

” Il est vraisemblable qu'on approche la limite technologique de ce que nous sommes capables de faire. ”

# Avalanche de l'Arcelle

Dans l'après-midi du 16 avril 2009, une avalanche s'est produite dans le cirque de l'Arcelle. Elle a coupé deux pistes de ski du domaine de Val-Cenis-Vanoise. Cet article revient sur les circonstances et les conséquences de cet événement exceptionnel.

**Christophe ANCEY**  
professeur à l'École Polytechnique  
Fédérale de Lausanne  
et consultant chez Toraval

## Site

Le site de l'Arcelle est un vaste versant qui s'étire du Signal du Mont-Cenis (3 377 m) jusqu'à la rive gauche de l'Arc (1 470 m) à Lanslevillard (Savoie). La ligne de crête longue d'environ 1,8 km dépasse les 3 000 m d'altitude. L'orientation générale est au nord-ouest, mais certains panneaux du cirque sont exposés différemment. Le site est connu pour son activité avalancheuse. Des avalanches coulantes exceptionnelles comme celle de mai 1983 peuvent atteindre l'Arc ; le haut du site a également été à plusieurs reprises balayé par des aérosols plus ou moins puissants et des avalanches coulantes rapides.

C'est ce caractère avalancheux qui a longtemps été un frein à l'équipement du secteur. Les responsables de la station s'étaient donné plusieurs saisons d'observation pour déterminer la meilleure

façon d'aménager le secteur. Un lanceur pneumatique (avalancheur) a été installé durant l'hiver 1997-98 afin de tester les pentes de l'Arcelle. À l'automne 2000, plusieurs gazex ont été disposés dans tout le cirque pour protéger les nouvelles pistes de ski.

## Conditions météorologiques

La saison 2008-09 a été particulière sur le plan nivo-météorologique. La position stable, mais anormale des centres dépressionnaire et anticyclonique sur l'Atlantique nord a permis la succession de retours d'est, où de l'air humide venant de Méditerranée remontait vers les Alpes, où il rencontrait un courant polaire, ce qui générerait des chutes de neige localement abondantes sur toute la chaîne frontalière. Les températures sont restées durablement froides, même si elles n'ont pas atteint les records enregistrés en

2006. L'enneigement a été globalement très bon, voire exceptionnel sur certains secteurs. Une activité avalancheuse de grande ampleur a été observée dans les massifs méridionaux et le long de la chaîne frontalière en décembre 2008 ; dans le cirque de l'Arcelle, une avalanche avec une composante en aérosol a causé des dommages mineurs à la gare de départ du télésiège de l'Arcelle (2 320 m).

L'hiver s'est passé assez tranquillement sur Val-Cenis, avec des chutes de neige assez régulières et des températures froides. Au début du mois d'avril, des conditions anticycloniques se sont maintenues plusieurs jours sur les Alpes, avec des températures moyennes plus élevées que la normale et l'isotherme 0 °C oscillant entre 2 500 et 3 000 m d'altitude. Les nuits claires ont favorisé le regel de surface du manteau neigeux, tandis qu'une activité avalancheuse modérée (essentiellement des coulées de neige humide) était observée durant les fins de journée. Lors du week-end de Pâques (11-13 avril 2009), une situation de barrage s'est installée, causant parfois de fortes chutes neiges sur la chaîne frontalière. Celles-ci sont toutefois restées modérées sur Val-Cenis (voir figure 1). Le lundi de Pâques, la situation est redevenue globalement anticyclonique sur les Alpes, mais une dépression secondaire était en train de se creuser sur la Méditerranée. Le mercredi 15 et le jeudi 16 avril, une situation de foehn concerna les chaînes frontalières ; la limite des chutes de neige se situa autour de 2 000 m et descendit jusque vers 1 500 m en fin d'épisode (matinée du 16 avril). Sur Val-Cenis, cet épisode a amené environ 30 cm de neige à 2 000 m, sans doute 40 à 50 cm de neige en altitude. Malgré ces chutes de neige, le manteau neigeux à 2 000 m avait déjà commencé sa fonte printanière. Pour la journée du 16 avril, Météo-France annonçait un risque 3 (évoluant en 4 durant l'après-midi), ce qui est le cas le plus souvent en cette saison après des chutes de neige et des oscillations de l'isotherme 0 °C.

## Circonstances de l'avalanche

Le service des pistes a conduit des opérations de déclenchement préventif dans le cadre du plan d'intervention pour le

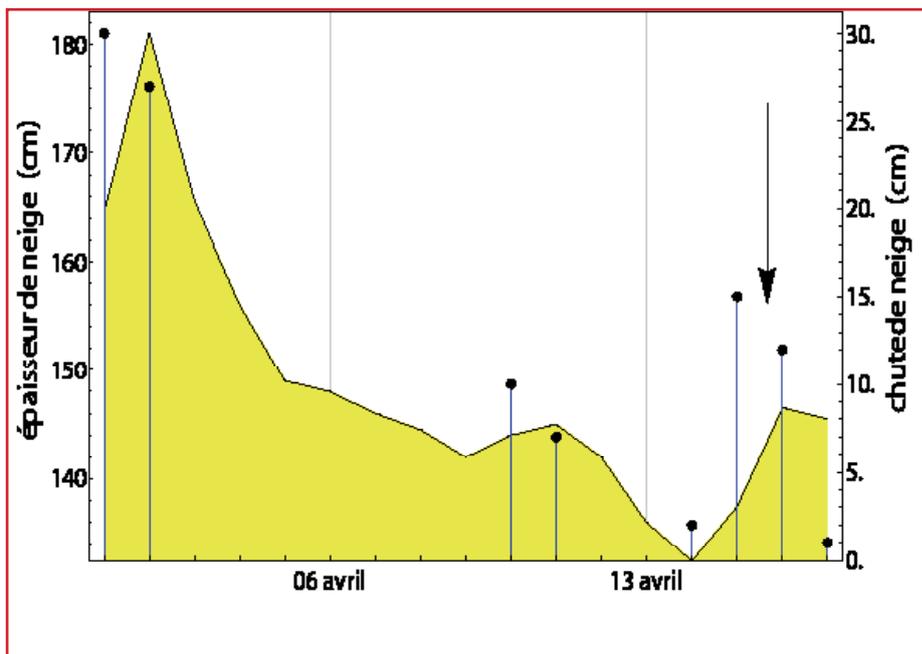


Figure 1 : chronologie des chutes de neige sur le poste du Vieux Moulin (1970 m) pendant le mois d'avril 2009. On a reporté les chutes de neige journalières (points) et l'évolution de l'épaisseur du manteau neigeux (courbe). La flèche indique la date de l'avalanche.

déclenchement des avalanches (PIDA) après les chutes de neige du 15 et 16 avril au matin. Les artificiers ont d'abord tenté de procéder à des tirs sur tout le secteur de l'Arcelle à l'aide des gazex, mais compte tenu de la défaillance de l'un des Gazex sous la pointe de la Nunda, ils ont décidé de compléter les tirs en lançant deux flèches explosives avec l'avalancheur situé à l'entrée du cirque (2 400 m). Ces flèches sont tombées dans le haut du cirque et n'ont pas donné lieu à des départs d'avalanche. Les tirs ayant été négatifs, le service des pistes a ouvert le domaine skiable et les remontées mécaniques sur tout le domaine d'altitude. L'avalanche de la Nunda est partie naturellement en tout début d'après-midi (vers 13 h 15). C'est le seul événement survenu sur le domaine skiable d'après les artificiers ; aucune autre avalanche d'ampleur n'a été signalée ce jour-là en Maurienne ou dans les Alpes (en particulier aucun accident n'a concerné des skieurs en hors-piste ou ski de randonnée). La seule activité avalancheuse d'ampleur sur l'ensemble des Alpes françaises et suisses a eu lieu le 13 avril (plusieurs départs d'avalanche dus à des passages de skieurs se sont produits ce jour-là, avec en particulier, une avalanche à la Pointe



Dessins : Alexis NOUAILLAT

Joanne, Queyras, faisant trois morts et une avalanche à la pointe des Montets, Vanoise, à la limite du domaine skiable de Val d'Isère, sans faire de victime).

Dans la partie supérieure du cirque de l'Arcelle, le manteau neigeux était typique d'un manteau neigeux froid de haute altitude tel qu'on le rencontre dans les versants nord au printemps. La température était largement négative sur une grande

profondeur du manteau neigeux tandis que près de la surface, la teneur en eau liquide était faible. Il ne présentait pas de structure évidente qui puisse laisser présager une quelconque instabilité (couche fragile, faible cohésion, etc.). La figure 2 montre le profil stratigraphique réalisé cinq jours après l'avalanche dans la zone de départ ; aucun sondage n'a été réalisé dans la zone de dépôt (entre 2 200 et 2 300 m), mais compte tenu des différences d'ensoleillement et de pente, il est clair que le manteau neigeux y était caractéristique d'un manteau neigeux printanier, composée en partie de neige humide (grains ronds).

Dans le ravin sous la pointe de la Nunda (3 023 m), une plaque est partie à l'altitude approximative de 2 700 m. L'épaisseur de la cassure était d'environ un mètre. L'avalanche a sans doute mobilisé toute la neige récente accumulée depuis le début du mois ; la croûte de regel a dû servir de plan de glissement. Notons que la ligne de fracture était assez complexe et torturée, ce qui tend à indiquer qu'il ne s'agissait pas d'une rupture typique de neige froide, où la fracture se propage plus ou moins linéairement et quasi ins-

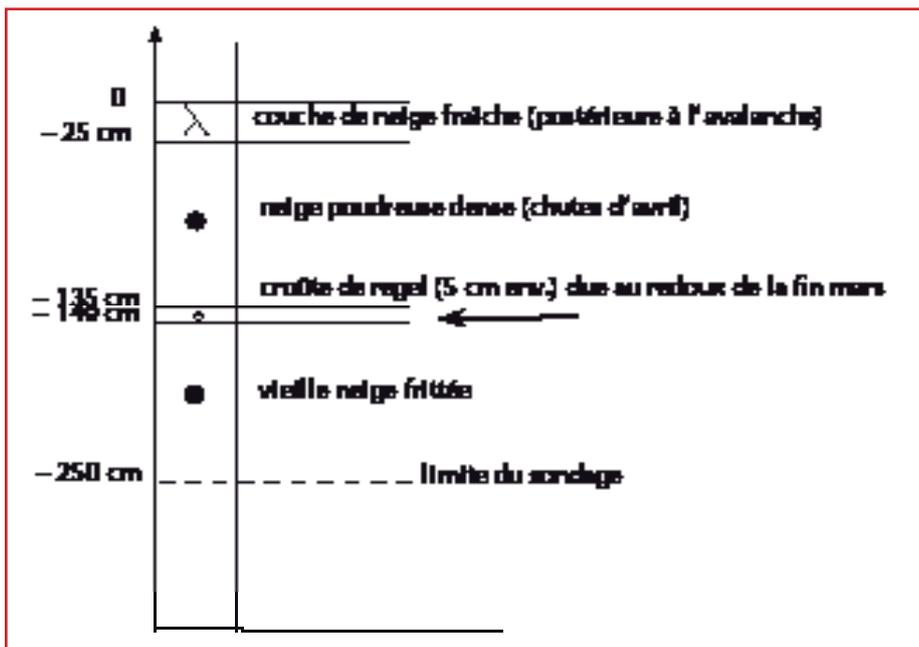


Figure 2 : sondage stratigraphique réalisé le mardi 21 avril 2009 à 2 750 m, à l'amont immédiat de la ligne de fracture (vers 2 700 m) de l'avalanche du 16 avril.

tantamment sur de grandes distances. La figure 3 offre une vue d'ensemble du cirque de l'Arcelle après l'avalanche et la figure 4 montre la principale zone de départ sous la pointe de la Nunda. Une explication du départ de l'avalanche

pourrait être la suivante :

➤ des chutes de neige soutenues se produisent entre la journée du 15 et le matin du 16 avril, amenant environ 40 à 50 cm de neige fraîche en altitude (30 cm à 2 000 m) ;

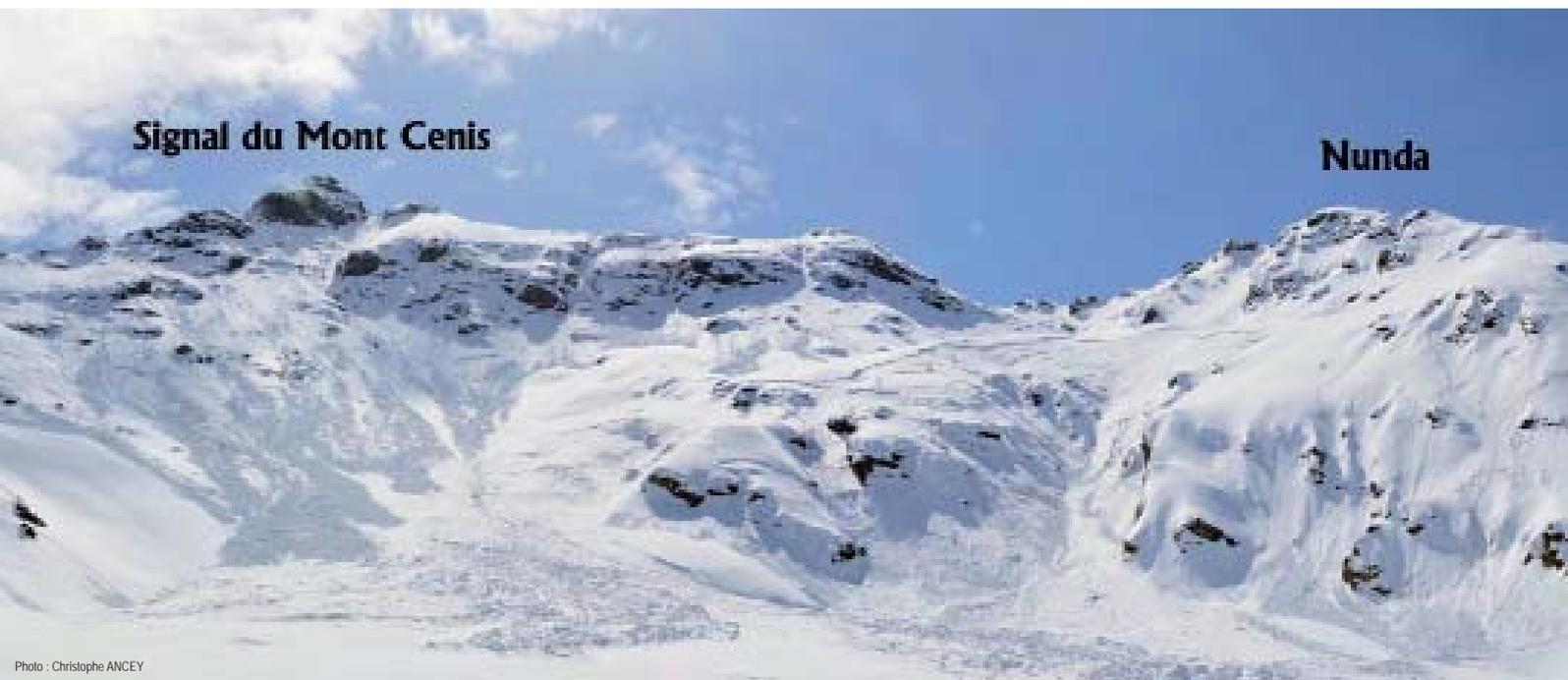


Figure 3 : vue du cirque de l'Arcelle. Le départ principal s'est fait au-dessus du ravin de la Nunda (sur la droite du cliché). Photographie réalisée le 21 avril 2009. Photo Christophe ANCEY.

☛ le mauvais temps s'évacue doucement, mais malgré la nébulosité, le rayonnement solaire est suffisant pour provoquer un réchauffement de l'air et des couches de neige ;

☛ tôt dans la matinée, la neige dans le secteur de la Nunda (orienté au nord) se présente sous la forme d'une neige poudreuse avec une faible cohésion de feutrage. Les déclenchements préventifs avec l'avalancheur sont négatifs, même si vraisemblablement de petites coulées ont dû se produire. La faible cohésion ne permet pas la propagation de fracture ;

☛ en début d'après-midi, la poudreuse commence à s'alourdir du fait du rayonnement solaire indirect. Il est vraisemblable que compte tenu de l'altitude à laquelle se situe l'isotherme 0 °C (autour de 2 500 m), une très faible quantité d'eau liquide (quelques dixièmes de pour cent) soit apparue, ce qui peut expliquer un accroissement sensible de la cohésion de la neige (nécessaire à la propagation de ruptures sur une grande distance) avec, en parallèle et assez paradoxalement, une réduction de la résistance au cisaillement ;

☛ une coulée (ou plusieurs) partie des panneaux raides sous la pointe de la Nunda sert de détonateur : elle grossit en mobilisant de la neige fraîche et parvient à franchir la zone en pente douce vers 2 750 m d'altitude. Le flux de neige arrive alors dans les ravins sous la pointe de la Nunda et accélère tout en mobilisant de la neige récente. Une première fracture se produit vers la cote 2 700 m, ce qui permet la mobilisation de toute la neige récente. Compte tenu de la forme de la cassure, on peut imaginer que la rupture s'est produite par traction du manteau neigeux, comme une couverture en glissement qui vient à se rompre sous l'effet de la traction. La mise en mouvement de la neige de surface entraîne une seconde couche, qui correspond à toute la neige au-dessus de la croûte de regel (voir figure 2) ;

☛ il est vraisemblable que le déroulement soit complexe, avec une avalanche s'écoulant en vagues successives. Dans le ravin, l'avalanche mobilise la neige récente, un peu plus humide. La première vague a dû être assez rapide et aller assez loin jusque dans le lit de l'Arcelle Neu-



Photo : Christophe ANCEY

Figure 4 : vue de la zone de départ de l'avalanche du 16 avril 2009. Sur la droite, on voit l'un des gazex de la Nunda. Cliché pris depuis hélicoptère le 21 avril 2009.

ve vers 2 200 m d'altitude. Les vagues suivantes sont plus lourdes (mobilisant de grandes quantités de boules de neige) et lentes. Elles parviennent néanmoins à creuser leur chenal d'écoulement dans le dépôt meuble de la première vague.

L'avalanche a immobilisé l'essentiel de sa masse entre la piste de l'Arcelle à mi-versant (vers 2 380 m) et la piste des Rhodos dans le bas du versant (vers 2 250 m). Une faible partie a pu continuer son chemin dans le ravin de l'Arcelle Neuve. Sur la base des événements observés depuis les années 1980, on peut

tirer les éléments suivants :

- ☛ l'avalanche du 16 avril 2009 est le plus gros phénomène naturel observé depuis 1988 ;
- ☛ il semble dépasser le phénomène de février 1988 en termes de volume mobilisé et d'emprise ;
- ☛ l'emprise des zones de départ et de dépôt est bien plus étendue que ce que le service des pistes a l'habitude d'observer sur le site depuis la mise en place du PIDA (à l'automne 2000) ;
- ☛ la superficie de la zone de dépôt est de 7 ha environ, ce qui suggère un



volume déposé voisin de 200 000 m<sup>3</sup> et des hauteurs de dépôt de plusieurs mètres. La période de retour du phénomène est grande, de l'ordre de 20 à 30 ans. La figure 5 montre l'emprise de l'avalanche.

## Opérations de secours

Les opérations de secours ont été mises en œuvre avec une grande rapidité. Des pisteurs, un peloton de gendarmes, des CRS, et sept équipes cynophiles ont sondé la zone de dépôt durant tout l'après-midi (voir figure 6). Par chance, aucun skieur n'a été emporté par l'avalanche. Les opérations de secours ont été arrêtées en fin d'après-midi.

## Quelles leçons en tirer ?

Un événement exceptionnel est toujours l'occasion d'apporter des éléments nouveaux qui enrichissent notre compréhension et notre expérience des phénomènes



naturels. Examinons l'avalanche de l'Arcelle sous trois éclairages différents : celui de la compréhension naturaliste, celui de la gestion du domaine skiable, et celui du niveau de sécurité sur des pistes de ski.

L'avalanche de l'Arcelle du 16 avril 2009 étonne à plus d'un titre :

- le manteau neigeux était globalement stable. C'est la seule avalanche (ou coulée) qui se soit produite sur tout le domaine skiable le 16 avril 2009 et c'est le seul accident reporté ce jour-là ou les jours suivants/précédents en France ou en Suisse ;

- deux tirs préventifs à l'avalancheur avaient été réalisés dans le cadre du PIDA et n'avaient donné lieu à aucune avalanche dans le versant nord de la Nunda ;

- le phénomène a pu gagner de l'ampleur parce qu'il y a eu un fort entraînement de neige. À bien y réfléchir, cela n'est peut-être pas aussi évident. Le versant nord de la Nunda est une zone traitée dans le cadre d'un PIDA, donc avec des avalanches régulièrement déclenchées et un tassement plus important du manteau neigeux dans le bas du versant. Même si l'isotherme 0 °C était assez haute et la fonte du manteau neigeux assez rapide en cette mi-avril, la teneur en eau du manteau neigeux en partie haute du

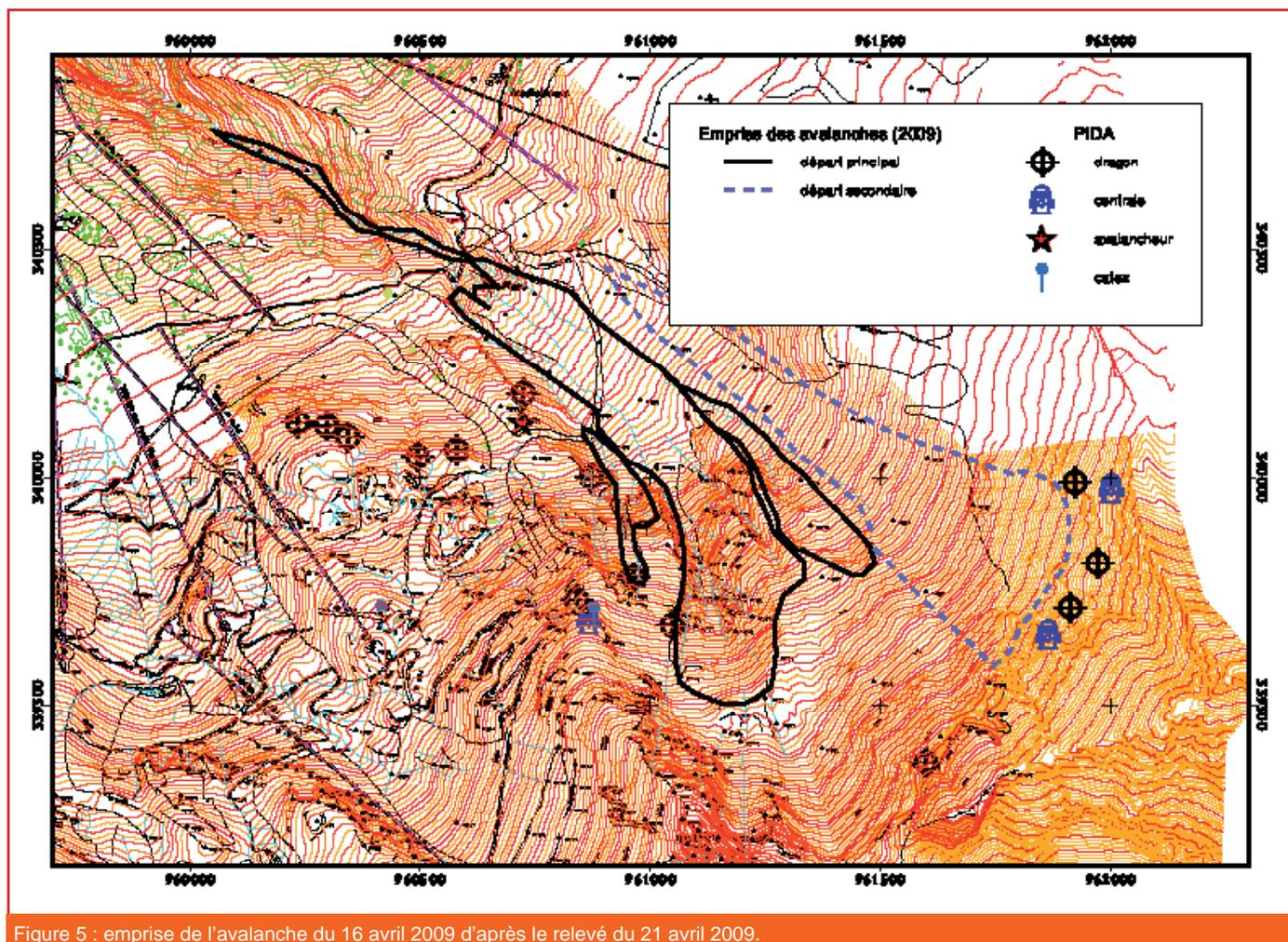


Figure 5 : empreinte de l'avalanche du 16 avril 2009 d'après le relevé du 21 avril 2009.

versant de la Nunda était encore limitée et elle ne peut donc être un facteur fort d'instabilité qui aurait pu expliquer une érosion aisée du manteau neigeux dans les goulets et pentes sous la Nunda.

Des départs spontanés d'avalanche après des tirs négatifs sont nombreux au printemps lorsque la température du manteau neigeux atteint 0 °C sur toute son épaisseur ; l'augmentation de la teneur en eau liquide est un facteur significatif du risque d'avalanche au printemps. Toutefois, dans le cas présent, le manteau neigeux était encore constitué de neige froide. Quoique rares, des déclenchements de grande ampleur ont été rapportés pour des manteaux neigeux en neige froide « stabilisés ». Ainsi, l'avalanche de la combe du Pra en avril 1987 a tué un gendarme dans la combe nord de la dent du Pra. Il évoluait à skis (de randonnée) dans le bas de la combe nord du Pra. L'avalanche a vraisemblablement été déclenchée par un morceau de corniche tombé depuis la cime de la Jasse ; la rupture de corniche a mis en mouvement une énorme plaque de neige froide large de 350 m vers 2 350 m d'altitude. L'enquête de Météo-France a montré l'existence d'une croûte de regel surmontée d'une fine couche de grains à faces planes située à 180 cm de la surface du manteau neigeux.

Dans le cas présent, le PIDA et la prévision locale n'ont pas complètement rempli leur mission dans la mesure où une avalanche s'est produite. Sur la base des connaissances actuelles, il n'y a pas de moyen technique ou d'élément d'observation qui aurait pu alerter les pisteurs du danger. L'accident du 16 avril 2009 entre dans la catégorie des phénomènes exceptionnels tant par leur extension que par le caractère presque incongru de leur occurrence. L'événement a néanmoins poussé les responsables de la station à chercher à améliorer encore la sécurité sur leur domaine. Pour rendre redondants les systèmes de déclenchement et se donner plus de liberté dans le choix des points de tir, la station a acquis un système appelé Daisybell (commercialisé par le groupe MND), qui est un Gazex mobile transporté par hélicoptère. Elle a également formalisé la récolte des ob-



Figure 7 : équipe cynophile en action.-

Photo : © Service des pistes de Val-Cenis

servations réalisées par les pisteurs artificiers au cours de la journée ; l'accent est également mis sur une surveillance encore plus poussée des secteurs sensibles du domaine skiable au cours de la journée, avec à la clé une fermeture des pistes sur ces secteurs. Toutefois, avec le recul, on peut se demander si on aurait pu éviter un tel accident quels que soient les moyens employés... Il est vraisemblable qu'on approche la limite technologique de ce que nous sommes capables de faire en termes de prévision locale et de gestion du risque par déclenchement artificiel.

Enfin, beaucoup ont été frappés par la couverture médiatique de l'événement puisque l'accident est passé au journal télévisé des grandes chaînes nationales et a fait l'objet de nombreux articles dans la presse nationale et suisse. Contrairement à l'avalanche d'Anzère (Suisse) du 27 décembre 2009, où deux skieurs ont été emportés par une avalanche sur une piste de ski, il n'y a pas eu d'emballement médiatique avec une « recherche de responsabilité », sans doute parce qu'il n'y a pas eu de victimes. Les événements récents d'Anzère et de Val-Cenis permettent de réfléchir sur l'évolution de notre société : d'un côté, les responsables des pistes mettent normalement tout en œuvre pour assurer la protection des usagers contre les avalanches (ils remplissent donc leur

» **Le niveau de sécurité doit également rechercher un bon compromis entre le coût de la protection, le coût probable des dommages en cas de défaillance, et la faisabilité technique.** »

« obligation de moyens » selon l'expression juridique consacrée). De l'autre côté, les clients des stations considèrent qu'ils payent pour que leur sécurité soit garantie (demandant implicitement par là une « obligation de résultats »). Sur le plan technique, la problématique se pose différemment : comme pour tout système technologique, *a fortiori* placé dans le milieu naturel, le niveau de sécurité doit également rechercher un bon compromis entre le coût de la protection, le coût probable des dommages en cas de défaillance, et la faisabilité technique. S'il est souvent techniquement et économiquement possible d'assurer un bon niveau de protection des pistes de ski, il peut devenir très difficile techniquement de garantir un taux nul de défaillances des tirs. ■