

Lors de sa remontée sur l'adret, l'avalanche subit une rapide évolution de ses caractéristiques et celles-ci sont également distribuées de manière fort variable dans l'espace. Le petit aérosol qui la précède et la surmonte souffle violemment contre les habitations et remonte assez haut tout en diffusant considérablement, mais ne provoque vraisemblablement pas de dégâts significatifs. Dix à vingt pour-cent de la masse de neige a probablement été dissipé en nuage. Suit derrière le flux principal :

- qui se densifie au fur et à mesure de la remontée (vitesse diminuant, obstacles rencontrés) ; la masse volumique est comprise entre 100 et 250 kg/m³ (fortes variabilités spatiale et temporelle) ;
- qui reste rapide avec une vitesse comprise entre 20 et 25 m/s jusqu'à la route, puis diminuant lentement et plus brutalement à la bordure de la forêt ;
- qui provoque l'essentiel des dégâts aux habitations. La pression d'impact est forte, comprise en moyenne entre 50 et 80 kPa, parfois localement beaucoup plus importante (effet de coup de bélier provoqué par les objets transportés) ;
- qui s'élargit assez peu (de l'ordre de 200 m de large). Le flux garde une direction assez constante lors de sa remontée compte tenu de sa forte inertie.

4.2.6 Synthèse sur la reconstitution de l'avalanche du 9 février 1999

L'avalanche du 9 février 1999 partant du Bec de Lachat est un phénomène complexe et peu ordinaire par ses caractéristiques. Il faut se garder de vouloir la réduire à un type bien précis d'avalanche. En effet, on estime que, d'une part, elle a dû présenter des caractéristiques très variables selon les tronçons (en termes de vitesses et de forme d'écoulement) et d'autre part elle possède des caractéristiques propres aux avalanches coulantes et aux aérosols : pour être plus précis, on peut dire qu'il s'est vraisemblablement agi d'une avalanche très rapide (plusieurs dizaines de mètres par seconde), de neige sèche et très fluide, en moyenne pas très dense (moins de 200 kg/m³) avec un centre de gravité proche du sol, et une hauteur d'écoulement avec ce niveau de

¹⁰ Témoignage tiré du magazine VSD du 14 février 1999.

¹¹ Témoignage tiré du quotidien Le Figaro du 10 février 1999.

densité assez moyenne (moins de 5 m), surmontée par un aérosol qui n'a vraisemblablement pas causé de dégâts significatifs. Elle s'est également caractérisée par la brutalité de son impact avec les bâtiments et une distance d'arrêt peu commune en regard de phénomènes comparables connus.

Il nous semble que plusieurs facteurs ont contribué à l'ampleur de cette avalanche, en tout cas avec des effets sans rapport avec la période de retour de l'événement nivo-météorologique associé (exprimée pour les cumuls de neige). Tout d'abord, les chutes de neige accompagnées d'une température très froide ont permis l'établissement d'une importante couche de neige facilement mobilisable tout le long du trajet de l'avalanche. La présence de neige sans cohésion datant du début de saison a pu encore favoriser la reprise de neige en place par l'avalanche. Ensuite, la neige mobilisée sèche, très froide devait présenter un caractère extrêmement fluide une fois mise en mouvement. Enfin, la configuration du site, avec cette rupture de pente marquée vers 1800 m, a aidé à donner une nouvelle impulsion à l'avalanche (en termes de vitesse) et à l'aérer (en termes de densité, dans sa partie supérieure).

Caractéristique :	pente (%)	largeur (m)	hauteur (m)	volume (m³)	vitesse (m/s)	masse volumique (m³/s)
Phase : de départ	74	250	2 - 3	90 000	25 à 30	100 - 150
d'écoulement supérieur	45	500 (-350)	4 - 5 + panache	+ 150 000 x 2/3 → 160 000	20	100 - 150
d'écoulement inférieur	63	150 (couloir n° 1)	2 - 5 + >25	+ 90 000 → 250 000	25 à 50	50 - 150
d'arrêt	- 7	150 - 200	(dépôt) ~ 4	(dépôt) 150 000	20 à 25	100 - 250

Tableau 8 : Principales caractéristiques de l'avalanche de Montroc

Chapitre 5 : Conclusions

5.1 Conditions de réalisation de la CLPA

A la suite de l'avalanche catastrophique de Val-d'Isère (39 morts) en 1970, l'une des préconisations de la commission interministérielle Saunier fut le recensement des zones avalanches et l'établissement d'une « carte inventaire des avalanches, officielle, dressée selon une méthode scientifique, ayant un caractère indicatif pour les particuliers, mais dont l'observation s'imposera à tous ». Financée en grande partie par l'Etat, réalisée sous la responsabilité du ministre chargé de l'Agriculture, la « carte de localisation probable des avalanches » (CLPA) fut mise en chantier dès l'automne 1970. Ce fut la division Nivologie du CERAFFER (devenu depuis le Cemagref), nouvellement créée, qui en assumait la réalisation en liaison avec l'Institut Géographique National (IGN). Dès son origine, l'objet de la CLPA est de constituer un inventaire (évolutif) des zones pour lesquelles on a recueilli des témoignages d'événements avalanches ou bien des zones avalanches d'après une analyse par photo-interprétation et/ ou enquête. Ni l'ampleur, ni la fréquence des phénomènes ne sont indiquées dans la CLPA. En aucun cas, il ne s'agit d'un plan de zonage du risque d'avalanche. Si la CLPA est un document technique officiel à l'usage des collectivités locales, des services de l'Etat, et des aménageurs, elle ne peut être opposée aux tiers en l'état. C'est un document public, consultable en mairie.

Dans la vallée de Chamonix, la réalisation de la CLPA a commencé en 1971. Cette commune fut l'une des premières à se munir de son propre chef de cartes d'avalanches, principalement dans une perspective d'aménagement de la vallée : une première carte d'aléa avait déjà été dressée en 1945, puis une seconde dans les années 1960. A ses débuts la CLPA a été considérée par les habitants avec beaucoup de circonspection parce que réalisée par des agents de l'Etat, extérieurs à la vallée. Ces agents gardent le souvenir des nombreuses difficultés rencontrées dans la collecte des informations en raison des enjeux économiques. C'est ainsi qu'un grand nombre de secteurs de la vallée de Chamonix ont été indiqués en tirets sur cette CLPA, c'est-à-dire que des informations suffisamment précises n'ont pas pu être obtenues ou sont issues de renseignements non recoupés ou contradictoires.

Pour Montroc, dans la version de 1972 de la CLPA, seule la partie basse du site (entre 1800 et 1400 m) est représentée comme avalancheuse selon l'enquête de terrain : l'emprise extrême de l'avalanche n° 1 (reportée en magenta) remonte légèrement sur l'adret, mais reste assez loin de l'actuelle route (à une cinquantaine de mètres environ). La partie haute du site (entre 1800 et 2400 m) est considérée avalancheuse uniquement d'après le résultat de la photo-interprétation.

Une seconde (et dernière) édition datée de 1991 (diffusée en 1992) a bénéficié du travail d'une nouvelle enquête de terrain durant l'année 1990. L'emprise de la zone en magenta a sensiblement augmenté puisqu'elle remonte maintenant l'adret au-delà la route et vient toucher l'emprise des avalanches du couloir n° 11 descendant de la montagne des Posettes. Cette modification a surtout été fondée sur la prise en compte d'un témoignage écrit, celui du guide Armand Charlet, relatant une avalanche majeure en février 1945. Dans la partie supérieure, entre 1900 et 2400 m, une zone de départ a également été reportée en magenta, mais la zone de faible pente, entre 2100 et 1800 m, liaison entre parties haute et basse du site est restée en tirets orangés, c'est-à-dire que le cartographe n'ayant pu obtenir confirmation de cette jonction, a maintenu la zone intermédiaire comme présumée avalancheuse d'après la photo-interprétation. Les renseignements contenus dans l'EPA ne permettent pas toujours de connaître avec un bon degré de confiance les limites de la zone d'arrêt : l'incertitude existant parfois sur les limites haute et basse indiquées dans cette enquête ne permet pas d'en déduire automatiquement des contours suffisamment précis pour être reportés sur la CLPA. En particulier, dans le cas de Montroc, les cotes approximatives fournies et

l'absence de géo-référenciation des dépôts observés ne sont pas directement utilisables pour obtenir l'enveloppe des avalanches du couloir n° 1 dans la zone d'arrêt. Les données du carnet forestier ont néanmoins incité à retenir le témoignage d'Armand Charlet pour la CLPA, en dépit des critiques formulées à son égard.

Il faut souligner que le recours à des archives est à cet égard une des difficultés rencontrées dans l'exécution de l'enquête de terrain lors de la réalisation des CLPA, notamment leur consultation nécessite parfois un travail de longue haleine, hors de portée actuellement des procédures de réalisation de la CLPA.

5.2 L'avalanche du 9 février 1999 à Montroc

5.2.1 Les conditions de déclenchement

L'avalanche de Montroc s'est déclenchée naturellement à environ 14h40 sous le Bec de Lachat. Son départ est consécutif aux fortes chutes de neige qui se sont succédées depuis la fin du mois de janvier : les précipitations neigeuses commencent le 26 janvier et sont assez importantes (150 cm de cumul au Tour en 4 jours) ; elles sont suivies d'une courte période sans précipitations mais très ventée. Les précipitations reprennent le 5 février en soirée et se poursuivent quasiment sans discontinuité jusqu'au mardi 9. Les chutes de neige sont soutenues, accompagnées de forts vents et de températures froides. Le cumul atteint 225 cm au Tour, 180 cm à Vallorcine, 140 cm à Chamonix en 5 jours. Les différentes méthodes statistiques employées montrent que la période de retour d'un tel épisode neigeux est de l'ordre de 5 ans au Tour en termes de cumul, mais avoisine 35 ans à Chamonix. Sur la haute vallée de Chamonix, les chutes de neige sont très importantes mais sans réel caractère exceptionnel. Notons à ce stade que la durée de retour de la situation météorologique n'est pas uniquement déterminée par la durée de retour des précipitations, mais doit également tenir compte de l'effet d'autres grandeurs (vent, température), qui est souvent difficilement quantifiable dans ses effets sur le manteau neigeux d'une zone de départ donnée ; à cet égard, il faut souligner que l'une des particularités des précipitations neigeuses du 5 au 9 février 1999 sur la vallée de Chamonix est leur caractère très continu. De ce point de vue, l'épisode du début février possède un caractère beaucoup plus remarquable que ne le laisse entrevoir le simple critère de 'cumul de neige'.

L'avalanche de Montroc du 9 février est concomitante d'une série d'avalanches dans toute la vallée, puisqu'en tout ce sont quelque seize avalanches qui ont été observées le même jour dans les principaux couloirs suivis par l'EPA. L'activité avalancheuse a été généralisée à tous les versants de la vallée quelle que soit leur orientation. Cela suggère que les déclenchements sont principalement dus à des ruptures spontanées au sein du manteau neigeux sous l'effet de la surcharge provoquée par les précipitations des jours précédents. Un facteur aggravant a dû être la présence d'une épaisse couche de neige sans cohésion à la base du manteau neigeux, qui a pu être facilement entraînée par les avalanches et ainsi augmenter significativement leur volume.

5.2.2 Descriptif de l'avalanche

L'avalanche est partie sous le cirque du Bec de Lachat vers 2430 m d'altitude. L'épaisseur moyenne était de 1,5 m à la cassure avec une neige très froide et relativement légère (moins de 150 kg/m³). C'est toute la partie supérieure du manteau neigeux correspondant aux dernières chutes de neige (du 5 au 9 février) qui est partie. La cause de ce départ se trouve soit dans la surcharge de neige fraîche, soit dans l'effet détonateur d'une petite plaque latérale. À la sortie de la zone de départ, le volume de la neige entraîné dans l'avalanche avoisinait sans doute les 100 000 m³. Compte tenu de la faible cohésion du manteau neigeux, il est assez vraisemblable que l'avalanche ait encore incorporé beaucoup de neige durant son parcours, notamment sous la rupture de pente entre 1800 et 1400 m.

Le comportement dynamique de l'avalanche a été reconstitué à partir d'une analyse experte et de simulations numériques. Sur la montagne de Péclerey, le flux rapide de neige sèche et légère s'est écoulé à proximité du sol, s'est ralenti et s'est étalé assez largement en rive droite : dans une trajectoire plus rectiligne une grande partie de la masse s'est dirigée vers le couloir n° 1, directement sur Les Poses de Montroc, tandis qu'une part significative a emprunté le couloir n° 2 de la CLPA, et même au-delà, en direction du hameau du Tour. Ensuite, l'avalanche a été fortement influencée par la brutale rupture de pente vers la cote 1800 m. L'accélération, la mise en suspension et l'incorporation de neige ont été significatives dans le couloir du Grand Lanchis, entre 1800 et 1400 m. L'écoulement a alors été vraisemblablement multiforme. Sur ce tronçon (au-dessous de 1800 m), il devait présenter des caractéristiques à la fois d'avalanche coulante (couche dense de quelques mètres, centre de gravité proche du sol) et d'aérosol (grande vitesse, partie supérieure turbulente et très légère). La puissance de l'avalanche a été considérable, avec sans doute des pressions moyennes de l'ordre de 70 kPa (7 t/m² environ), pour avoir un effet aussi destructeur : sur les 20 chalets atteints, 14 ont été entièrement détruits (qu'ils soient construits en bois ou en béton). Douze personnes ont trouvé la mort dans cette avalanche. Incontestablement, l'impact très violent de l'avalanche fut exceptionnel, sur une emprise étendue de façon surprenante.

Les autres avalanches de la crue avalancheuse du 9 février 1999 ont également eu un comportement assez remarquable. Ainsi, sur les 16 couloirs de l'EPA concernés, 7 avalanches ont eu une emprise qui débordait de l'enveloppe reportée dans la CLPA de 1991. Certaines d'entre elles (comme l'avalanche de l'Eglise de Vallorcine, celle de Tacconnaz) ont eu des trajectoires inhabituelles. La crue du 9 février 1999 fait partie des crues marquantes de ce siècle, mais elle n'arrive pas au niveau des crues catastrophiques de 1914 ou 1923. Elle est à rapprocher de celle survenue en 1978 tant par son ampleur, que par les conditions nivo-météorologiques qui lui ont donné naissance. C'est, à notre connaissance, la crue la plus meurtrière qu'ait connue la vallée de Chamonix.

Nous avons cherché à cerner la fréquence de la crue avalancheuse et de l'avalanche de Montroc. En tout, depuis le début du siècle, la vallée (considérée sur les trois communes de Vallorcine, Chamonix-Mont-Blanc, et les Houches) a connu 16 crues d'ampleur, dont 5 ont affecté le couloir de Péclerey au-dessus de Montroc. La période de retour est estimée à quelques dizaines d'années pour la crue avalancheuse et l'avalanche de Montroc. **Il s'agit d'évaluations grossières**, car contrairement aux précipitations neigeuses, aucune méthode statistique « objective » ne peut pour l'heure être mise en œuvre pour étayer ce calcul et la chronique des événements enregistrés (surtout sur le site de Montroc) est trop peu étendue et lacunaire pour qu'on puisse apporter plus de précision sur la période de retour.

Notons aussi que si, en termes de volume mobilisé, l'avalanche de Montroc n'a sans doute pas de caractère exceptionnel (si l'on retient une période de retour comprise entre 20 et 30 ans), les spécialistes ayant participé à ce rapport ont tous été frappés par la dénivelée remontée par l'avalanche durant sa phase d'arrêt et son pouvoir destructeur, plus particulièrement pour le secteur au-dessus de la route du Tour. De telles caractéristiques sont plutôt inhabituelles pour une avalanche de cette taille, en tout cas sans commune mesure avec ce que la fréquence des précipitations ou de la crue avalancheuse aurait pu laisser présager.

5.3 Le retour d'expérience

Les avalanches, comme de nombreux autres phénomènes naturels, arrivent toujours à nous surprendre, parfois tragiquement. Il faut donc rester humble et se préparer à de nouveaux étonnements. Lors de l'évaluation des risques, le principe de précaution doit rester en garde-fou. Mais, enfermée entre une appréciation encore assez subjective de l'aléa et une pression économique croissante, l'analyse du risque peut se révéler ponctuellement encore incomplète :

Comment peut-on améliorer le zonage, la prise en compte du risque, la définition de travaux de protection, l'anticipation et la prévision ? A l'image du risque d'inondations en plaine, il nous apparaît utile d'arriver à formuler plus clairement (et à réglementer le cas échéant) la notion de risque sur un certain nombre de critères objectifs.

Ne pourrait-on pas réfléchir par exemple :

- à indiquer des valeurs guides pour les fréquences de retour à considérer pour les aléas (100 ans comme l'usage français en général ou 300 ans comme la directive suisse ou 1000 ans comme les règles norvégiennes), éventuellement fonction du type d'enjeu (habitat, école, hôpital, services de secours, etc) ;
- ou à afficher le risque résiduel après les travaux de protection ?

Par ailleurs, dans ce rapport, il n'a pas toujours été possible de donner des réponses tranchées, unanimes, et fondées scientifiquement alors même que des moyens importants d'investigation ont été mis en œuvre. Par exemple, les causes de déclenchement, le décalage entre période de retour des cumuls de neige et caractère exceptionnel de la crue avalancheuse, la nature précise de l'écoulement dans sa dernière phase d'écoulement, tous ces points sont abordés et des éléments de réponse rationnels ont été donnés, mais l'incertitude reste grande par défaut de connaissance scientifique sur les aléas. Le développement de la science correspondante reste encore aujourd'hui à poursuivre.

Remerciements

Cette expertise a bénéficié de l'aide de nombreux organismes et personnes. Nous remercions plus particulièrement :

- la mairie de Chamonix-Mont-Blanc et notamment Jean-Marc Bonino pour la fourniture des cartes et des renseignements divers ;
- le peloton de Gendarmerie de Haute Montagne de Chamonix en la personne de l'adjudant-chef Trousselier pour son précieux concours ;
- l'association des Amis du Vieux Chamonix, notamment René Simond, pour le libre accès à leurs archives ;
- le fond Payot des Archives départementales de la Haute-Savoie pour la consultation des archives, et plus particulièrement madame Brigitte Pélissier ;
- messieurs René Arpin, Charles Gardelle, Peter Borggaard, René Ducroz, madame Anne-Marie Granet Abysset ;
- Yves Cassayre pour sa première relecture du document.

Cette expertise a été réalisée collectivement par :

- Ancey Christophe, Cemagref (ETNA), chef de projet ;
- Borrel Gilles, Cemagref (ETNA) ;

aidés de :

- Brunot Gilles, Météo-France (CDM Chamonix) ;
- Coléou Cécile, Météo-France (CEN) ;
- Guirado Florence, Cemagref (ETNA) ;
- Martin Eric, Météo-France (CEN) ;
- Naaïm Mohamed, Cemagref (ETNA) ;
- Rapin François, Cemagref (ETNA) ;
- Revol Philippe, Cemagref (ETNA).

Ont apporté leur aide à la préparation de document :

- Escande Sébastien, Cemagref (ETNA) ;
- Gay Françoise, Cemagref (ETNA) ;
- Girier Martine, Cemagref (ETNA) ;
- Taillandier Jean-Michel, Cemagref (ETNA) ;
- Ricard Michel, Cemagref (ETNA) ;
- Strazzeri Dominique, Cemagref (ETNA).

Ont relu ce document, avant la mise au point de cette version définitive :

- François Lacroix, Cemagref (ETNA),
- Maurice Meunier Cemagref (ETNA),
- Laurent Bélanger Cemagref (ETNA).
