

Détermination automatique des zones de départ d'avalanches Projet PGRN 2006

vincent douzal
Cemagref, UR Etna ; UMR Tetis

14 avril 2008

Résumé

Le zonage du risque d'avalanches s'appuie aujourd'hui sur des simulations de leur propagation. Mais la détermination des zones de départ reste une opération manuelle, qui peut être critique pour les conclusions. On propose de déterminer les zones de départ en appliquant à un modèle numérique du relief des méthodes de traitement d'image, des filtres et des combinaisons entre plans images, en naviguant dans l'espace d'échelle.

Table des matières

1	Modéliser les zones de départ d'avalanches	3
1.1	Le zonage du risque d'avalanches, de l'expertise au calcul . . .	3
1.2	Le besoin d'un modèle de détermination automatique des zones de départ d'avalanches	5
1.3	Discussion des hypothèses et fondements des connaissances sur les zones de départ	6
1.3.1	L'intérêt que l'on porte aux avalanches tient essentiellement à la volonté de s'en prémunir	6
1.3.2	Un synoptique du déterminisme des avalanches	7
1.3.3	Les types d'avalanches : deux grands pôles phénoménaux	15
1.3.4	Les données sur les zones de départ	17
1.3.5	Stratégies de modélisation	27

2	Une approche des zones de départ par des méthodes de filtrage sur le relief	30
2.1	Méthode	30
2.1.1	Données (relief-météo)	30
2.1.2	Conditions imposées : développement sous ArcGIS . . .	32
2.1.3	Principe de la méthode et résultats	40
3	Travaux futurs et perspectives ouvertes par cette approche	52

Introduction

Le risque d'avalanches

Les avalanches de neige font en Europe peu de victimes et de dégâts, au regard d'autres phénomènes naturels ou accidentels, mais à fort impact traumatique, spécialement quand les atteintes sont portées dans l'habitat. S'installer hors de danger a toujours été une préoccupation des hommes, pour un simple campement [26], et a fortiori depuis qu'ils sont sédentaires. Historiquement, ils ont souvent toléré des dommages ou des dérangements épisodiques, par exemple, lors de crues, pour occuper des espaces par ailleurs favorables. Les occidentaux du 21^e siècle sont devenus très intolérants à des phénomènes comme le déferlement d'une avalanche sur leurs biens, et aux restrictions à occuper l'espace que de telles éventualités leur imposent. Ils s'étalent, et ne veulent plus bouger. Quant à la sensibilité aux questions d'équilibre naturel qui croît en occident depuis la fin du 20^e siècle, elle le dispute à peine à la priorité toujours accordée aux biens, vies, valeurs humaines : elle résulte de l'inquiétude d'un effet boomerang sur notre propre personne.

Simultanément, les hommes développent des activités de loisirs grandissantes, à la recherche en montagne de conditions extrêmes, de situations à risques, peut-être en quête des limites du possible, en tous cas retrouvant l'occasion de braver le danger qu'ils s'ingénient à éradiquer de leur quotidien.

Le zonage du risque d'avalanche et la détermination de leurs zones de départ

La zonage du risque d'avalanche consiste à délimiter sur le terrain les zones concernées par les avalanches, idéalement en auréoles de niveaux d'énergie, d'intensité, ou de gammes d'effets destructeurs, relatifs à un type d'événement extrême qui semble envisageable et sert de référence. Les tensions qu'entraîne

cet exercice sont croissantes, comme ce qu'on en exige en termes de garantie des réponses, et de transparence. On aimerait passer outre le danger pour aménager l'espace, mais simultanément être hors d'atteinte de phénomènes dangereux, en avoir des certitudes, et, lorsqu'on y est contraint, n'engager qu'un effort personnel minimal pour s'en garantir. En pratique, la recherche exacerbée de transparence est encore aujourd'hui tempérée par les processus de décision qui consistent aussi à organiser une opacité bien placée.

L'existence même d'une avalanche, son acte de naissance en quelque sorte, dépend de la possibilité d'initiation du mouvement d'une grande masse de neige dans certaines configurations de terrain. Son devenir dépend alors de la pente qui lui est offerte.

Or, si l'on dispose d'outils utilisables pour calculer ce devenir par simulation de propagation d'avalanches, si les chroniques et la connaissance en météorologie alpine permettent de cerner l'état de la couverture neigeuse, la détermination de la zone d'initiation du mouvement, cruciale pour définir l'extension d'une avalanche, reste à ce jour du ressort exclusif d'une appréciation humaine. Ce projet vise à se doter de moyens opérationnels et disponibles publiquement pour déterminer les zones de départ d'avalanches.

1 Modéliser les zones de départ d'avalanches

1.1 Le zonage du risque d'avalanches, de l'expertise au calcul

Conflictuel, le zonage est un exercice délicat, car malgré les progrès faits dans leur modélisation, les avalanches demeurent un phénomène complexe, multiforme, mal appréhendé. Les études de zonage ont été de longue date réalisées par un expert de la question. Cette pratique se maintient dans des cas conceptuellement simples, ou concernant des enjeux limités. Elle rencontre cependant des difficultés. Un expert peut au mieux délimiter la zone d'arrêt correspondant à une avalanche de référence choisie. Il est démuné pour envisager des événements d'ampleur sensiblement supérieure à ce qui a été observé, passé la platitude du « Ça doit bien pouvoir aller un peu plus loin » : l'expert est rompu à trouver les traces matérielles ou historiques d'événements passés, mais extrapoler le mouvement d'une avalanche progressant sur une surface topographique pour laquelle on n'a aucune référence de comportement est un saut dans l'inconnu. Il ne peut donner de quantifications comme une vitesse de passage en un point, ou un champ de pression. D'une façon générale, indiquer quelle sensibilité aurait la dynamique de l'avalanche à la variation d'un paramètre comme une fluidité accrue de la neige, ou la possibilité d'en

recruter des quantités supplémentaires le long du couloir relève de la gageure. C'est pourtant le type d'information recherché pour dimensionner des ouvrages ou fixer des limites d'occupation.

Chaque expert a sa propre façon de procéder, et, ce n'est pas indépendant, sa méthode n'est pas publique. En effet l'expertise commence au point où un avis ne peut plus être objectivé, justifié de façon communicable, transparente. Par nature, elle est donc peu reproductible. Ainsi les éléments que chacun des experts apporte ne peuvent être ramenés dans un référentiel commun, leurs divergences comme leurs accords sont difficiles à soumettre à une analyse critique, ce qui signifie que leur fiabilité ne peut être établie. Une expertise ne peut qu'être acceptée ou rejetée en bloc.

Le cœur de l'expertise réside là où seul l'expert comprend, et son jugement, rétif à l'analyse, relève plutôt de l'intuition, ou de l'art si on veut. D'ailleurs l'avis de l'expert prend toute sa valeur quand il n'y a plus que lui seul en mesure de juger une situation. Cela peut d'ailleurs lui donner la tentation d'obscurcir les voies de son raisonnement. Or, pour paraphraser Donald Knuth, la science est une connaissance que l'on comprend tellement bien que l'on peut l'expliquer à un ordinateur, et si l'on ne comprend pas complètement quelque chose, s'y confronter relève de l'art.

On peut appeler cela le cul-de-sac de l'expertise : un savoir incommunicable, qui ne peut devenir public — qui empêche de progresser dans un savoir culturel, c'est-à-dire partagé, publié, qui se transmettra. C'est une disposition somme toute assez rare de savoir articuler ses expériences sous une forme telle qu'elles deviennent un savoir qui peut être communiqué, appris par d'autres : de sortir d'un savoir-faire, d'une connaissance experte pour en venir à une connaissance objective.

Les études de zonage reposent donc encore de façon essentielle sur l'expertise d'un spécialiste. Mais les difficultés qui s'y attachent font qu'on recherche d'autres moyens de procéder, spécialement quand les enjeux sont importants.

Il est possible depuis plusieurs années d'utiliser des programmes de calcul de propagations d'avalanches, [19, 11] pour apporter des éléments objectifs à l'établissement d'un zonage.

Sur ces modèles de simulations d'*écoulements*, puisqu'ils sont construits d'après des méthodes de mécanique des fluides, on peut caler des paramètres internes de frottement au sein du fluide et sur le support, moyennant de leur fournir la topographie, les masses de neige mobilisables au départ et en cours de progression (épaisseur, densité), le dépôt dans la zone d'arrêt (masse, contour) — en fait ces données sont liées, la densité, souvent mal connue peut servir de variable d'ajustement, on procède à une optimisation raisonnée, équilibrée selon les inconnues de l'événement extrême simulé.

On reproduit ainsi assez fidèlement des avalanches documentées, à partir

desquelles on peut extrapoler des scénarios réalistes en prenant un voisinage de conditions initiales qui conduisent à des effets encore amplifiés. Pour n'être pas dépourvues d'incertitudes, ces simulations peuvent livrer des champs de vitesse et de pression, de façon objective, reproductible, que l'on peut soumettre à contradiction et qui peuvent servir de socle commun à toutes les démarches d'experts. Les sorties peuvent être cartographiques, et même développées sur la surface topographique, elles sont alors très expressives, faciles à confronter à des observations, à valider ou à infirmer. La restitution est faite directement dans l'espace de la carte où l'on veut réaliser un zonage.

Des études menées récemment en France [2, 18] semblent suggérer que près de 90% des événements avalancheux pourraient s'expliquer par corrélation aux précipitations cumulées des derniers jours, les trois derniers dans les Alpes du nord, les deux derniers dans les Alpes du sud. Elles rejoignent des convictions établies ailleurs [9]. Il semble également que ces 90% de cas doivent recouvrir largement les scénarios conduisant aux plus grandes avalanches possibles (encore que dans les deux cas, il y ait matière à controverse [2, p. 165] et que 90% soit très loin du genre de couverture que l'on vise, puisqu'on veut une sécurité durable). Ainsi, par référence aux statistiques météorologiques les plus représentatives du site, se trouve encadrée l'épaisseur du manteau neigeux — et comme il est récent, sa densité. D'une façon générale, des séries météorologiques d'une cinquantaine d'année sont disponibles en France qui permettent de produire des scénarios assortis de probabilités qualifiant la neige mobilisable notamment sur sa faculté de progression dans une avalanche.

1.2 Le besoin d'un modèle de détermination automatique des zones de départ d'avalanches

L'emploi de modèles déterministes de propagation des avalanches pour le zonage conserve donc un point d'indétermination majeur, la délimitation de zones de départ. Comme elles sont exceptionnellement observables, on n'en dispose pas de relevés, et il faudra les tracer aux dires d'un spécialiste. Typiquement il combinera quelques témoignages, des prises d'information *in situ*, une interprétation de photographies aériennes. Typiquement aussi, on ne saura pas sur quelles données il aura fondé sa réponse. Il aura consenti un investissement très variable suivant l'exigence de la situation. On retrouve donc les écueils d'objectivité, de reproductibilité, de transparence relevés plus haut, et en conséquence une grande difficulté à communiquer sur les contours des zones de départ, les discuter, en faire un objet de débat, de science.

Par ailleurs, une intervention manuelle même bien rodée pour tracer une zone sur une carte interdit toute systématisation à un grand nombre de

couloirs, ouvrant pourtant la possibilité d'études statistiques qui pourraient être riches en enseignements.

Un outil de détermination automatique des zones de départ d'avalanches est indispensable pour fournir des réponses reproductibles, fussent-elles imparfaites. Il est souhaitable qu'il soit fondé sur un modèle souple, permettant d'explorer de façon interactive les paramètres en jeu, d'en introduire de nouveaux et de confirmer ou invalider des intuitions ou des croyances, des résultats.

Différents essais de caractérisation automatique des zones de départ à partir d'une surface topographique ont été réalisés, sous l'impulsion de Laurent Buisson en premier en France [5, 4], par d'autres équipes ailleurs dans le monde, jusque récemment [15, 16, 31]. Cependant, aucune n'est opérationnelle pour être utilisée aujourd'hui en France, même dans un contexte de recherche.

1.3 Discussion des hypothèses et fondements des connaissances sur les zones de départ

1.3.1 L'intérêt que l'on porte aux avalanches tient essentiellement à la volonté de s'en prémunir

Ce constat est important car la connaissance d'un objet dépend entièrement des modes de relations que l'on entretient avec lui. C'est ce qui conditionne les types d'invariants qu'on est en mesure de conférer à la représentation qu'on s'en fait. Par exemple, on peut très bien connaître une automobile monoplace en tant que pur analyste de courses automobiles, mais elle sera faite de catégories très différentes pour celui qui la conduit aux limites de ses possibilités sur un circuit. Pour rester plus près de notre contexte, quand on a pratiqué l'escalade, on voit dans une paroi des choses très différentes, même de quelqu'un qui a passé une vie à en contempler. Chaque détail, chaque aspérité peut déclencher une catégorisation du genre : passage faisable ? pas faisable ?

Pour s'exprimer dans les termes à la mode dans le milieu des systèmes d'information, on dirait que la manière dont on s'intéresse à un phénomène détermine l'« ontologie » que l'on construira. Cette situation n'est évidemment pas spécifique aux avalanches, mais il est bon d'en être conscient car elle produit des biais. Par exemple, quand notre attention est confinée aux seules échelles d'avalanches susceptibles de nous mettre en danger, négligeant au passage un grand nombre de cas qui pourraient détenir une information bien utile à propos des premières. Cette façon particulière de prêter attention aux avalanches joue bien sûr pleinement quant aux dispositions que l'on prend à leur propos, infrastructures, organisation humaine et moyens de mesure, qui

découlent directement de motivations immédiates de sécurité, et adhèrent y étroitement.

1.3.2 Un synoptique du déterminisme des avalanches

1.3.2.1 Les avalanches, ce qu'elles sont (quelles sont les limites de la notion). Primairement, une avalanche consiste en une masse de neige dévalant une pente. En termes techniques plus recherchés, on appelle avalanche de neige la remise en mouvement rapide sous l'effet de la gravité d'une masse de neige préalablement sédimentée sur un support. Les spécialistes de la montagne s'efforcent de donner une taille minimale pour que l'on puisse parler d'avalanche, et préfèrent en deçà l'appellation de coulée, essentiellement par référence aux effets que cela peut avoir sur une personne, ou sur une construction.

Le terme avalanche véhicule aussi l'idée d'une réaction en chaîne, ou en cascade, pour lequel il est couramment employé en physique ou en chimie, et qui est tout à fait pertinent pour la neige. Il attire l'attention sur la continuité des mécanismes en jeu, quelle que soit l'échelle. Cette échelle peut aller d'une borne supérieure définie par la taille des supports naturels que sont les montagnes, jusqu'à une borne inférieure où les éléments considérés en jeu approchent l'ordre de grandeur de la taille du mouvement ; où disparaît la notion de chaîne d'effets.

C'est une des motivations pour, dans le cadre de cette étude, tendre à considérer continûment toutes les échelles possibles pour qualifier les formes propres à connaître des initiations d'avalanches. La multiplicité morphologique (phénoménologique) des manifestations recevant le nom d'avalanche de neige transcende en effet largement les différences de tailles, si importantes sur le plan pratique, et des effets qu'elles peuvent nous faire subir. Sur ce plan, et toujours dans l'optique du besoin de s'en protéger, on peut identifier deux situations contrastées :

- La pratique d'activités sur les montagnes enneigées amène à traverser de nombreux sites où notre passage pourra déclencher des avalanches qui, mêmes modestes, peuvent être dangereuses (mortelles). Au cours d'une randonnée, traverser ces sites est inévitable, c'est la morphologie de la montagne qui le veut — avec nos capacités de déplacement, et aussi bien sûr les buts des sorties.

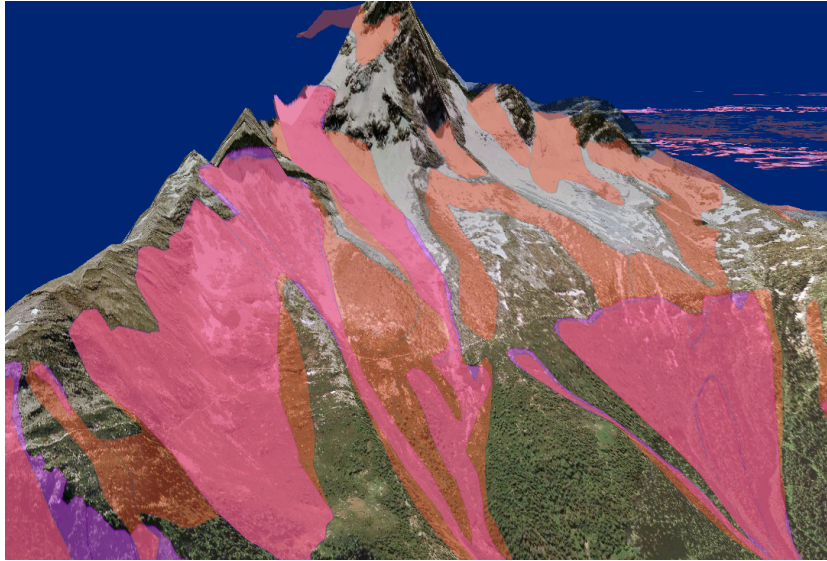


FIG. 1 – Circuler en montagne implique en pratique de traverser des zones avalancheuses. Sur ce versant de la vallée de Chamonix, sont portées les emprises de la carte de localisation des phénomènes d’avalanches (CLPA), qui consigne les avalanches de grande ampleur. Les emprises obtenues par photo-interprétation sont couleur brique, celles issues de témoignages, magenta (voir § 1.3.4.3). Les deux teintes se combinent additivement là où les emprises coïncident. On distingue un liseré clair à mi-hauteur, un chemin (estival), qui recoupe les zones d’avalanches. Cette situation est encore amplifiée dans le type d’itinéraire que l’on emprunte en hiver.

L’enjeu dans ce contexte est de savoir si les conditions du moment sont effectivement dangereuses, voire, même si elles le sont, de savoir ce qui va se produire effectivement. Météo France s’appuie sur une série de modèles (la chaîne Safran, Crocus, Mépra) d’évolution du manteau neigeux, alimenté notamment par des données de précipitations, de températures et d’ensoleillement, massif par massif, pour caractériser le potentiel d’activité avalancheuse sous la forme d’un niveau de risque, avec une itération périodique. Cela ne peut évidemment pas accéder à la réponse à la question ci-dessus. La sagesse consiste à proscrire certaines activités par fort risque (et aussi dans certaines tranches horaires quotidiennes, le soleil direct accentuant considérablement l’instabilité des couches neigeuses), et, même par risque modéré, à lire le paysage et minimiser séjours et perturbations dans les zones à risque.

La prévision à une échelle plus fine semble aujourd’hui hors de portée. Il y a une barrière technique car il faut être en mesure de faire une descente

d'échelle d'une très grande complexité, amener les données climatiques systémiques depuis le massif jusqu'aux dimensions des versants ; par ailleurs, il n'y a pas un attrait suffisant pour qu'on veuille s'y attaquer : pas assez de valeurs (économiques, humaines, philosophiques) à protéger. Sans parler du repoussoir pour les prévisionnistes, leur responsabilité que l'on ne manquerait pas d'invoquer à tout propos.

Dans ce contexte de risque on s'interroge sur la « probabilité que ce soit maintenant » sachant que c'est un site à risque. En réalité on s'intéresse moins à une probabilité qu'à un fait, à partir du moment où on passe.

- En matière d'occupation du sol, on tend à tenir compte de toutes les avalanches possibles, et à se tenir hors de leur portée, notamment pour l'implantation de biens immobiliers occupés par des personnes. En contrepoint de la situation des pratiquants qui se contenteraient de la garantie qu'un site avéré d'avalanches sera inoffensif à un moment donné, pour occuper le sol, on viserait à être hors de toute atteinte d'avalanche, pour tout moment à venir. Cependant cette politique d'implantation répond aussi à des motivations contradictoires et trouve un équilibre économique à disputer une présence aux menaces naturelles. L'attention dans cette situation est naturellement tournée vers les phénomènes majeurs : parce que ceux d'importance mineure sont bien connus par leur forte récurrence, et que le cas échéant, il est aisé de s'en protéger. Dans ce contexte cette fois, la question est « sachant qu'on s'installe à demeure à cet endroit, quelle probabilité y a-t-il qu'il s'y produise quelque chose, dans les vingt ou cinquante ans par exemple ? » (Ce qui subjectivement représente bien une durée au-delà de laquelle peu de personnes se projettent.) — la question de savoir si une avalanche peut se produire maintenant ne se pose même pas.
- C'est dans cette dernière optique qu'est posée la question initiatrice de cette étude. Elle porte donc sur les avalanches un regard biaisé vers les combinaisons de modalités amenant des événements de grande ampleur. Cependant cette borne que l'on se fixe dans les échelles d'ampleur des avalanches, ou dans celles de probabilités d'occurrence, n'a aucune raison de correspondre à une frontière naturelle dans l'espace des comportements des avalanches. De plus, elle ne correspond certainement pas à une valeur en énergie ou en puissance ; chaque couloir a une configuration qui potentialise plus ou moins les effets d'une certaine énergie disponible. De même, chaque morphologie de couloir, insérée dans son contexte géo-climatique, potentialise l'« offre » de précipitations, vent, et autres effets et induit un comportement avalancheux particulier. Pour découvrir une éventuelle singularité séparant plusieurs domaines d'ampleur d'avalanches, c'est-à-dire des effets de seuil, il faut faire une

hypothèse de régularité de comportement, et donc de continuité des déterminismes en jeu quelle que soit l'échelle concernée. Et donc si en principe on s'intéresse à la seconde situation, une considération de continuité d'échelle nous amène à la placer dans la continuité de la première — la difficulté pratique est qu'on ne dispose de données utilisables que pour la frange des plus grandes ampleurs, mais cela ne doit pas nous détourner de poser le problème dans les termes qui nous paraissent corrects.

Remarquons qu'en considérant ensemble toutes les tailles d'avalanches, la modélisation est plus facile, selon un principe habituel de mathématisation qui veut qu'on résout plus facilement un problème en le généralisant, au point que c'est une stratégie de résolution. De façon peut-être surprenante au premier abord, on simplifie un problème en le généralisant [21, p. 108].

1.3.2.2 Le déterminisme lointain des avalanches : une mise en potentiel, une crise de restitution. Le rayonnement solaire chauffe inégalement la terre. Une unité de surface reçoit beaucoup plus d'énergie à l'équateur qu'aux pôles. Il en résulte des échauffements très inégaux des matériaux et la mise en place d'échanges : absorption et restitution de grandes quantités de chaleur principalement par changement d'états de vastes volumes d'eau, mises en mouvement des fluides (courants océaniques, circulation atmosphérique) qui répartissent et dissipent l'énergie de ce moteur thermique. Lorsque l'eau des nuages (qui est liquide ou en glace), transportée sur les terres, précipite, elle est mise en potentiel sur le relief. L'eau de pluie restitue immédiatement cette énergie potentielle en se mettant en mouvement, elle s'infiltre, ruisselle (s'évapore aussi, bien sûr), transportant au passage des matériaux. Dans certaines conditions (à basses températures, soit l'hiver ou en altitude sous nos climats), l'eau peut former des cristaux. Les précipitations neigeuses qui en découlent ont une certaine faculté à s'accumuler sur les pentes et retarder la restitution de cette énergie potentielle, elles sont douées d'une certaine métastabilité. Dans le domaine pyrénéo-alpin, la couverture neigeuse peut atteindre des épaisseurs plurimétriques, et connaître des devenir aussi variés que de s'intégrer dans le lent mouvement d'un glacier, une fonte au printemps libérant progressivement le potentiel en écoulement liquide, ou aussi des phases de restitution brutale de potentiel sous la forme d'une mise en mouvement soudaine du manteau neigeux, son déplacement rapide dans la pente — pouvant se déployer par voie aérienne, en aérosol — jusqu'à l'arrêt avec l'atténuation des pentes, laissant un dépôt plus ou moins localisé : une avalanche de neige. (On notera que la chute d'un sérac à l'origine d'une

avalanche est prise pour une cause étrangère de déclenchement. La neige devenue glace, vêlée en pied de glacier n'est plus considérée comme partie intégrante de la couverture neigeuse et de ses instabilités propres.) Dans un domaine nivo-géographique donné, les avalanches ne s'initient pas n'importe où sur des versants enneigés.

1.3.2.3 Le déterminisme immédiat des avalanches : conditions du départ.

1.3.2.3.1 Les précipitations neigeuses récentes. Des précipitations diluviennes (bien que le terme ne soit pas usité pour les tempêtes de neige) sont aussi des formes de restitutions concentrées de potentiel, pour la tranche allant de l'atmosphère au relief ; elles jouent un rôle clef dans l'établissement de conditions avalancheuses, comme les pluies le font pour les crues de cours d'eau. Mais même des pluies orageuses n'ont pas d'effet aussi brutal que celui d'une avalanche, parce qu'il n'y a pas de métastabilité, il n'y a pas une telle rétention de potentiel sur le relief — il est vrai que certains phénomènes comme les laves torrentielles, à très fort pouvoir destructeur peuvent parfois s'enclencher. Pour bonne partie, ils sont d'ailleurs dus à un effet de rétention qui assure à la fois une concentration de potentiel, et l'obtention d'un mélange dense d'eau et de matériaux de consistance adéquate.

L'activité avalancheuse augmente pendant et après des chutes de neige, et avec leur importance.

D'une précipitation de neige à une pluie il n'y a parfois pas une distinction si nette que les mots le suggèrent. Des pluies peuvent provoquer la déconfiture complète d'un manteau neigeux, voir ci-après § 1.3.2.3.3 page 13.

On retrouve là les éléments qui donnent la tentation de considérer les avalanches comme le produit sinon exclusif, du moins essentiel de précipitations récentes. Un front dans les conditions météorologiques serait suivi d'un front, une crue d'avalanches. Ce n'est pas une vérité absolue, mais les éléments du § 1.1 page 5 le corroborent.

1.3.2.3.2 Le vent, avant, pendant et après les chutes de neige. Le vent est un facteur puissant pour orienter la sédimentation de la neige, mais aussi la redistribuer tant qu'elle se présente sous forme de flocons ou de grains, par érosion et dépôt secondaire, et activer son métamorphisme. Ce comportement dépend évidemment de la configuration du relief. Il peut aboutir à une déflation complète d'une surface, et des chargements considérables en d'autres endroits. On peut se croire dans une tempête de neige sur une face sous le vent, avec des dépôts se formant à vue d'œil, alors qu'on a un ciel clair

au vent (à titre de repère, une précipitation exceptionnelle est de l'ordre de 15 cm/h). La reprise par le vent s'accompagne d'échanges thermodynamiques accélérés ; il n'est pas rare de voir un chasse-neige sur une crête, et aucune chute sous le vent, parce que la totalité de la neige s'est sublimée pendant le vol. Cet effet dépend bien sûr de l'humidité relative de l'air.

Dans ces conditions, la donnée brute de précipitations cumulées, même mesurées sur une station très proche des sites que l'on considère est notablement insuffisante pour donner face par face des conditions d'enneigement et de déclenchement.

Le vent contourne un relief par toutes les voies disponibles, c'est-à-dire latéralement et en hauteur. La loi de Bernoulli formule qu'il s'accélère au cours du contournement et ralentit quand un nouvel espace lui est offert. Cela signifie que les dépressions transverses à sa trajectoire sont des lieux de ralentissement, c'est-à-dire de sédimentation. Les zones en saillie transverses à sa trajectoire connaissent une mise en vitesse avec des capacités d'érosion et de transport accrues. Le comportement exact dépend du régime de vitesse.

L'interaction entre relief et vent a une autre conséquence : l'intensité d'une précipitation est assez directement proportionnelle à la vitesse verticale de la masse d'air impliquée. L'humidité de l'air commence par condenser, il y a formation de nuages, puis précipitation. Les nuages sont forcés par le relief à une prise d'altitude qui favorise leur décharge. Le vent est donc un fort déterminant de chutes de neige abondantes. Une chaîne de montagne, un massif et même un versant au vent peuvent ainsi être plus arrosés que leurs pendants abrités, parce qu'ils arrêtent l'essentiel des précipitations.

L'intensité d'un vent d'origine générale augmente avec l'altitude ; les reliefs connaissent donc des effets du vent comme des précipitations croissants avec leur altitude. Cependant, la courbe des précipitations sature typiquement vers 3000 m et décroît aux très hautes altitudes (figure 15 page 50).

Par vent soutenu, le décrochage des filets d'air en aval des queues d'obstacles trop prononcés produit un sillage tourbillonnaire de type von Karman, qui, combiné aux propriétés d'adhésion électrostatiques de la neige fraîche peuvent conduire à former des corniches formant des surplombs de parfois plusieurs mètres. On les observe le long des crêtes, sous le vent. On sait assez bien situer où peut se produire ce genre de phénomène quand on se met en situation sur un relief, cependant le vent forme des structures turbulentes et interagit avec le relief à de multiples échelles (on peut se représenter des échelles emboîtées de couches limites, pour simplifier), si bien que décrire les figures que va former un vent donné, détail par détail sur le terrain est inaccessible — à moins de partir du résultat, en l'ayant déjà observé en place. Naturellement, avec leur surplomb, les corniches sont vouées à un effondrement brutal (voir § « déclenchement » page 14).

Sur une portion de relief formant point d'arrêt à l'écoulement, la pression dynamique peut plaquer la neige (en précipitation, ou érodée et transportée) et la faire tenir dans des configurations impossibles autrement [25]. Des obstacles limités comme un poteau peuvent alors porter des dendrites spectaculaires.

Le vent conduit à des dépôts de neiges densifiés, effet accentué lorsque les températures sont trop modérément négatives.

Du point de vue de la modélisation, si l'on sait énoncer le sens des variations du vent sous l'influence d'un relief simple et régulier, puis le traduire en équations très simplificatrices (déviation, ralentissement du vent — à l'exclusion de la turbulence [24]), même à ces conditions son comportement sur des surfaces complexes exige d'itérer des calculs déjà coûteux en eux-même. Par ailleurs, ces représentations simplifiées s'accordent mal de relief importants, parce qu'on traite le vent comme un phénomène à deux dimensions, avec donc un seul plan de vecteurs de vent. Or on sait par exemple qu'à la station de Tignes, par fort vent (systémique) du nord, le vent entre dans la station par le bas, c'est-à-dire du sud, au niveau du sol. Ce n'est certainement pas avec une représentation du vent en deux dimensions que l'on peut rendre compte de ce genre de situation.

Même des modèles élaborés comme SnowTran-3D n'ont été mis à l'épreuve que dans des conditions de relief beaucoup plus atténuées que ceux sur lesquels on étudie les avalanches [23], ou avec des prédictions vérifiées à une échelle très moyennée, inutilisable pour connaître l'alimentation d'un couloir. Par ailleurs quand on entre à ce niveau de détail sur une série de versants, il faut être en mesure de donner en entrée des champs de vents réalistes (ils sont loin d'être uniformes), ce qui supposerait de disposer de mesures extensives et calibrées.

1.3.2.3.3 Effets climatiques thermiques. Le rayonnement thermique est déterminant dans la métamorphose de la neige. Très réfléchissante dans le domaine visible, surtout quand elle est fraîche, elle absorbe l'infrarouge. Ainsi l'exposition au soleil direct, très contrastée en montagne joue-t-elle fortement. Cependant, les autres corps rayonnants comme des rochers voisins, des sommets occultants, des nuages ou le fond du ciel apportent une contribution déterminante au bilan local de rayonnement d'une couche de neige, avec de forts effets de chronique, et des contrastes importants jusqu'à une échelle centimétrique.

Les échanges de chaleur sont activés par un vent chaud et sec (ce que renforce un effet de foehn), avec des conséquences qui intéressent alors tous les versants, qui peuvent connaître une véritable débâcle. La cohésion des pentes exposées au sud dans l'hémisphère nord oscille avec le rythme nyctéméral

lorsque le ciel est dégagé de nuages. Elle s'étiole avec le passage du soleil au méridien et se renforce la nuit.

Dans des situations de fonte rapide, des avalanches à la consistance de yaourt brassé « *slush avalanches* » peuvent s'initier sur des pentes très modestes. Ce phénomène est plutôt caractéristique d'un climat septentrional comme celui de la Norvège ou de l'Alaska, marqué océaniquement, au printemps [17, p. 87], mais il n'est pas exclu en domaine pyrénéo-alpin. Il peut notamment y être provoqué, y compris sur des pentes marquées cette fois, par des pluies intenses noyant le manteau [1, p. 103], comme on l'a évoqué ci-dessus § 1.3.2.3.1 page 11.

Si la course du soleil dans le ciel est bien connue, et si avec un bon modèle du relief on peut calculer les effets de masque et un score de rayonnement direct, un bilan de rayonnements secondaires est d'un autre niveau de complexité. Et cependant, ces termes secondaires peuvent être très significatifs, y compris pour décider de la stabilité de la neige sur les pentes. En dernier recours, un décompte de ces termes peut devenir impossible sans des moyens démesurés, car par exemple un brouillard local et même des passages nuageux peuvent protéger une zone particulière alors que non loin de là, d'autres sont soumises à des conditions extrêmes.

Il y a là-aussi un horizon inaccessible, du moins avec les capacités actuelles.

On constate une extrême variabilité de l'état du manteau neigeux d'un point à un autre, sur un versant qui au premier abord semble uniforme [6]. Il est d'observation courante que des pelouses faiblement ondulées montrent au printemps des langues de neige relictuelles qui délimitent manifestement de forts contrastes micro-climatiques locaux, à quelques dizaines de centimètres d'intervalle, et qui seraient loins d'être évidents à prédire a priori.

1.3.2.3.4 Déclenchement. Une corniche, un sérac, des blocs rocheux qui rompent peuvent constituer à eux seuls la masse initiale d'une avalanche. Ils servent fréquemment de gachettes à des couvertures neigeuses peu stables, et, si leur masse est suffisante, peuvent même constituer à eux seules la masse initiale de l'avalanche.

Dans leur mouvement, ils sont susceptibles de recruter des matériaux qu'ils trouvent sur leur passage, neige, sols, roches, végétation. Tous ces matériaux sont dans un état de métastabilité relatif, pour pouvoir être entraînés. Cette relativité tient au simple fait d'être sur un relief, car l'impulsion peut être telle qu'elle mettrait tout obstacle en mouvement.

1.3.2.4 Conclusion. On retient que la neige s'accumule préférentiellement dans les dépressions, et dans ce qui se présente comme une dépression

relativement au vent local, c'est-à-dire les pentes sous le vent. Les formes en cirque parviennent donc à se charger dans à peu près toutes les configurations.

Rendre compte des effets du vent de manière réaliste est inenvisageable ; on fera donc un choix radicalement simplificateur, qui sera discuté §2.1.3.

1.3.3 Les types d'avalanches : deux grands pôles phénoménaux

Une rupture est à l'origine d'une avalanche, un mécanisme connu pour être difficile d'accès en physique. Cependant, « on » sait « où sont » les avalanches, comme on l'a rappelé § 1.3.1 à propos de la pratique de la montagne enneigée. Il y a donc des morphologies lisibles du terrain qui se prêtent aux conditions de rupture. Il y a surtout des zones évidentes portant, même en l'absence de neige, des traces de glissement de matériaux, qui incitent à inférer un lieu d'où ils partent, quels qu'ils soient.

1.3.3.1 Concernant le départ, deux grandes situations.

1.3.3.1.1 Comportement en plaques : une rupture sur une surface entre couches cohérentes. La neige sédimentée est soumise à des métamorphoses (elle peut déjà précipiter dans des états très variables), sous ses propres contraintes mécaniques (tassement, reptation — fluage et glissement lents), et sous les sollicitations thermiques qui induisent des changements d'état à l'origine notamment de redistributions de matière dans la trame cristalline modifiant profondément le comportement mécanique. L'apport dynamique du vent (déflation, corrasion, impacts) décuple ces effets thermodynamiques. Les chutes de neige successives induisent alors une structure en couches de cohésions variables, d'où leur tendance à se déliter en plaques.

Un glissement spontané peut se produire lorsque la contrainte en cisaillement dépasse ce que peut admettre une couche. La rupture conduit à un départ en plaque, laissant un lit proche de la couche de décrochement, au moins dans la partie la plus haute, qui subit peu de raboutage. La limite supérieure forme une marche nette sub-perpendiculaire à la pente, avec un tracé en dent de scies plus ou moins marquées. On a donc une zone de départ dont la partie haute est nettement détournée.

1.3.3.1.2 Comportement lâche : une décohésion ponctuelle, dans un manteau lâche. Cependant, un manteau neigeux peut en tout ou partie, sous l'effet de la chaleur ou d'une pluie, évoluer vers un état lâche (§ 1.3.2.3.3). La décohésion s'initie alors typiquement en un point unique proche de la surface, et se propage, comme toujours avec les comportements lâches, à tout

ce qui se trouve en-dessous dans la pyramide (pyramide significative de l'angle local de frottement interne). On a cette fois un point de départ, pas une zone.

Bien entendu, s'agissant de structures proches de l'instabilité, un départ ponctuel est susceptible de faire gachette sur des structures en plaques sous-jacentes (la situation inverse, plus improbable, évoque plutôt un sérac faisant amorce en chutant dans un manteau lâche. Toutes sortes de facteurs que l'on peut considérer comme plus ou moins étrangers au manteau neigeux peuvent jouer le rôle de déclencheur (comme le passage d'un skieur, la chute d'une corniche — mais ne fait-elle pas partie du manteau neigeux, vu dans sa totalité?). Leur efficacité prouve au moins la proximité à la rupture de la zone emportée.

Les *slush avalanches* relèvent de cette catégorie (§ 1.3.2.3.3 page 13). Leurs zones d'initiation vont de pentes de 5° à 40° , mais dépassent rarement 30° ou même 25° ; les faibles pentes concourent à gêner le drainage et permettent une saturation en eau, provoquée par de fortes pluies ou une fonte intense [17, p. 87]. Elles concernent donc essentiellement un domaine géomorphologique distinct des autres types d'avalanches. La modélisation des zones de départ exige naturellement d'en faire un cas à part; pour ce qui concerne cette étude, elles seront mises de côté.

Cependant, la morphologie de nos montagnes veut que des aires favorables aux départs en plaques hébergent aussi un grand nombre de départs ponctuels, et donc d'avalanches par fonte, même si seules celles-ci peuvent intéresser des pentes qui leur sont spécifiques.

1.3.3.1.3 Conclusion. Il y a donc deux modes de départ,

- par fonte;
- par rupture, qui peut être ponctuelle (matériau lâche) ou linéaire (matériau cohérent).

1.3.3.2 Des comportements dynamiques variés. Les avalanches présentent des apparences variées, de la coulée dont la surface est visible, à un nuage se développant fortement en hauteur, qui masque la partie la plus virulente de l'avalanche.

On a souvent considéré comme co-déterminées les avalanches se présentant comme des aérosols et la neige récente, poudreuse, froide, sèche, d'une part et les avalanches coulantes et la neige humide. En fait on sait que des rochers, de la glace, et des neiges humides peuvent former des aérosols, si l'énergie nécessaire leur est conférée [1, p. 89, 106]. Le changement de régime entre un solide qui se met en mouvement (rupture de plaque), un écoulement de type fluide dense et un développement en aérosol à faible densité tient aux

puissances mises en jeu. On peut remarquer que cette découpe se trouve correspondre aux grandes classes d'idéalisations des avalanches permettant d'en faire des simulations numériques : bloc glissant, fluide dense, aérosol.

Aux petites puissances (par unité de volume mobilisé), l'effet des propriétés mécaniques de la neige domine dans l'apparence phénoménologique. Aux grandes puissances, il y a uniformisation des apparences, des comportements.

Les aérosols peuvent développer des pouvoir destructeurs considérables. Il y a cependant controverse sur les vitesses qu'ils sont susceptibles d'atteindre. Pourtant le mécanisme leur permettant un « bootstrap¹ » en vitesse est assez simple. Les particules de neiges se dispersent, entraînent l'air dans leur chute, et poussent un front de vent devant elles (une vitesse par rapport au sol). Dans cet air en mouvement, elles peuvent de nouveau tendre vers leur vitesse de chute limite, ce qui entraîne à nouveau une accélération de l'air ambiant. Ainsi on peut atteindre, dans un référentiel lié au sol, des vitesses d'air et de particules très supérieures à la vitesse limite d'une particule isolée chutant en air calme.

1.3.4 Les données sur les zones de départ

Ce qui suit n'est pas une revue bibliographique, terme qui suppose une certaine exhaustivité, mais un relevé de diverses catégories d'informations disponibles sur les zones ou conditions de départ d'avalanches, avec quelques échantillons des caractérisations écrites, et des données factuelles disponibles. Un résumé de ce qu'on peut en retenir d'utilisable pour notre usage.

L'information n'est pas pléthorique ; elle n'est accessible que sous forme remâchée, sans les données factuelles initiales.

Les zones de départ sont généralement difficiles à observer. Les nuages peuvent obstruer la vue ; depuis la vallée le relief les masque souvent, et se déplacer vers un point de vue est souvent malaisé et au surplus, dangereux. Des moyens aériens ne sont mobilisés qu'en situation de catastrophes, et il restent tributaires d'une ouverture météorologique.

1.3.4.1 Des observations. On considère les zones pouvant donner lieu à des avalanches en plaques ; conformément aux hypothèses § 1.3.3.1.2, page 16,

¹Tire-botte, en bon français. Mais l'usage en statistique notamment consacre l'adoption du terme anglo-saxon. L'origine du terme serait dans les aventures du Baron de Münchhausen, dont le récit veut qu'il se soit sorti d'un marécage rien qu'en se tirant par les bottes, se propulsant ainsi dans les airs. On fait aussi référence au roman de Cyrano de Bergerac où il est proposé de se hisser sur la lune en lançant répétitivement un aimant depuis un chariot métallique pour s'élever dans les airs. L'effet magique évoque la caractère surprenant de la possibilité du bootstrap statistique, et, ici, mécanique.

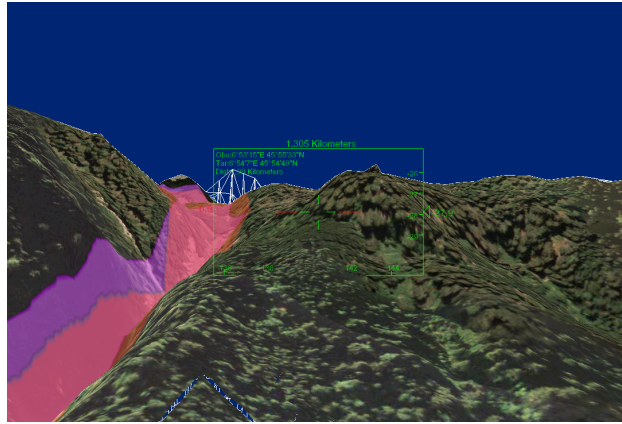


FIG. 2 – Depuis le pied de versant, il est fréquent que l’on ne puisse rien observer du tout des zones de départ. Cette image est formée, toujours à partir de nos données, avec l’extension ArcGlobe d’ArcGIS. L’orthophotoplan est drapé sur le modèle numérique du relief, on lui a encore superposé les emprises de la CLPA, dans leur couleur habituelle. (À cette échelle, et à cet endroit, l’accord entre ces différents jeux de données n’est plus tout à fait correct.) On note aussi quelques défauts d’affichage du logiciel.

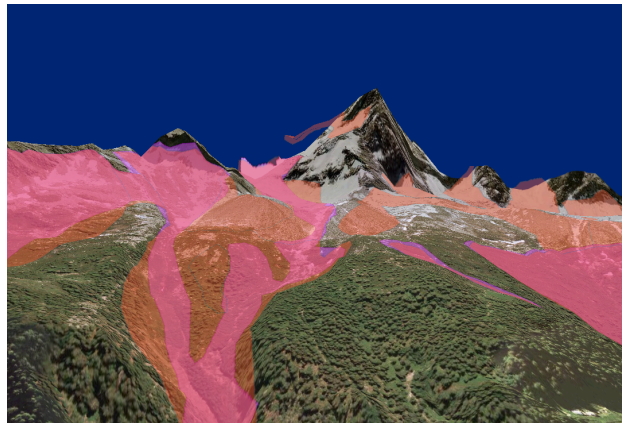


FIG. 3 – Il faut pouvoir s’élever, parfois assez haut pour avoir une vue significative sur tout l’espace balayé par les avalanches, et spécialement leur zones de départ. Ici on est exactement à la verticale du point d’observation de la figure 2. Pour obtenir un point de vue comparable, il faut souvent escalader très haut le versant d’en face — s’il y en a un ! Les périodes avalancheuses n’incitent pas à ce genre de déplacement, si bien que l’observation est très souvent impossible.

on exclut les fontes brutales et généralisées qui peuvent concerner notamment un domaine de pentes complètement différent.

David McClung et Peter Schaerer proposent des fréquences pour des pentes d'où est parti un échantillon de telles avalanches figure 4, là où tous les autres se contentent de donner des intervalles de pentes dans lequel les départs sont possibles. Ils ont mesuré d'autres paramètres, comme le rapport entre longueur et largeur de la plaque rompue, mais aucun n'est utilisable comme qualifiant de zones de départ.

Comme les autres auteurs consultés assèment des valeurs sans jamais faire état d'un relevé sur le terrain, on ne dispose pas de véritable recoupement, ni de variantes couvrant divers types d'avalanches, ni tous les domaines climatiques, ni tous les scénarios. Or, des scénarios exceptionnels apportent beaucoup d'information car ils délimitent les limites du possible (le *Guide neige et avalanches* [1] en reconnaît l'importance en faisant une collection d'événements remarquables).

Comme toujours, l'information réside aux bornes des domaines de possibles, aux frontières de l'espace des données, c'est-à-dire les limites de l'enveloppe externe, et aux frontières internes que sont les singularités marquant des zones de comportements différents. En naviguant dans cet espace, il suffit de noter quelles frontières on a traversé pour savoir dans quelle situation on est.

Pour travailler, il y a absolue nécessité de disposer d'une base de cas circonstanciés. Comme les autres facteurs reconnus comme déterminant les avalanches (§ 1.3.2.3) n'ont pas fait l'objet de mesures coordonnées, on en sera réduit à les représenter par les sortes de lois générales qu'on en a énoncé.

1.3.4.2 De petits scénarios, fondés sur des raisonnements de physique qualitative ou intuitive, qui racontent comment se produit une avalanche. Par exemple, Frédéric Berger et Jérôme Liévois indiquent en substance « qu'une zone d'au moins 10 m de large et 50 m de long dans le sens de la pente, laquelle doit être comprise entre 28° et 55°, surmontée d'une zone moins pentue avec une rupture de pente d'au moins 10° », est candidate aux départs d'avalanches [3, p. 125]. (On retrouve des formulations similaires en de nombreux exemplaires, avec autant de variantes que ne le permet la souplesse syntaxique des langues naturelles — un seul exemple : [15].) Le contenu de physique qualitative est que sur ce genre de rides, d'une part les contraintes en traction sur la manteau neigeux sont accrues, d'autre part, la couche de neige est amincie, ce qui accentue le premier effet. Enfin, des cassures consécutives à des avalanches s'observent effectivement dans ce genre de configurations. Mais le constat est à sens unique, on ne fait pas d'inventaire de toutes les formes en rides a priori favorables, pour compter après coup

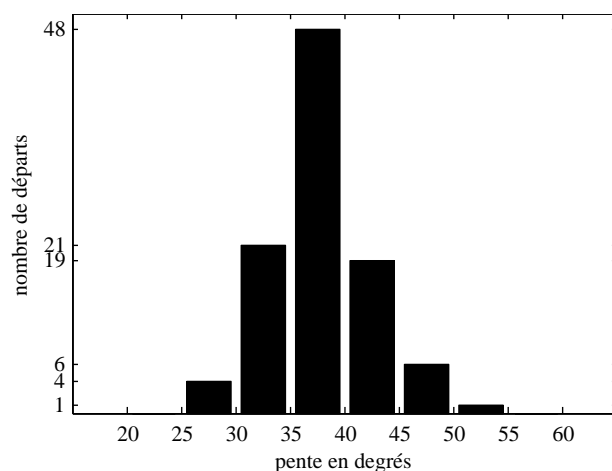


FIG. 4 – Propension aux départs de plaques de neige sèche en avalanches de grande ampleur, en fonction de la pente, d’après David McClung et Peter Schaerer [17, p. 75], établi sur un échantillon non précisé. On sait cependant que l’épaisseur à la cassure s’échelonnait entre le décimètre et deux mètres, pour presque deux cents cas étudiés, assurément en Colombie britannique. Les données climatiques attenantes ne sont pas disponibles. Les pentes faibles ne permettent pas d’atteindre le seuil de rupture — à moins d’imaginer des situations pathologiques comme une neige venue après une pluie en surfusion sur un sol glacé — ; sur les pentes de plus de plus 55° et dès 45° la métastabilité est réduite, elles se purgent en petites avalanches tout au long des précipitations, avec une suraccumulation en pied. C’est du moins ce que l’on considère en domaine alpin notamment ; en domaine andin de haute altitude, les alpinistes rapportent la tenue de neige poudreuse sur des pentes de plus de 60°. Une neige fraîche, aux cristaux en étoile bien formés, peut tenir sur des pentes jusque vers 87°, selon A. Roch, cité dans le cours de nivologie du Centre d’étude de la neige de Météo France (2006). Mais l’épaisseur qui peut être en jeu reste limitée. Par ailleurs David McClung et Peter Schaerer alertent leurs lecteurs que quel que soit l’endroit, rien n’interdit totalement la tenue suffisante de neige pour conduire à des avalanches de grande ampleur dans cette gamme de pentes. Pour abonder cette précaution, le service des pistes de Sept-Laux en Isère (France) rapporte une avalanche exceptionnelle, sur une face *au vent* très raide où la pression dynamique avait stabilisé quatre mètres de neige au cours du passage d’une tempête [25]. Enfin, David McClung et Peter Schaerer [17, p. 80a] ajoutent cependant que « l’observation montre que la plupart des départs d’avalanches en plaques ont lieu sur des pentes planes (plutôt que convexes ou concaves). Et que l’expérience montre, pourtant, que le déclenchement est plus facile au sommet de zones convexes. » ! Pour ne pas manquer d’un peu de contradiction, ces affirmations nous posent surtout la difficulté de ne comporter aucun terme d’échelle qui permette de dire comment on juge une zone comme plane, concave ou convexe, et donc aussi quelle taille elle doit avoir.

celles qui se révèlent actives ; on n'a pas d'information d'exclusion : on sait « où », on sait mal « où ne pas ». Il faut se méfier des erreurs épistémologiques que cela peut induire. La limite entre ce qui est et ce qui n'est pas, c'est le dessin de la frontière, le lieu de l'information critique (1.3.4.1).

Ces formulations recèlent trois pièges.

1.3.4.2.1 Tout d'abord la physique qualitative, intuitive, ou spontanée, variations ou nuances qu'il n'est pas toujours facile de distinguer, puisque contrairement à un raisonnement très rigoureux, leurs contours sont informes, véhicule fréquemment des assertions totalement erronées. De plus, ces erreurs sont difficiles à déjouer car les raisonnements étant extrêmement adhérents aux fragments de faits présentés, ils semblent toujours posséder la certitude de la réalité [30, 29, 28, 27], tout en échappant au critère de réfutabilité qui selon Karl Popper, caractérise une connaissance scientifique [22]. Le raisonnement authentiquement physique est difficile, surtout quand, face à un phénomène que l'on appréhende mal, il faut l'inventer.

Ces récits de mécanismes s'entremêlent volontiers à un *storyboard*, une succession d'événements saillants avantageusement enchaînés par le « et puis » français qui trouve une voie intermédiaire bien pratique entre la plate chronologie de faits se succédant simplement et une chaîne causale. De ce fait il y a un glissement continu entre un fragment de réalité solidement formalisé avec des éléments de physique, le « raisonnement d'un expert » et le récit plus ou moins naïf et circonstancié de ce qui a pu être vu, l'ensemble formant des entrelacs impossibles à dénouer.

À propos de chaîne causale, il faut aussi se rappeler, si l'on veut que la vérité soit physique, que quand on écrit une équation différentielle pour décrire deux objets en interaction, personne ne pousse ni ne tire l'autre : il y a, fortuitement en quelque sorte, deux variations simultanées qui se produisent : rien de causal. La présentation ou l'explication d'un phénomène par une succession de causes et d'effets, communément admise pour bien fondée, n'est pas étayée par l'écriture d'équations physiques.

1.3.4.2.2 Le seconde piège est de vouloir édifier une modélisation en mimant pas à pas « l'expert » (en vérité, « la rumeur experte »).

La force de l'expression dans une langue naturelle est sa capacité à une mise en contexte implicite, à outrepasser tous les jeux d'hypothèses que suppose un énoncé, à faire fi d'un référentiel. Cela donne une communication très efficace... tant que les interlocuteurs partagent assez de ces *a priori*. Et partager ses *a priori*, c'est trouver un moyen de se faire vivre mutuellement par le récit les expériences qu'on a connues. L'absence d'explicitation du

référentiel fait que la physique dite en langage parlé ouvre la porte à beaucoup de chausse-trapes.

Au moment d'en passer à une formulation circonstanciée (et la vérité en la matière, c'est l'écriture d'un logiciel — voir § 1.1 page 4), on découvre les méandres et circonvolutions cachés sous une formule lapidaire. Une spécification n'est jamais assez précise, mais on ne le sait qu'après avoir écrit le programme.

Les « règles expertes » ne donnent pas de frontières (elles contiennent tout ce qui peut y ressembler, en dur, dans leur propre écriture, inaccessible de l'extérieur), or c'est là que réside l'information (§ 1.3.4.1 page 20).

Pour le dire autrement, elles ne contiennent pas d'expression claire ni détachable des échelles de phénomènes en jeu. Reprenons l'exemple du dièdre que constitue une zone de dépôts selon l'énoncé plus haut. Comment peut-on appliquer cette règle ? Le problème est que les montagnes ne sont pas faites de plans inclinés raccordés à vif. Il y a une difficile opération de mesurage à mettre en œuvre pour pouvoir assimiler un pan de versant donné à ce dièdre. Et que vaut cette assimilation ? L'affectation que l'on fait contient assez de sources de variations pour changer à elle seule la totalité des réponses que donnera notre modèle. La difficulté profonde qui sourd ici n'est pas de trouver des règles énoncées dans notre langue maternelle, exercice auquel nous sommes rompus, mais de spécifier par le menu comment reconnaître une forme, et le spécifier assez bien pour pouvoir le faire faire à un ordinateur (§ 1.1 page 4.

L'énoncé des conditions pour qu'une portion de terrain mérite d'être considérée comme le dièdre de la règle est difficile. Surtout, il laissera quantité de lacunes : est-ce que tous les cas où l'on ne peut s'autoriser l'assimilation excluent de fait les dépôts d'avalanches ? La réponse est non, en pratique ce modèle répond pour une partie du terrain, et en laisse de grandes portions dans l'indécision.

Cet énoncé contient de très nombreux termes de forme et d'échelle : jusqu'à quel point cette surface bosselée peut-elle être considérée comme un plan ? Comment est-ce que je peux affecter un angle unique à toute cette zone de terrain, est-ce que ça a seulement un sens (la question critique est de savoir comment va se comporter la neige) ? Est-ce que cet arrondi est une arête qui raccorde deux plans ? Que dire pour une zone de quelques mètres seulement, ou de quelques centaines de mètres ? Autant de problèmes de mesurage pratique — il me faut des données concrètes pour pouvoir exprimer clairement les opérations d'assimilation —, et mathématiquement d'approximation de fonctions par d'autres fonctions dans un cadre d'espace d'échelle [10, 14, 13] et de mesures, au sens de la théorie de la mesure.

Benoît Mandelbrot, en exposant qu'à la question « quelle est la longueur de la côte de Bretagne ? », il y a au moins autant de réponses que d'échelles

considérées, avait très tôt attiré l'attention sur l'impossibilité de parler clairement d'une situation concrète sans rendre son discours relatif à une échelle. Il faut se figurer l'exercice de mesure de la côte comme consistant, en partant d'un point, à venir mettre en correspondance l'autre extrémité d'une règle étalon avec la courbe de la côte, puis réitérer l'opération à partir du point atteint, jusqu'à la frontière de la Bretagne. À chaque fois qu'on change pour une règle plus petite, on s'enfonce dans de nouveaux détails, on obtient une longueur accrue. Par conséquent, parler d'une notion en apparence aussi triviale que la longueur de la côte de Bretagne, ou celle d'un couloir d'avalanche n'a de sens que si on l'exprime relativement à une échelle. Une façon de faire est de donner un étalon et la procédure pratique de mesurage.

Si pour expliciter comment le modèle du dièdre doit être raccordé à la réalité, on s'engage sur la voie de précisions successives, sous forme de règles toujours plus détaillées, cela nous entraîne tout doucement à une énumération de milliers de situations particulières ; on se met à former une base de cas, on va à l'inverse de l'intérêt initial d'avoir une règle, une formule synthétique unique.

1.3.4.2.3 Le troisième piège de ces formulations est d'avoir l'allure de lois du même ordre que des principes physiques, qui jouissent d'un certain détachement de la réalité et ses contingences. Dans ces expressions en fait, on adhère à un bloc indifférencié d'observations et de raisonnements mécaniques ponctuels, résumés de façon ramassée et convaincante. Mais ce faisant, on a perdu la richesse d'observations brutes, et tout ce qu'on peut en retirer par des méthodes d'analyse et visualisation des données, et comme on l'a vu, elles ne sont pas remplacées par une expression d'une grande généralité. On n'a plus de faits. Or pour apprendre la réalité, il faut ultimement des faits, pas des allégations de seconde main.

I've already made up my mind, so don't confuse me with *facts* !
—Anonymous

En résumé, tous ces éléments d'information sont utiles, expressifs, et nourrissent la réflexion. Mais on ne peut pas construire une modélisation en y adhérant strictement, parce qu'ils sont établis en répondant à des contraintes totalement différentes de celles qui s'appliquent à une expression mathématisée.

L'impraticabilité de cette voie est démontrée a posteriori par les expériences menées par Laurent Buisson, dans lesquelles il a entrepris de raisonner sur l'espace, notamment sur les avalanches, en prenant explicitement un parti opposé : « Elsa [...] doit être capable de « comprendre » les différentes notions

exploitées par l'expert. Le système à base de connaissances doit contenir des unités de l'univers du discours de l'expert [...] ; il doit aussi pouvoir raisonner sur ces connaissances qui sont spatiales. » ; « Leur étant destiné [aux *experts*] Elsa a été construit avec leurs connaissances, leur vocabulaire, leurs images des phénomènes. Les objets de l'analyse sont donc ceux que manipulent les experts. Enfin, l'importance de l'espace conduit à une communauté des représentations de l'espace chez l'expert et dans Elsa. » [4, p. 103 ; p. 96].

La principale impropreté d'un système à base de règles est qu'il ne se trouve dedans aucun paramètre à faire varier pour moduler le comportement en sortie. Il en résulte une impossibilité d'ajustement, de généralité qui ne soit pas explicitement inscrite dans les règles. Le même écueil peut se retrouver dans des modèles à teneur plus numérique, mais dont l'écriture verrouille dans les branchements de l'algorithme des éléments de décision mêlant dimension, forme plus ou moins bien appréciée, rapports de position [15, p. 30]. Ces modèles ne se laissent pas paramétrer. Cela ne veut pas dire qu'ils ne sont pas pleins de paramètres ; mais qu'on ne peut pas moduler leur comportement, on n'y a pas de progressivité des réponses. Tout doit s'y fixer à la main une fois pour toutes, ils sont gravés dans le marbre. On ne peut guère les utiliser pour interroger le rapport entre les réponses qu'ils proposent quand on fait varier des conditions et ce que montre la réalité en retour, formuler de nouvelles hypothèses dans un va-et-vient exploratoire.

1.3.4.3 Une information développée spatialement, la carte des avalanches. Pour un départ d'avalanche, un fait doit comporter la zone intéressée, située sur une représentation du terrain. Les seules données spatialisées disponibles concernant les zones de départ d'avalanches sont en France dans la carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA). Rappelons simplement qu'elle porte les « contours maximaux » correspondant à une zone avalancheuse donnée, mais n'y différencie nullement des zones de départ. La fonction de la CLPA n'est pas de cartographier les zones de départ ; la partie haute d'une emprise est forcément une zone de déclenchement, mais d'autres parties peuvent bien en être aussi. Enfin, plusieurs zones déclenchant dans des scénarios météorologiques distincts peuvent se trouver réunies dans le contour du haut d'une emprise. Tout ceci oblige à un travail d'interprétation avant de comparer la réponse d'un modèle à un contour donné.

Le mécanisme de fabrication de la CLPA mérite un peu d'attention. Pour les emprises tracées d'après témoignages, on n'omet jamais de zone de départ plausible, même lorsque l'on ne peut guère en obtenir d'informations tangibles. Cela n'aurait pas de sens de porter par exemple le seul petit fragment observable d'une zone de départ : tout le monde croirait que cela implique

que le reste d'un cirque *a été vu ne jamais déclencher*. A fortiori, un couloir sans rien qui paraisse l'alimenter paraîtrait aberrant. Une carte ne peut pas se satisfaire de ce type de sémantique dans le contexte où on l'utilise.

Pour les emprises tracées par photo-interprétation, la forme par excellence qui signe une avalanche et qui la certifie est une trace dans la végétation, une cannelure dans le relief, un cône de déjection. Partant de là, on sait qu'on *doit* trouver une zone de départ au-dessus. D'une certaine façon, en ce qui concerne les zones de départ, on part du résultat ; on ne la lit pas forcément directement sur la photographie.

La CLPA, s'intéressant à des emprises maximales, pour ses tracés de témoignages comme de photo-interprétation, amalgame les zones de départ correspondant à de multiples événements. On ne peut donc les rattacher à des scénarios nivo-météorologiques.

La détermination des couloirs d'avalanches par photo-interprétation en stéréoscopie fait usage de multiples indices, on le voit encore mieux sur les figures drapant l'orthophotoplan sur le relief. La texture photographique donne à voir rochers, talus et végétation et leurs ombres qui démultiplient notre lecture du relief, et y ajoute un micro-relief très élaboré qui raconte comment vit la pente. L'habitude de lire un terrain sur place, enrichi d'une grande culture de la montagne, et de le mettre en rapport avec son image vue d'avion entre aussi en jeu. Les connaissances sur la météorologie locale sont mises à profit. Encore une fois, « on sait » presque d'avance d'où partent les avalanches, les figures érosives sur nos montagnes y inscrivent largement les phénomènes qui s'y déroulent régulièrement. Pour l'œil exercé, l'aspect raconte une histoire. En l'occurrence, elle implique des capacités de reconnaissance de formes qui font obstacle à une transcription sous formes de composantes d'un système automatique.

La CLPA est établie par lecture sur le terrain ou des stéréophotographies, mais transcrite sur un fond IGN au 1 :25 000. Ce fond est marqué des effets de généralisation qu'implique un tracé cartographique, des difficultés et du peu d'enjeu pour les cartographes qui l'établissent d'avoir une restitution fidèle de montagnes. Cela oblige à un exercice de report « au mieux ». Lorsqu'on superpose les emprises CLPA à un orthophotoplan — qui, au dire de l'IGN, n'est pas exempt d'infidélités au terrain par déformation —, il est a priori possible de trouver des incohérences qui en limiteront les possibilités de discussion fine des zones de départ. La figure 6 page 33 montre cependant qu'aux résolutions où l'on a travaillé, les supports sont utilisables.

Choisir entre les erreurs d'un orthophotoplan et celles d'un fond cartographique pour reporter des emprises d'avalanches pose un cruel dilemme. Le fond cartographique est évidemment un moyen de diffusion au public de documents imprimés, mais pour un positionnement fin sur le terrain, les points

saillants visibles sur une photographie sont bien meilleurs. Dans un dispositif électronique, on peut tracer « la vérité » sur orthophotoplan, et laisser à l'utilisateur le loisir de juger des décalages que présente inévitablement le fond de carte qu'il peut visualiser par transparence. Ces questions sont tout à fait au centre des problèmes de mise au point d'un modèle déterminant les zones de départ d'avalanches.

1.3.5 Stratégies de modélisation

1.3.5.1 La voie de la modélisation « absolue » est déraisonnable.

Chercher à mimer pas à pas et dans leur totalité les mécanismes présidant aux départs d'avalanches est déraisonnable, de même que ça l'est en matière de modélisation de leur mouvement. Cela supposerait un état de connaissance *démesuré*, impliquerait des puissances de calcul très hors de portée des moyens d'aujourd'hui, et procède surtout d'une démarche impropre : dans une modélisation, on recherche la possibilité d'une synthèse, d'une clef de représentation capable d'exprimer des réponses pertinentes avec une économie de paramètres. Il faut éviter de glisser dans le rêve d'une carte qui deviendrait le territoire [12] ; elle doit faire une compaction symbolique et tenir dans la poche ; pour une carte à l'échelle un (qu'il faut donc poser à plat sur le pays), autant utiliser directement le terrain comme carte.

Au surcroît, il nous manque de la connaissance pour tenter, ne serait-ce qu'à titre de démonstration, une modélisation totale ; il manque surtout *des données* pour la concevoir.

Le choix a été de rechercher des composantes bien formées mathématiquement, effectives algorithmiquement, c'est-à-dire calculable dans un délai compatible avec l'usage qu'on veut en faire — ici c'est quelques secondes, exceptionnellement quelques dizaines de secondes, et paraissant recouvrir, même avec de la redondance, la palette de notions qui se détachent dans la détermination des zones de départ.

Les composantes n'ont pas besoin chacune de circonscrire exactement une partie du phénomène, il ne faut pas s'attendre par exemple à y trouver point à point le reflet de concepts que l'on manipule quand on parle ; elles doivent capter quelque chose de significatif, ayant une bonne valeur générale. Les composantes n'ont pas besoin d'être douées d'analyticité, ni de former une base orthogonale, ni d'être indépendantes. Il faut compter sur la combinaison avec les contributions des autres termes pour apporter les corrections qui permettent globalement une délimitation fidèle à des observations. La situation que cela induit n'est pas si rare : par exemple, notre alphabet ne forme pas des combinaisons en relation bijective avec les sonorités du français, et l'on pourrait aussi bien écrire *phrensê*.

Bien sûr, en voyant contruire un modèle numérique pour tracer les zones de départ, les personnes considérées comme des experts des avalanches ont de quoi être un peu perturbées de voir des concepts strictement mathématiques faire irruption dans un domaine où ils étaient seuls maîtres ; avec la soudaine perspective de devoir rattraper un énorme arrière-plan de connaissances pour pouvoir seulement juger sur pièces ce que ça peut apporter, et préserver une pleine maîtrise de leur métier. Mais l’option que l’on se propose de suivre ici ouvre au contraire la perspective d’une coopération s’appuyant sur un modèle interactif d’exploration des zones de départ, où un spécialiste explore la réponse du modèle en modulant son comportement de façon à obtenir les résultats qu’il souhaite voir, rendus sur une représentations en trois dimensions du relief.

Le sujet exige ici de citer Charles Percy *Snow*, physicien et romancier, auteur dans les années cinquante d’un livre célèbre consacrant l’avènement de « deux cultures », une scientifique et une littéraire, qui sont désormais impossibles à maîtriser pour une seule personne, ce qui scinde la société en deux mondes largement étrangers l’un à l’autre.

Dans le petit monde des risques naturels en montagne, ces deux hémisphères se nomment sciences humaines et sciences dures, qui se sont départies les unes des autres et s’affligent mutuellement de ne savoir pas coopérer. Il y a donc eu une rupture. Peut-être les uns se sont-ils mis à dévaler la pente alors que les autres restaient accrochés aux sommets ?

Il apparaît aujourd’hui nettement que le monde est infiniment plus morcelé encore ; la possibilité offerte par le web de créer des échanges entre tout couple de personnes connectées, et entre des bases de données, des programmes réalisés par ces personnes, matérialise la difficulté à mettre en phase sémantiquement ces deux interlocuteurs potentiels (les faire « interopérer »). Les efforts vains de l’intelligence artificielle dans les années quatre-vingt, soldés par son abandon avaient déjà reconnu combien cet obstacle était fondamental et essentiellement infranchissable. L’impossibilité de faire une traduction automatique effective [8], l’extrême difficulté à construire un système expert, et généralement le peu de contribution qui en résulte dans la compréhension d’un phénomène sont liées entre elles et à cet obstacle sémantique. Il faut emprunter un autre chemin pour trouver un média par lequel par exemple un spécialiste des avalanches et un informaticien vont interagir, communiquer et coopérer pour construire un corpus de connaissance partagé. Une communication ne peut s’établir que par l’interaction sur un matériau commun ; il n’est pas nécessaire que ce matériau soit maîtrisé sous toutes ses facettes par les interlocuteurs, c’est même probablement défavorable, car une connaissance totale d’un objet par deux parties rend la communication inutile.

1.3.5.2 L'obligation d'en passer par un apprentissage

And though I hate do judge
before the facts are in . . .
—General Turgidson

In : Dr. Strangelove, Stanley Kubrick (Director).

On dispose donc d'idées générales qui permettent de proposer des composantes, et même des façons de les combiner. Cependant, pour régler les paramètres de l'ensemble, voire pour invalider certaines options, il faut absolument des données, des faits, qui serviront de vérité de référence.

En leur absence, on ne dispose d'aucun moyen pour réfuter les réponses du modèle définissant les zones de départ. sommes employés à former. L'expérience des systèmes passés confirme qu'on obtient des résultats qui se rapprochent approximativement de zones de départ connues. Mais en l'absence de données précises, un ajustement parfait n'a pas de sens, et l'erreur commise ne peut pas être analysée. On a une confirmation vague des hypothèses initiales, mais pas de moyen de les réfuter, ni par conséquent de les améliorer. En fait, on n'est pas en situation d'apprentissage, mais en boucle ouverte : il n'y a aucun moyen d'asservir notre système sur un objectif, selon les principes de l'automatique.

L'apprentissage automatique dit supervisé consiste à réaliser des associations entre des entrées et des sorties, à partir d'une ensemble de couples pris comme base d'exemples. On parle parfois aussi d'identification de processus, ou de « boîte noire », mais ce dernier terme ne dit rien de précis. Dans notre cas, les entrées pourraient être le relief et des données météorologiques, les sorties, le tracé constaté des zones correspondantes de départs d'avalanches. Il faut que les données soient au grain spatial et temporel de l'événement, assorties de champs nivo-météorologiques localisés, autant que c'est possible, car des vents opposés conduisent probablement à activer des zones en partie contradictoires, ce qui introduit des termes d'erreur dans un prédicteur.

Entrées et sorties sont représentées par des vecteurs numériques. Lorsque les vecteurs de sortie forment des classes discrètes, on parle de classification. S'ils se rapportent plutôt à un espace qui se représente de façon continue, on est dans le cadre traditionnel de la régression. Un cas simple à deux classes se raccorde à une régression sur une variable en fixant un seuil.

Parmi les processus pour établir l'association, les réseaux de neurones artificiels tirent leurs coefficients initiaux au hasard, ce qui donne génériquement une fonction très centrale dans l'espace possible. Puis ils réalisent une descente du gradient de l'erreur de prédiction commise en sortie. L'algorithme fondamental consiste rétropropager le gradient d'erreur sur l'ensemble des poids du réseau. Comme tous les processus d'apprentissage, ils favorisent

l'établissement de relations régulières, qui sont donc synthétiques par rapport au « modèle total » : la donnée de tous les couples entrée-sortie. Il en résulte une certaine généralité des réponses, si l'hypothèse que les données présentent effectivement de la régularité est vérifiée. Cela revient en somme à supposer que les couples discrets sont échantillonnés sur une fonction régulière, et aussi que les entrées sont informatives, c'est-à-dire que des entrées identiques ne donnent pas des résultats opposés.

Cette capacité de généralisation se teste en scindant l'ensemble des données en une base d'apprentissage, sur laquelle on fait converger le système, et une base de test, sur laquelle on vérifie le score de prédiction. On procède bien sûr en stratifiant le découpage en fonction de ce que l'on sait a priori des conditions de variation des paires. Par exemple, si on disposait de données issues de plusieurs massifs montagneux (supposés assez homogènes cependant pour qu'il soit pertinent d'établir une fonction globale), il serait raisonnable de répartir les ensembles d'apprentissage et de test sur les trois massifs.

L'expérience montre un comportement générique : au cours du processus d'apprentissage, l'erreur de prédiction décroît d'abord conjointement sur la base d'apprentissage et celle de test. Puis, tout en continuant à décroître sur la base d'apprentissage, elle se met à réaugmenter sur la base de test. On parle de surapprentissage : le système se met à prédire spécifiquement ce qu'il y a de particulier aux paires de la base d'apprentissage, au détriment de ce qu'elles contiennent d'information générale, telle qu'on peut la contrôler sur la base de test. En fin de processus, on se met donc à produire une fonction qui perd de la régularité en s'ajustant étroitement sur les paires d'apprentissage. Le contrôle sur la base de test permet de caractériser le début de cette perte de régularité.

2 Une approche des zones de départ par des méthodes de filtrage sur le relief

2.1 Méthode

2.1.1 Données (relief-météo)

La vallée de Chamonix a été choisie en fonction de l'exceptionnelle disponibilité d'un modèle du relief d'un niveau de précision inégalé, qui permet d'aller au-delà de ce qui a été fait ailleurs. C'est aussi un territoire très bien documenté, prometteur pour mettre au point une méthode qui par ailleurs dans ces principes vaut au moins pour tout le domaine pyrénéo-alpin.

On a utilisé :

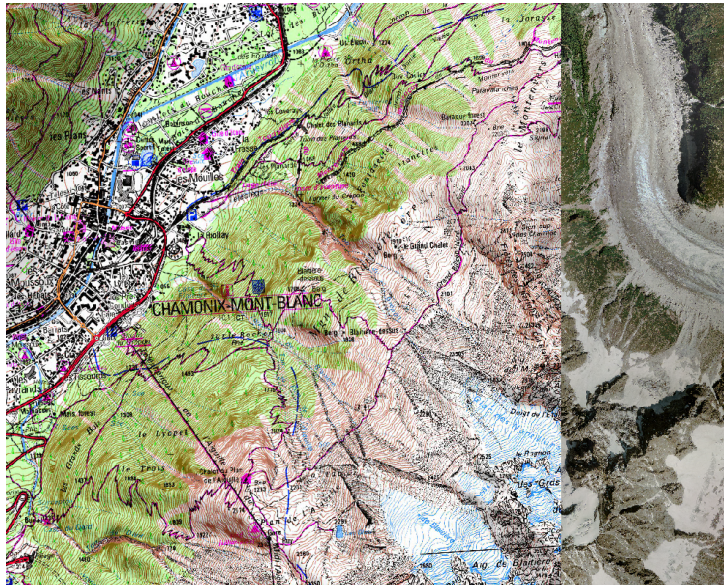


FIG. 5 – La zone de la vallée de Chamonix sur laquelle sont présentés tous les résultats qui suivent, vue sur le Scan25 de l'IGN, raccordé en marge à l'orthophotoplan.

- Un modèle numérique du terrain se présentant sous forme de courbes de niveau tous les 5 m, et le long de ces lignes une résolution en points variable, pouvant être inférieure au mètre. Établi par la régie de données Savoie et Haute-Savoie (RGD74), il est utilisable par l'équipe Etna à des fins de recherche. Sa résolution et sa qualité sont très supérieures à ce qui peut être usuellement disponible (des courbes de niveau à 25 m, établies par numérisation de cartes au 1 :50 000, au pas de 50 m, et par saisie photogrammétrique sur photographies aériennes). Frédéric Berger (Cemagref, Grenoble) y a identifié des défauts; sur de petites combes où des bosquets jouent un rôle protecteur crucial, les courbes suivent non pas le terrain mais l'enveloppe de la végétation, si bien qu'on voit un promontoire là où il y a une zone encaissée, avec un potentiel de risque en cas de déforestation. Le problème est relativement accessoire à ce stade de notre travail, et au niveau de détail auquel on peut prétendre accéder.
- Les emprises de la CLPA téléchargées sur Cartorisque [7].
- L'orthophotoplan livré par l'IGN, millésimé 2004 et leur Scan25 « version 2, édition 1.1 », février 2006.
- Pour le climat, Il faut s'en tenir à une description très globale, pour une

analyse assez grossière en termes de régimes dominants ou de scénarios typiques. On ne dispose qu'exceptionnellement de la description de la zone de décrochement relative à un événement daté et coordonné à une chronique météorologique. On va donc travailler sur l'information très moyennée de la CLPA, avec simplement la possibilité de moduler des scénarios grossiers de direction du vent pour privilégier certaines expositions, il faudra apprécier la pertinence de leurs effets sans pouvoir s'appuyer sur des données pour les contrôler.

Le Scan25 de l'IGN permet de se repérer par rapport aux structures anthropiques, de localiser les zones boisées. C'est aussi le fond de référence des emprises de la CLPA. La correspondance entre le Scan25, l'orthophotoplan et les données de relief est assez bonne, autant qu'on peut en juger à l'œil : il n'y a pas eu de discordances gênantes, pour les zones qu'on a analysées (une illustration figure 6).

2.1.2 Conditions imposées : développement sous ArcGIS

La partie imposée de l'exercice consistait à réaliser le développement sous ArcGIS, un logiciel de systèmes d'information géographique, leader dans sa catégorie, qui est en usage à l'unité de recherche Etna du Cemagref, et sur lequel notamment est réalisée la carte des avalanches. Il y sert donc naturellement de support pour manipuler des informations de zonage, pour visualiser les résultats de simulations, etc., d'où la demande. ArcGIS n'est pas un logiciel libre, et cela s'oppose avec l'objectif de diffuser les résultats des présents travaux aussi ouvertement que possible. Cependant, dans l'optique d'une mise à disposition de fonctionnalités à travers un serveur web, cette disposition n'a pas d'influence : celui qui établit le serveur met en place la configuration qui lui convient le mieux, et il existe un serveur web ArcGIS ; de son côté l'utilisateur exploite ses fonctionnalités depuis un simple navigateur.

2.1.2.1 Quel ArcGIS ? Après une longue plongée dans la documentation logorrhéique des multiples instances d'ArcGIS, il est devenu clair que le choix raisonnable était de se fixer sur la mouture Workstation.

Il existe en effet ArcGIS Desktop (la version opérant sous Windows) et ArcGISWorkstation (la version historique d'ArcGIS, initialement dans un environnement Unix, elle existe sous forme émulée intégrée à Desktop). Ces appellations sont celles utilisées depuis quelques années chez Esri, l'éditeur d'ArcGIS, elles n'ont pas toujours eu cours, et les documentations des parties anciennes n'ayant pas été mises à jour, même sous forme électronique, il peut être délicat d'arriver à savoir de quoi on parle quand on y lit un nom. Ces deux lignées d'ArcGIS sont de structures et de philosophies radicalement diffé-

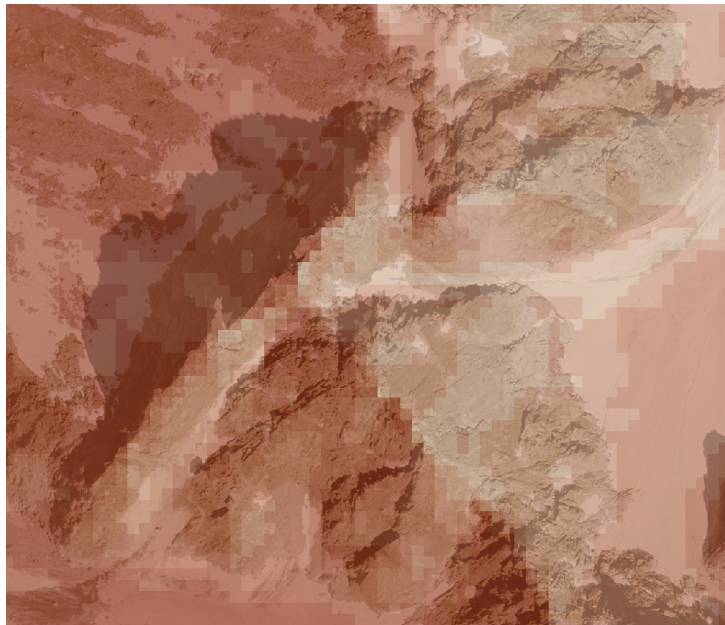
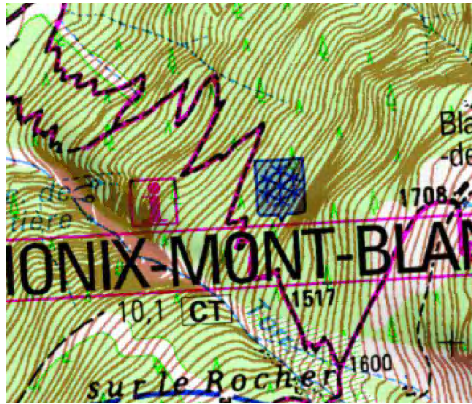


FIG. 6 – La correspondance entre orthophotoplan et modèle du relief s’apprécie bien sur ce détail de sommets. Le relief est montré avec des pixels de 10 m pour qu’ils soient bien visibles, superposés à l’orthophotoplan. Les teintes rosées sont sombres pour les expositions ouest, claires pour les expositions est. La démarcation se lit raisonnablement bien là où la photographie montre les crêtes (les ombres des sommets sont visibles sur la photo, le soleil étant au sud-est). Le mode exact d’établissement de l’orthophotoplan n’est pas explicité par l’IGN ; vraisemblablement, les points géodésiques, les sommets bien individualisés servent à obtenir un calage commun avec le Scan25, avec l’avantage que les erreurs absolues sont synchronisées sur les différents supports.



(a) Un détail du Scan25.



(b) Le même détail, avec superposition de l'orthophotoplan.

FIG. 7 – On trouve une bonne correspondance, à cette échelle, entre les formes visibles sur l'orthophotoplan et le figuré de la carte.

rentes, bien qu'un certain nombre de formats de fichiers soient communs. Un développement sous Workstation peut en principe fonctionner sous Desktop dans l'émulation, mais en aucun cas le contraire. En fait, Workstation est abandonnée depuis plusieurs années, et Esri ne la développe plus, voire y fait parfois quelques entailles qui grèvent ses fonctionnalités, et désire l'abandonner. Mais il a du mal à se résoudre à laisser ses utilisateurs au milieu du gué, et ce n'est pas par seule générosité. Si une version d'architecture considérée comme dépassée par son éditeur perdure, continue à être largement employée, c'est qu'il y a de bonnes raisons, très sensibles justement quand on traite des images.

Nombre de laboratoires et entreprises continuent à utiliser la forme Workstation, même en possédant des licences Workstation, et pas seulement par immobilisme ou peur du changement. Dans la première, les algorithmes pour s'exécuter ouvrent un fichier, y lisent des valeurs et effectuent leurs calculs. Dans la seconde, aussi, mais avec une nuance. Tous les éléments manipulés le sont à travers un graphe d'objets extrêmement lourd et complexe. Au résultat, pour appeler par exemple la valeur d'un pixel sur une image, sont invoqués une multitude d'objets emboîtés et leurs méthodes. Il est courant qu'un calcul demandant quelques secondes sous Workstation exige de longues minutes sous Desktop. Et quand ils demandent quelques minutes d'un côté, il y a de bonnes chances qu'ils n'aboutissent tout simplement pas de l'autre, ne serait-ce qu'en arrivant au bout de la patience de l'utilisateur. Le corrolaire est la consommation de mémoire au cours du calcul. Des traitements sur des images qui ne considèrent que quelques pixels à la fois, et donc peuvent en

principe s'exécuter pour une taille d'image quelconque doivent être restreints à de petites portions d'image sous Desktop sous peine de causer un crash d'ArcGIS. Il faut s'adonner à de complexes excentricités pour tuiler le calcul — de façon différente à déterminer par tâtonnements selon les fonctions appelées — et reconstituer une image entière en sortie.

Au cours du projet, nous avons migré de la version 8.3 à la 9.2, avec cinq installations distinctes et de multiples mises à jours de modules (*service pack*). Comme jusque sous la version 9.1, plusieurs des fonctions indispensables pour le présent projet ne fonctionnaient pas ou de façon complètement erratique, on comprendra que pendant une longue période on ait poursuivi l'option d'utiliser d'autres systèmes pour traiter les images, et de revenir à ArcGIS seulement en fin de processus, pour la visualisation cartographique. (On y réalise aussi l'étape initiale, le passage des courbes de niveau à une image du relief.)

C'est ainsi qu'on été testés Mustig, et Saga GIS, logiciels libres respectivement de traitement d'image et d'information géographique, après que de nombreux autres aient été envisagés et évalués. Pour des raisons d'efficacité, Matlab, un logiciel commercial de calcul disposant d'une collection de fonctions (*toolbox*) de traitement d'images, a finalement servi à la mise au point des traitements qui ont ensuite été rapatriés sous une forme approximative sous ArcGIS version 9.2 (avec ses extensions 3D et Spatial Analyst), enfin fonctionnel. Le calage sur un pixel permet de déporter les traitements et les rapatrier sans perte de localisation dans un système géolocalisé (Matlab comporte d'ailleurs une *toolbox* pour la cartographie). Matlab permet de disposer de multiples fonctions de calcul et de visualisation générales, et d'examiner efficacement dans le détail le comportement des traitements. Il possède au moins deux clones libres connus, Octave et Scilab ; cependant leur niveau d'avancement, surtout en matière de manipulations d'images, s'est éavéré insuffisant dans un contexte où il fallait faire un prototypage rapide. Basculer vers l'un de ces environnements est envisageable à moyen terme, si on se donne le temps de développer les fonctions dont on a besoin.

Les principales difficultés tiennent au temps de calcul de certains traitements, qui rendent l'expérimentation difficile. Par exemple, un filtre de diamètre x m sur des pixels d'un mètre implique de combiner de l'ordre de x^2 valeurs de pixel, et ceci pour chaque point de l'image à traiter, pour obtenir l'image résultat. On a pu expérimenter des filtres jusqu'à des rayons de 300 m ; il se peut qu'il faille en utiliser de plus grands. Mais les restrictions les plus importantes ont été rencontrées dans la partie initiale, spécifique aux logiciels d'information géographique, et donc réalisée dans ArcGIS (voir § 2.1.3).

Le traitement, pour être raisonnablement communiqué à un utilisateur, mis en place dans un outil de l'*ArcToolbox* baptisé **dezda**, pour détermination

des zones de départ d'avalanches. On en a un aperçu figure 8 page 40.

2.1.2.2 La programmation sous ArcGIS Pour livrer un modèle, on ne peut se limiter à lister une série de manipulations sur un logiciel. Il faut envisager un minimum de programmation pour pouvoir scripter les traitements, les encapsuler, les communiquer, les présenter comme un ensemble. La documentation d'ArcGIS pose à nouveau problème.

Le langage le plus ancien est AML (Arc macro language) sous ArcGIS Workstation, qui permet assez directement d'écrire des scripts des fonctions appelées sur la ligne de commande. Nombre de personnes continuent à développer leur programmes en AML [15], parce que le lien avec la pratique interactive que l'on a du logiciel est directe. Cependant, c'est un langage limité, du point de vue informatique. À partir de la version 3 de Workstation, Esri a proposé un langage qui lui est spécifique, Avenue, bien construit, avec une structure d'objets, et qui semblait prometteur comme moyen de développement stable à long terme.

Esri s'est alors engagé dans le développement des MapObjects, une structure d'objets compatible avec la spécification OpenGIS résultant des efforts de l'Open Géospatial Consortium (dans lequel il est fortement impliqué). Mais surtout, le monde initial des stations Unix a été abandonné au profit des systèmes Windows, en pleine expansion sur ce créneau de machines. Il y a eu une réécriture complète du logiciel dans l'architecture COM (*Component object model*) qui fonde tous les logiciels sous Windows depuis 1993. Contrairement à ce que leur nom indique, les composants COM ne sont pas des objets au sens informatique standard du terme (pour autant qu'il existe ; une grande variété de choses différentes sont baptisées objets). Il s'agit d'une convention d'interfaçage définie au niveau du binaire des programmes, et donc indépendante du langage utilisé, qui peut être quelconque pour peu qu'il dispose de certaines capacités comme de définir des pointeurs de fonctions. Cette architecture permet la conception de logiciels sous forme de composants autonomes interagissant à travers leurs interfaces. C'est ce qui permet par exemple de loger un tableau Excel dans un document Word, et de le voir apparaître et le manipuler comme tel. Excel s'exécute alors comme s'il était un composant, un fragment inclus dans Word. (Cette présentation est dans le détail un peu inexacte, bien que correcte dans l'esprit. Le fait de pouvoir constituer des documents composites de cette façon s'appelait initialement OLE, très apparenté à COM, qui le généralise en composants logiciels ; le contenu de ces technologies a évolué au fil du temps, et la façon dont ils ont été présentés par Microsoft, mêlant marketing et technique, et changeant au gré des stratégies, n'est pas faite pour les rendre lisibles.

ArcGIS est alors fondé sur une structure d'objets nouvelle, les ArcObjects. Les MapObjects continuent à exister et à être mis en avant, mais ils ne permettent d'accéder qu'à une fraction des possibilités du logiciel. Les ArcObjects ne sont pas en correspondance directe avec les objets COM. Certains blocs du logiciel, simplement, impliquant de nombreux ArcObjects, déclarent leurs interfaces au serveur COM et se comportent comme des composants logiciels, selon un mécanisme logiquement indépendant de la structure interne des ArcObjects. De façon visible, ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox, ArcGlobe, ArcScene se comportent comme des composants, tout en partageant de nombreux sous-composants.

Pour éviter la coupure majeure avec les développements, et même les utilisations antérieures d'ArcGIS, Esri a créé une couche d'émulation de l'architecture initiale, désormais baptisée Workstation, à l'intérieure de la nouvelle, nommée Desktop. Ainsi s'est mise en place une nouvelle série de tentatives de créer un langage adéquat d'extension sous ArcGIS.

Les documentations de chacun de ces langages, qui sont dépourvues de date pour la plupart (!) et de version de correspondance avec ArcGIS, stipulent chacune qu'il s'agit du langage puissant, polyvalent, idéal pour procéder à du scriptage, des automatisations, personnalisation et extensions du logiciel.

- Visual Basic pour Applications (VBA), est devenu d'office le langage de développement d'extensions, parce que c'est la règle dans l'architecture COM de l'environnement Windows. C'est depuis son interface de développement, que le plus de documentation des fonctions d'interface du logiciel est accessible, et pour une très large part, c'est le seul endroit où on peut la trouver. Cependant, une partie des possibilités ne peuvent pas être mises en œuvre depuis VBA : l'interfaçage n'a pas été mené à bout. Essentiellement, parce que VBA est structurellement inapproprié pour des développements importants, et trop pauvre pour supporter les structures disponibles dans le logiciel. Pour accéder à ces parties, il faut absolument passer à
- C++, le langage dans lequel a été écrit ArcGIS. Mais toute la documentation n'y est pas accessible. La stratégie courante consiste donc à commencer à développer en VBA, et au bout de quelques temps, quand on a bien identifié les objets en jeu, de migrer sous C++ si on a besoin d'aller un peu loin dans le développement.

Précisons qu'au contraire de ce qui existe dans des logiciels comme Word ou Excel, il n'existe pas d'enregistreur de macros, c'est-à-dire de moyen de faire manuellement des manipulations sous ArcGIS, et de récupérer le code VBA leur correspondant. C'est la manière la plus efficace de trouver le nom des objets, y compris des objets instanciés, qui sont mobilisés parmi la forêt de ce qui existe sous ces logiciels. Pour des

raisons mystérieuses, Esri s'est toujours refusé à répondre aux demandes des utilisateurs sur ses forums.

ArcGIS permet de toucher du doigt les difficultés inhérentes aux vastes nomenclatures. Les ArcObjects sont, dans la version 8.3, plus de 4000, et, même en connaissant les termes utilisés dans le logiciel comme utilisateur d'ArcGIS, rien ne permet de deviner a priori quel nom portent les objets de la série que l'on a besoin d'invoquer pour faire un traitement. Il y a quelques dizaines de diagrammes UML, tout juste lisibles lorsqu'ils sont imprimés au format A0, qui représentent les relations que ces objets entretiennent. On peut aussi, si on connaît un nom, chercher sur les fichiers PDF de ces diagrammes où apparaît tel objet, mais on ne peut alors lire que quelques centimètres carrés d'un panneau métrique.

Deux copieux ouvrages épuisés et introuvables aident à se retrouver dans les ArcObjects dans leur version 8.3, mais ceux-ci ont été très sensiblement modifiés depuis, et la documentation n'a pas été mise à jour. Le travail avec les ArcObjects n'est donc pas très facile au premier abord. Il y a un second inconvénient, durable lui, inhérent à l'architecture COM de Windows : une fois qu'un type d'objet existe, il n'est plus jamais supprimé ni modifié, pas plus que les interfaces par lesquelles on y accède. On en ajoute des doublons, des triplets s'il le faut, on n'en supprime jamais, même s'il a un comportement erroné. Ainsi pour écrire un programme à peu près robuste, il ne suffit pas d'une version, il faut interroger les interfaces à la recherche de toutes les versions, et opter pour la plus récente. Mais si elle n'est pas disponible, il faudra le cas échéant écrire soi-même les contournement nécessaires pour circonvenir une ancienne interface erronée. Il n'y a pas d'échappatoire car on ne peut jamais maîtriser dans quel environnement exact s'exécutera un objet COM. On ne peut pas non plus tabler sur la version la plus primitive, car les objets sont en fait collationnés dans des DLL qui sont mises à jour, peuvent être intimement liées à celles du système, et des incompatibilités apparaissent qui font que les anciens objets ne sont plus disponibles.

- Comme on l'a indiqué à propos de l'architecture COM, une très vaste gamme de langages peut être utilisée, mais avec des facilités diverses quant à la disponibilité d'interfaces côté ArcGIS.
- Python, un langage de script très apprécié et à la mode, est le dernier à avoir fait son entrée dans le giron des outils de développement sous ArcGIS. « Esri voit Python comme la langage qui remplit les besoins de sa communauté d'utilisateurs ». Mais il ne permet pas d'accéder à toutes les fonctionnalités ; et dès par exemple qu'on doit manipuler des éléments de l'interface (menus, etc.), on est obligé d'en passer par VBA.

Aux côtés de Python, on trouve aussi VBScript (un autre Visual Basic), JScript, Perl... avec tous la même limitation.

La liste n'est cependant pas achevée car en plus des inévitables .NET, C#, Java, qui permettent aussi de se raccorder aux fonctionnalités d'ArcGIS, il y a de multiples façons indépendantes et déconnectées d'invoquer presque toutes les fonctions, mais pas toutes, dans le logiciel, qui constituent en partie des moyens de réaliser des scripts. Dans les versions récentes, on a assisté à l'apparition d'une ligne de commande dans ArcGIS Desktop, qui permet d'invoquer un grand nombre, mais pas toutes, des fonctions du logiciel. Peut-être est-ce un encouragement aux inconditionnels de la version Workstation à faire leur migration. Cette migration est décidément difficile, si l'on considère le nombre d'applications qui restent dans l'architecture simple d'une collection de fichiers *shape*, éventuellement adossés à une base de données spatialisée, plutôt que d'adopter la géodatabase prônée par Esri depuis de nombreuses années (qui au passage, spécifique de cet éditeur, inféoderait complètement au monde d'ArcGIS).

Il va de soi que certaines des considérations qui précèdent sont éminemment péremptibles, elles relèvent d'un historique d'essais de développement, à travers une série de versions ; rien ne certifie que les domaines de possibilités énoncés ne soient pas modifiés à l'avenir. Les espoirs sont permis : la documentation de la version 9.2 a fait de sensibles progrès sur certains points techniques, comme d'employer les termes usités partout en mathématiques, théorie des graphes, géométrie, algorithmique, plutôt que des appellations ayant cours chez le seul Esri.

Les péripétie évoquées ci-dessus ne sont naturellement pas documentées, et il faut jouer à l'enquêteur lorsque, comme c'est la situation à Etna, se pose nettement la question de savoir dans quelle configuration d'ArcGIS il est raisonnable d'entreprendre un développement qu'on espère un peu durable. Une fois les méandres parcourus, les interlocuteurs d'Esri France confirment tout à fait les pérégrinations qu'a connues ce logiciel, les réponses aux devinettes que pose la documentation, les options raisonnables de développement à prendre, dans le contexte où nous sommes.

2.1.2.3 Intégration de l'ensemble en un modèle dans ArcGIS Figure 8.

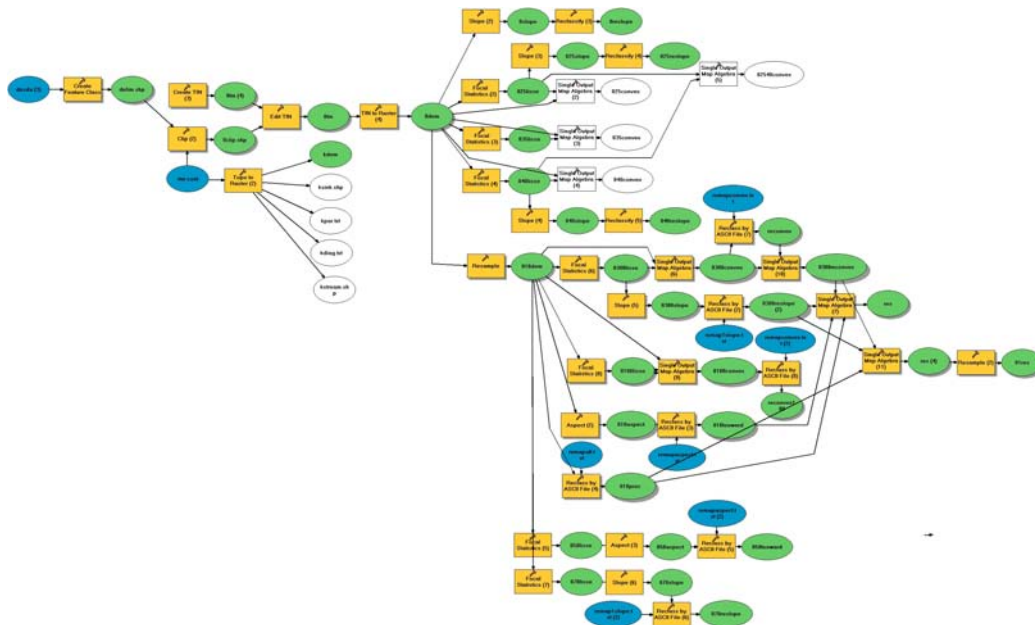


FIG. 8 – Le diagramme en graphe orienté de l’essentiel du modèle *dezda* dans ArcGIS. Il s’agit d’un outil ajouté à l’*ArcToolbox*. Chaque étiquette en rectangle symbolise un traitement, chaque ellipse un fichier de données (en bleu — sombre), intermédiaire de calcul ou résultat (en vert — clair). Ce mode de représentation amène parfois une inflation du graphe pour des traitements pourtant conceptuellement simples. (Le texte des étiquettes n’est pas supposé lisible à l’impression — il l’est sur la version PDF —, le diagramme est donné à titre indicatif.)

2.1.3 Principe de la méthode et résultats

Il y a deux structures possibles de données pour représenter un relief. Faut-il travailler sur un TIN (*triangular irregular network*, autrement dit un semis de points dont on tire une triangulation de Delaunay) ou sur un raster (bitmap, image en pixels, avec une trame carrée)? Le premier est nativement plus proche des données acquises, qui consistent ultimement toujours en des relevés de points. Le passage à des pixels se solde donc toujours par une approximation. Cependant, la construction d’algorithmes est nettement plus délicate sur un pavage de triangles, et beaucoup de traitements faciles sur une image n’y ont pas de bons équivalents, à quoi s’ajoute souvent une plus grande complexité. De plus, sur un TIN, il n’est pas simple de jouer sur l’échelle du traitement à laquelle on opère. Un processus normal de levé topographique consiste à caler la densité de points sur la fréquence locale des variations du relief, d’où un TIN au maillage variable. Au contraire, la taille des pixels est uniforme.

Elle fixe aussi le niveau plancher du détail de relief qui peut être représenté. Il faut donc se réserver une marge de résolution, ne commencer à traiter et interpréter les formes qu'à partir de deux fois la taille d'échantillonnage initial des pixels.

Dans le modèle *dezda*, on commence par sélectionner une zone sur laquelle effectuer le traitement. C'est une opération naturelle, mais ici elle est contrainte par le fonctionnement d'ArcGIS. Pour obtenir le relief codé sur des pixels on passe par un TIN, le processus semble donner un résultat fidèle aux courbes de niveau données. Le calcul ne peut être mené que sur une zone restreinte (Un TIN sur une zone de 7,5 km de côté, sur nos courbes de niveau, occupe 120 Mo sur le disque ; son réaffichage prend près de 7 mn, sur ma machine.

Le relief est donc une image, calée avec des pixels de un mètre de côté, ayant pour valeur l'altitude locale. Cette résolution est correcte par rapport aux courbes de niveau initiales, et pratique pour raisonner. Tous les traitements produisent à leur tour des images ; pour réduire le temps de calcul on peut passer par des intermédiaires à des résolutions moindres ; on revient cependant à la valeur initiale pour pouvoir effectuer des opérations pixel à pixel entre plan images, notamment pour produire le résultat final.

Les connaissances sont mise en œuvre par un choix de filtres et algorithmes appliqués aux images, et les calculs de combinaisons entre elles.

Toutes les données sont apportées sous formes d'images, qui représentent cartographiquement le territoire d'étude ou sous forme de lois appliquées sur ces images, écrites sous forme de filtres, qui produisent en sortie des images superposables aux premières : sur l'image du relief par exemple, chaque pixel a pour valeur l'altitude locale.

2.1.3.1 Échelles. Figure 9

On obtient un relief considéré à différentes échelles en appliquant un filtre moyenneur.

On a exploré une grande gamme de lissages par des filtres moyenneurs en forme de disque, à la recherche des échelles appropriées au repérage de chaque effet. La valeur de chaque pixel de l'image de sortie est la moyenne de tous les pixels compris dans le rayon r du disque sur l'image d'entrée, ce qui signifie que la complexité du calcul croît comme r^2 . Sur les images traitées, le rayon maximal praticable a été de 300 m, encore a-t-il fallu sous-échantillonner l'image initiale à 10 m au préalable, puis revenir en sortie à 1 m, pour que le calcul soit praticable. On a vérifié que le résultat ne divergeait pas problématiquement de celui obtenu par calcul direct.

Par un malencontreux effet de vocabulaire et de sens de conventions, l'expression « à grande échelle » se trouve orienter un axe d'échelles à l'opposé

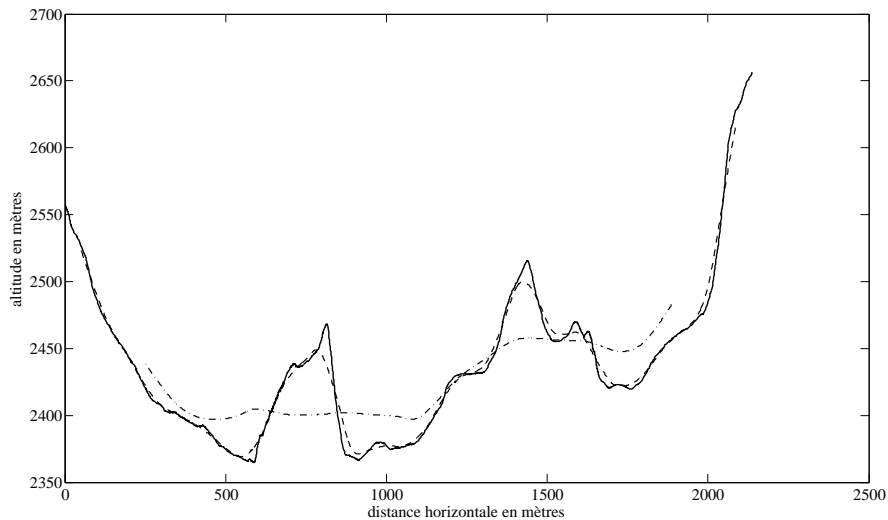


FIG. 9 – Profil d’une portion de relief de la vallée de Chamonix, à sa résolution native sur les images utilisées dans cette étude, en trait continu, et à deux résolutions obtenues par filtrages passe-bas (un lissage). Le profil en trait interrompu est produit par convolution avec un noyau moyennneur de largeur 50 m environ ; celui en trait mixte, avec un noyau d’environ 250 m. Un filtre de taille t gomme tous les détails significativement inférieurs à lui. Sur ce principe on peut former toute une famille de courbes qui constituent un espace d’échelle continu de paramètre t . En pratique, ce sont essentiellement les noyaux gaussiens qui produisent des espaces d’échelle sans qu’aux échelles grossières n’apparaissent de figures parasites qui ne sont pas la simplification de structures plus fines. Cette approche par lissages permet de choisir à quelle échelle on juge une pente, une forme. Le principe est exactement le même sur une image, avec des convolutions à deux dimensions. (ArcGIS ne dispose pas de filtres gaussiens, on s’est contenté de filtres moyennneurs.)

des valeurs ordonnées d'une échelle de carte, où une grande valeur de l'échelle fait voir une petite portion d'un territoire, et une petite une vue d'ensemble. L'inversion provient du fait qu'on parle d'un étalon appliqué au territoire, dans un cas, et du rapport entre une carte et le territoire, dans l'autre. C'est bien un cas de polysémie, et non une faute d'emploi ; on a affaire à deux concepts bien différents, avec un nom identique. Une situation fréquente, conséquence de la souplesse sémantique de la langue, et sa capacité à se différencier. Les usages du langage courant, et des scientifiques, d'un côté, et ceux des géographes et cartographes, de l'autre, étant solidement ancrés, il faut bien faire avec cette bascule permanente.

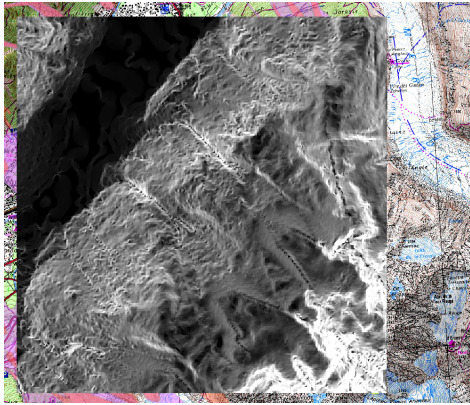
Le travail sur un espace d'échelle peut aussi être utile pour travailler sur des simulations d'écoulement. Les avalanches glissent souvent sur d'épaisses couches de neige indurées plutôt que sur le sol. Un lissage bien choisi livre alors un modèle de la surface plus réaliste que le terrain nu.

2.1.3.2 Pentés. Figures 10, 11, 12, pages 44 à 46.

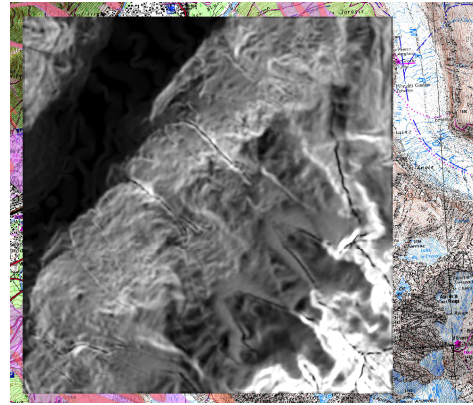
On a vu que les pentes supérieures à 55° se purgent fréquemment lors des précipitations, avec corrélativement accumulation de neige en pied. Il faut résister à la tentation de proposer un calcul itératif qui utiliserait un modèle d'écoulement, même simple, pour simuler cet effet, auquel on proposerait une précipitation de neige en entrée.

2.1.3.3 Concavité. Figures 13, 13 et 14 page 48 et 49. D'une façon générale, on sait que les aspérités d'un relief sont atténuées par une couverture neigeuse, la surface visible est régularisée. Les creux sont comblés, les saillies arrondies, à des échelles qui se rapportent à l'épaisseur de neige. Comme on l'a vu § 1.3.2.3.2 page 11, le mouvement de l'air potentialise et oriente la tendance à la régularisation de la surface visible produite par un dépôt de neige en air calme en décalant les formes du relief.

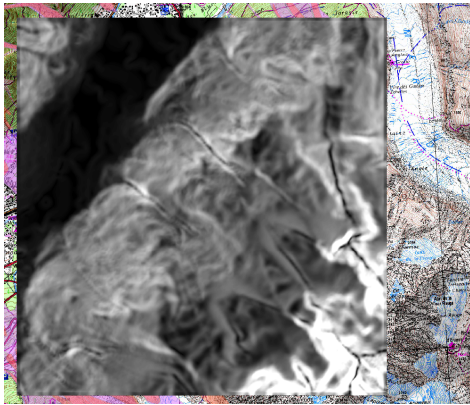
Dans le cadre de cette étude, la concavité s'exprime relativement à deux échelles de lissage du modèle de relief. Sur la figure 9, par définition les zones convexes sont celles où la courbe d'échelle la plus fine se trouve au-dessus de celle d'échelle plus grossière, et réciproquement pour les zones concaves. L'orientation pour définir la convexité est celle du sens courant : par exemple, la terre, est vue de l'espace comme un corps convexe. Cette convention correspond à celle adoptée en topologie, la terre, prise comme un ensemble est convexe car elle contient entièrement tout segment joignant deux de ses points. Mais par une conjonction un peu malheureuse, la définition qui a cours en analyse qualifierait de concaves les parties de courbes que nous qualifions de convexes sur la figure 9 : en analyse, une fonction est dite convexe si pour tout



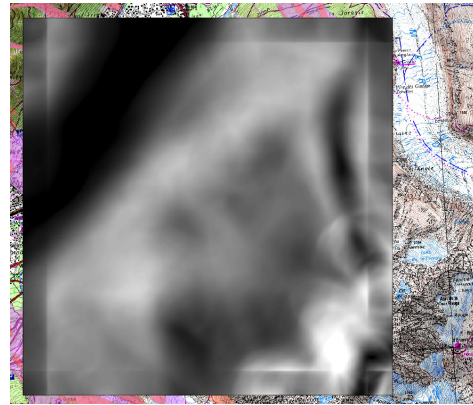
(a) Les pentes, sur l'image initiale du relief.



(b) Les pentes, sur le relief filtré par un disque de rayon 25 m



(c) Les pentes, sur le relief filtré par un disque de rayon 40 m

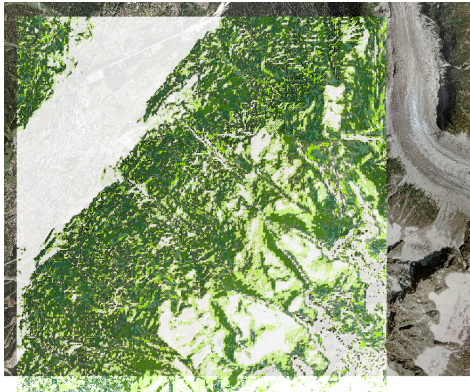


(d) Les pentes, sur le relief filtré par un disque de rayon 300 m

FIG. 10 – L'effet de différents lissages du relief, sur la visualisation des pentes. L'horizontale est noire, une presque verticale est blanche. On observe que les pentes importantes, sur ce versant, sont près des sommets, puis dans la portion dominant immédiatement la vallée. Les différentes échelles (au sens de l'espace d'échelle, et non au sens cartographique) sont plus ou moins parlantes pour nous donner l'impression globale qu'on recherche. Elles sont aussi plus ou moins pertinentes comme composante dans un modèle. À l'échelle 300 m, on voit apparaître les artefacts de bordure, où une partie du filtre est à l'extérieur de l'image. (En pratique, on doit éliminer cette bande perturbée, quelle que soit la taille du filtre.)



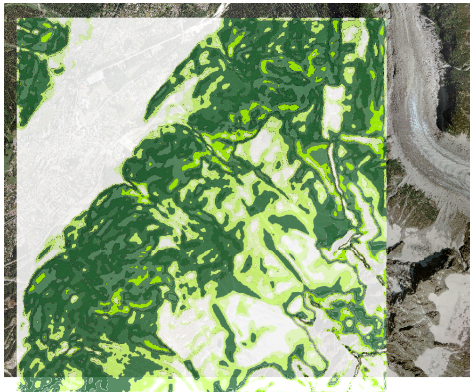
FIG. 11 – Propension aux départs d’avalanche, selon la pente, sur un relief filtré à 300 m. La pente est calculée par ArcGIS sur un voisinage 3×3 , par un simple calcul de différences. Appliqué à une image lissée, cet algorithme livre des pentes vues à l’échelle correspondante. L’image obtenue est à son tour filtrée selon le principe d’une LUT (*lookup table*) : la valeur de chaque pixel (une pente en degrés) est transformée en son image par la fonction figure 4 page 21, avec pour résultat une image où les tendances aux départs d’avalanches sont affichées en un vert d’autant plus sombre qu’elles sont fortes. L’orthophotoplan est visible par transparence, il aide à se situer en contexte, lui et la zone d’affichage des résultats se débordent mutuellement pour qu’on puisse voir les couleurs de chacun sans mélange.



(a) Les pentes du relief initial reclassées d'après la LUT 4.



(b) Les pentes du relief filtré à 25 m reclassées d'après la LUT 4.



(c) Les pentes du relief filtré à 40 m reclassées d'après la LUT 4.



(d) Les pentes du relief filtré à 300 m reclassées d'après la LUT 4.

FIG. 12 – Les pentes, vues à différentes échelles (c'est le rayon du disque moyenné qui est donné), reclassées d'après leurs propensions théoriques à donner lieu à des départs d'avalanches. Ainsi, des pentes très raides, ou douces se retrouvent dans le même figuré (ce sont les deux queues de distribution).

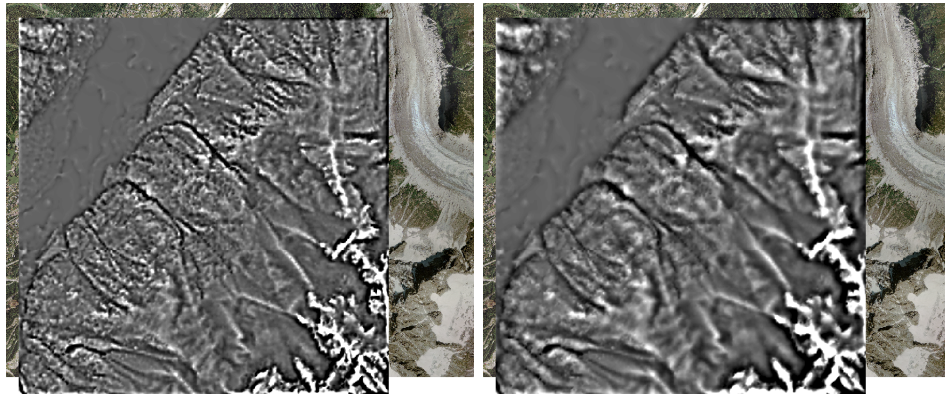
intervalle de son domaine, sa valeur au milieu de l'intervalle est inférieure à la moyenne de ses valeurs aux extrémités. Les analystes regardent les graphes des fonctions par en-dessous. . . Quoi qu'il en soit, avoir une définition relative de la convexité est extrêmement favorable pour traiter des questions physiques, pratiques, concernant le monde réel sur lequel on effectue des mesures. En l'occurrence, cette relativité s'exprime ici par un paramètre d'échelle [20].

Le choix de composantes de base adéquates peut simplifier radicalement les efforts de modélisation. Reprenons quelques assertions énoncées plus haut (dans un langage déjà plus général que leur première formulation) : pour avoir une avalanche, il faut accumuler de la neige ; la neige s'accumule particulièrement dans les concavités du relief ; une rupture de pente convexe de plus de 10% favorise la rupture du manteau neigeux. Avec un seul opérateur, on peut rendre compte de toutes ces règles. Il suffit d'établir un indice de convexité à un rapport d'échelle quelconque, comme on vient de le faire. En effet, comme les pentes des montagnes sont finies et qu'une montagne est globalement convexe, ou encore, comme la courbure globale de la terre est positive, une zone concave est nécessairement délimitée par une frontière convexe. Il y aura donc une rupture de pente, sa valeur est donnée par la convexité locale. Avec un seul opérateur, on peut rendre compte de tous les effets rapportés, avec en sus la maîtrise effective de l'échelle à laquelle on exprime ces effets.

De même, il est inutile de distinguer une concavité le long d'une courbe de niveau et une autre le long de la ligne de plus grande pente, comme les logiciels de SIG se donnent pour règle de le faire, et qui ne correspond pas à un algorithme direct. Il vaut mieux épuiser les possibilités offertes par des filtres naturels avant d'en ressortir à des algorithmes trop particuliers.

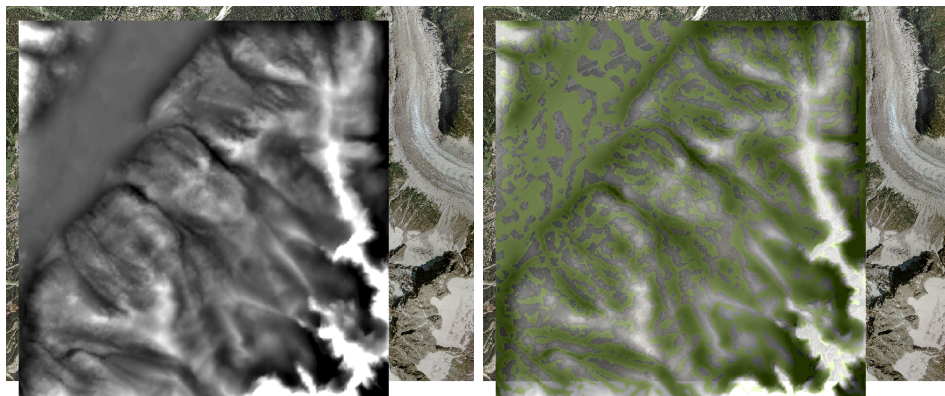
De façon évidente, une avalanche qui se développe sur une surface convexe, à moins de parvenir à y déclencher une rupture généralisée de plaques (cette amplification n'est pas possible sur un manteau lâche), et donc à mobiliser des masses croissantes, aura tendance à étaler sa matière et donc à s'épuiser. Au contraire, si elle évolue sur une surface concave, elle conserve au mieux sa masse et concentre son énergie. Ceci vaut pour le couloir où elle progresse, mais on a vu figure 4 que pour ce qui est cette fois de la zone d'initiation, la situation effective était plus indécise ; finalement, le savoir ne paraît pas si bien établi.

2.1.3.4 Altitude. Figure 15. D'une façon générale, le pronostic de danger est accru par l'altitude d'une zone propice aux départs. L'énergie potentielle augmente, et sauf configuration de terrain très spécifique, la possibilité de menacer des terrains est accrue. Une zone favorable mais sans pente libre



(a) Concavité après filtrage à 50 m.

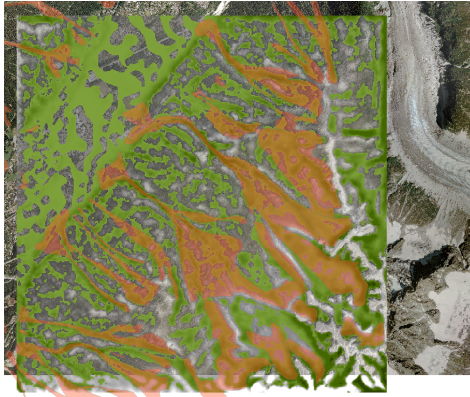
(b) Concavité après filtrage à 100 m.



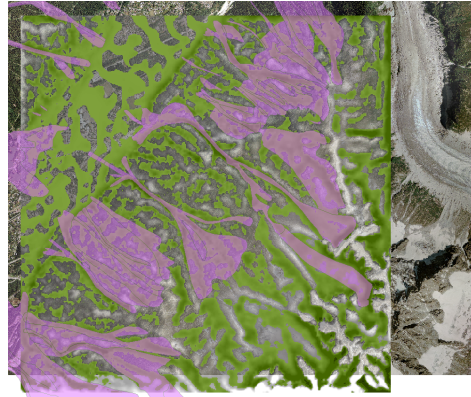
(c) Concavité après filtrage à 300 m.

(d) Partie convexe à 300 m, en blanc et gris, découpée en vert d'après la partie concave à 100 m.

FIG. 13 – La concavité, et naturellement la convexité, vues à différentes échelles. Du plus convexe en blanc, au plus concave en noir. Sur ces images, on distingue nettement les incisions dans le bas du versant, nettement mieux que sur l'orthophotoplan. De même les moraines en bout des reliques de glaciers sont nettement ourlées, les pics rocheux bien lisibles en blanc. On peut apprécier les différences produites dans l'espace d'échelle en comparant ces images entre elles. La figure 13d montre comme il est facile d'extraire des zones, selon une tranche de valeurs de concavité ou convexité. La zone de valeurs négatives (concaves sur l'image 13b (à 100 m), sert de masque pour extraire une partie de l'image 13c. On peut lire les variations de courbure dans la zone extraite en nuances de vert.



(a) La figure 13d, avec en superposition les emprises photo-interprétées de la CLPA.



(b) La figure 13d, avec en superposition les emprises issues de témoignages de la CLPA.

FIG. 14 – Les zones concaves correspondent plus systématiquement avec les aires de photo-interprétation qu’avec celles de témoignages.

sous-jacente sera à peine remarquée. Mais ce n’est pas l’altitude des reliefs qui est en elle-même déterminante de départs d’avalanches, mais leur morphologie. L’altitude ne joue donc aucun rôle « en soi ».

En revanche, on a vu § 1.3.2.3.2 page 11 que les reliefs induisent des précipitations et des effets du vent couplés avec l’altitude.

On a donc une sorte de composante indifférenciée, qui n’est ni une altitude seule, ni une épaisseur de neige précipitée, on peut la comprendre comme un potentiel d’avalanches. Il faudrait expérimenter réellement l’effet de cette courbe, sa pertinence.

2.1.3.5 Exposition. Pour prendre en compte lapidairement l’effet du vent, on peut donner un potentiel d’initiation d’avalanches supérieur aux pentes sous le vent, réputées récolter plus de neige. Par mesure de simplification, on prend un champ de vent uniforme sur toute la zone considérée ; il y a une seule direction du vent sur tout le paysage.

C’est évidemment une vue très grossière de l’effet du vent. Une facette de terrain est considérée comme ayant un potentiel de départ d’avalanches accru, simplement parce qu’elle regarde sous le vent, indépendamment de sa position dans le relief. On sait bien, pourtant, que la situation est très différente selon qu’elle se trouve en pied de versant ou près du sommet, et aussi selon ce qu’offre le relief situé au vent. De grands espaces réguliers sont propices à la reprise de neige ; inversement, un obstacle abrupt important arrête le transport, et la neige n’arrive jamais sur le versant abrité.

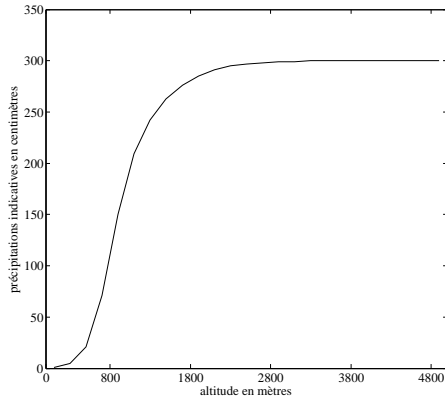


FIG. 15 – Pour exprimer le couplage des précipitations avec l’altitude, une loi en forme de sigmoïde est assez réaliste. Pour notre modèle, elle n’a pas besoin d’être spécialement bien calibrée, il lui suffit d’être indicative d’une tendance, puisqu’au moment de combiner toutes les composantes, elle peut se voir affecter un coefficient quelconque. Dans une application future, on peut imaginer la paramétrer (par exemple la représenter par un neurone, dans un réseau de neurones artificiels).

On a pris le parti de ne pas essayer d’entrer dans une modélisation du transport du vent, avec les moyens inappropriés dont on dispose. La première raison pratique est qu’on ne peut éviter de décupler la complexité des calculs, ce qui finit par rendre le modèle inutilisable. Si on veut affiner la représentation des effets du vent, c’est à un modèle physique du transport qu’il faut faire appel. Si on dispose d’un tel modèle, et de la puissance de calcul qui doit aller avec, il est possible de l’insérer dans le notre en produisant des sorties sous forme d’images.

Il est cependant possible de capter certains effets avec des combinaisons de filtres. Par exemple, pour exprimer que les pentes près des sommets captent beaucoup de dépôts. Il faut encore remarquer que la notion de sommet n’a pas de sens pratique sans un terme d’échelle : une bosse d’un mètre fait aussi bien sommet que le Mont Blanc. Il suffit d’en mettre deux photographies côte à côte pour se rendre compte à quel point l’une peut évoquer l’autre. En lissant le relief à une échelle donnée, on ne conserve que les sommets d’une taille appropriée (et non d’une *altitude* donnée). On peut donc par simple seuillage former un masque qui détermine quelles zones sont près de ces sommets-là, et s’en servir pour sélectionner les facettes sous le vent, vues elles à l’échelle qui leur correspond. En élaborant ce procédé, on peut même envisager de repérer les crêtes susceptibles de porter des corniches, en fonction du vent portant.

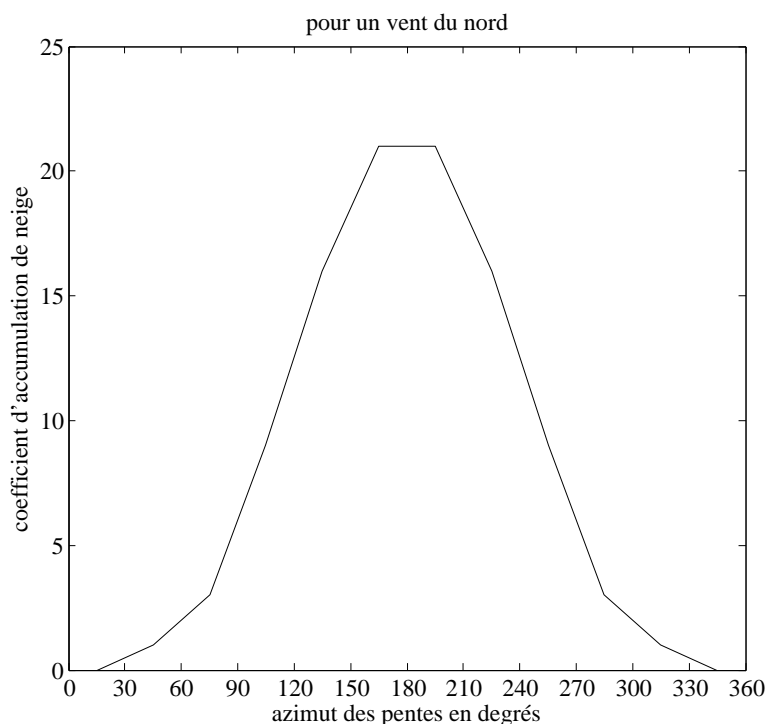
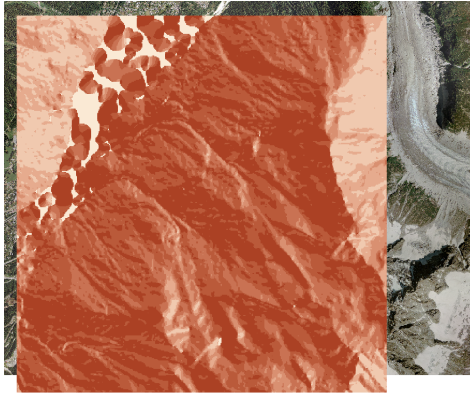


FIG. 16 – Cette courbe gaussienne exprime que les pentes sous le vent sont plus propices aux départs d’avalanches, parce qu’elles accumulent plus de neige. Pour un vent du nord (360°), ici, les faces au sud (180°) reçoivent un coefficient maximal, qui décroît jusqu’à zéro autour des expositions nord. Il suffit de décaler la courbe pour rendre compte d’un vent quelconque. Dans le modèle, on commence par former une image des expositions à un niveau d’échelle choisi, puis on reclasse l’azimut de chaque pixel en utilisant une table de cette gaussienne approximative comme une LUT.

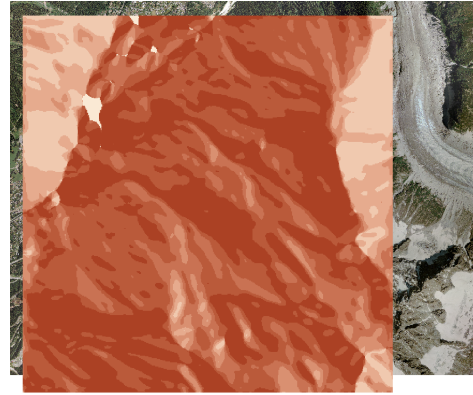
Les calculs d’exposition peuvent aussi éventuellement permettre de rendre compte des effets d’ensoleillement direct.

2.1.3.6 Combinaison des composantes Les composantes sont toutes établies et ordonnées comme facteurs actifs dans la détermination des zones de départ. Globalement, une conjonction logique (opération qui se raccorde avec un produit sur les réels, que l’on peut alors assortir de coefficients) réalise une synthèse vraisemblable de tous les effets.

On a évoqué la possibilité de réaliser des combinaisons plus complexes § 2.1.3.5 ; leur exploration n’est possible qu’à la condition de pouvoir mieux intégrer l’ensemble du modèle, pour pouvoir explorer interactivement l’effet



(a) Les azimuts d'exposition du relief, vus sur le relief rééchantillonné à 10 m, et reclassés par la courbe figure 16, pour un vent du 90 (d'est).



(b) Les azimuts d'exposition du relief, vus sur le même relief lissé à 50 m, et reclassés de la même façon.

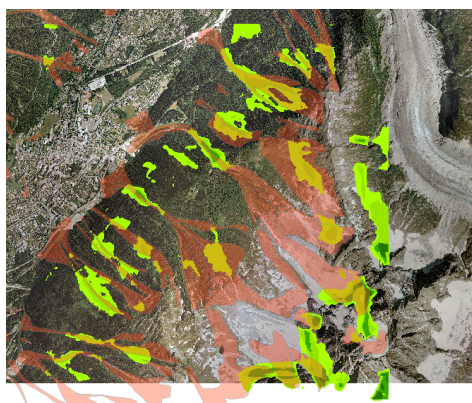
FIG. 17 – Les zones les plus sombres sont exposées à l'ouest (au 270), les plus claires à l'est. On distingue bien l'effet d'échelle, qui permet de choisir quelle amplitude d'aspérités du terrain est prise en compte. Le jeu sur les échelles permet par exemple, si l'on sait avoir plusieurs mètres d'épaisseur de neige en place, de négliger tous les petits reliefs.

des paramètres sur les sorties (§ 3.

3 Travaux futurs et perspectives ouvertes par cette approche

Obtenir une réponse dynamique du modèle, permettant un travail interactif. La première prolongation que l'on peut vouloir à ce travail est de construire un système permettant d'explorer interactivement les effets des paramètres du modèle. Obtenir un temps de réponse convenable est envisageable sur de petites zones, en précalculant ce qui peut l'être, notamment l'espace d'échelle du relief. L'idéal est une sortie dans un visualiseur comme World Wind, ou ArcGlobe. En modifiant rapidement les points de vue sur le relief, on peut apprécier les formes et mieux comprendre les résultats. Il existe même la possibilité de produire des sorties stéréoscopiques, que l'on examine avec des lunettes adéquates, ce qui déploie encore les capacités exploratoires et d'intégration sensorielle. Les figures 20, 21, 22, bien que statiques, donnent une idée de ce qu'offre cette interactivité.

Il est probable que World Wind, un logiciel libre porté par la Nasa, de



(a) Zones de départ prédites et emprises photo-interprétées.



(b) Zones de départ prédites et emprises issues de témoignages.

FIG. 18 – Les zones de départ prédites sont dans un vert d'autant plus sombre qu'elles sont susceptibles de donner lieu à des départs d'avalanches, selon le modèle *dezda* ; elles sont superposées aux emprises de la CLPA (en magenta, ce sont celles issues de témoignages, en brique, celles photo-interprétées), et à l'orthophotoplan. La superposition de ces colorations les combine en synthèse additive, le vert donne un brun clair sur le magenta, un brun orangé sur le brique. Certaines aires vertes sont sur le versant regardant la Mer de glace, qui n'est pas cartographié dans la CLPA. D'autres correspondent à des zones boisées, où cependant sont tracées des avalanches dont la mémoire a été conservée. Pour les zones vertes situées dans la partie médiane d'une emprise, la CLPA sans une notice détaillée ne peut servir de moyen de savoir si des départs y ont été constatés (et ses éléments de photo-interprétation sont inopérants). Enfin, il y a des aires vertes ne correspondant à aucune emprise CLPA. Ici, seul le regard critique d'un spécialiste peut apporter des explications. Les parties hautes d'emprises CLPA qui hébergent des zones vertes en débordent, elles semblent monter jusqu'à la crête. Les franges y sont exclues par le modèle parce que les pentes sont excessives. Il faut se rappeler que *dezda* réalise une analyse pure du relief tel qu'on le lui communique ; aucun observateur ne peut se confiner à cette seule entrée, il mobilise tout un faisceau de perceptions. Un des intérêts de pousser à fond l'étude du modèle est de comprendre jusqu'où on peut aller avec la seule donnée du relief.

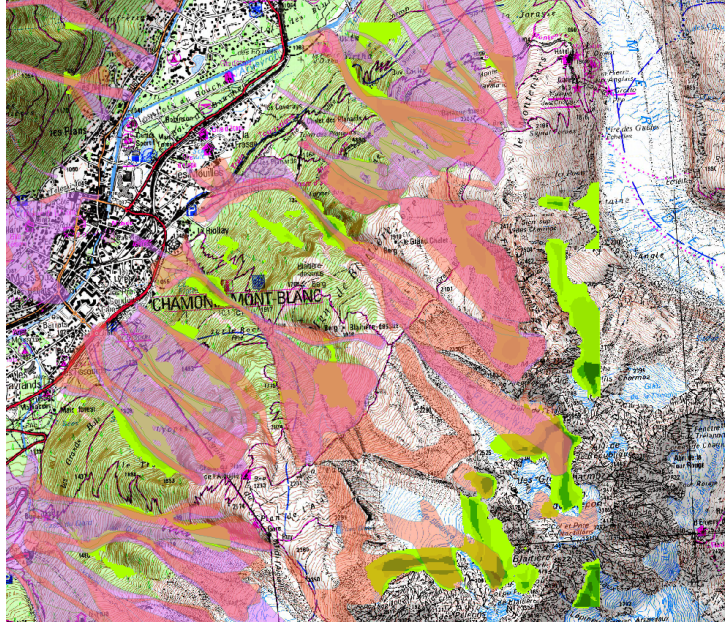


FIG. 19 – Emprises CLPA et zones de départ prédites sur fond Scan25.

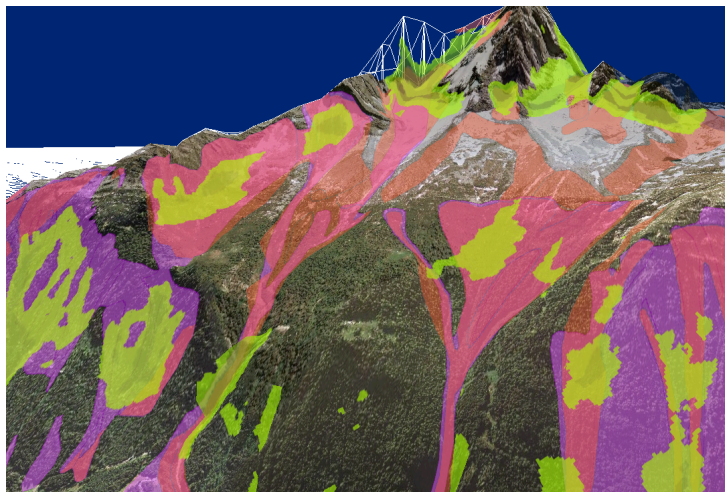


FIG. 20 – Le versant, vu d'un secteur est.

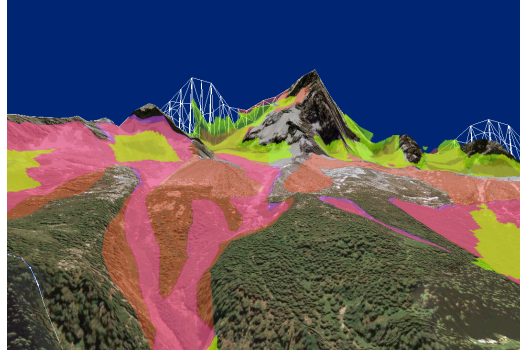


FIG. 21

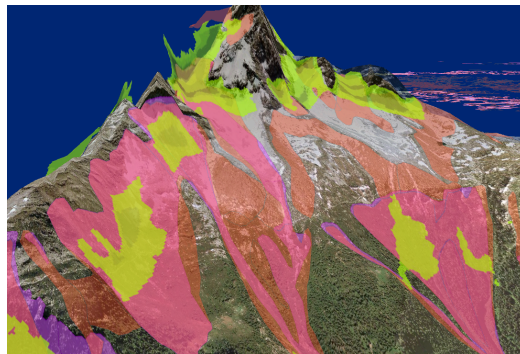


FIG. 22 – Le même secteur, dominé par l'aiguille de Blaitière. Les deux glaciers visibles sont de gauche à droite, celui des Nantillons, et celui des Blaitières. Il est difficile de se prononcer sur la pertinence des zones de départ prédites.

fonctionnalités comparables à Google Earth, mais entièrement paramétrable, permette une bien meilleure intégration avec une dynamique de réponse adéquate. Il en existe désormais une version Java, qui offre la possibilité immédiate de servir ces données avec un simple navigateur web comme client, étendant à la fois les modalités de travail et les possibilités de diffusion des résultats.

Le point clef est de disposer du modèle dans un environnement permettant le *streaming*, c'est-à-dire de sélectionner dynamiquement une portion d'une image, qui peut être immense, et la soumettre à tout le processus de traitement, pour pouvoir visualiser la sortie. On peut alors soit se déplacer dans l'image globale, soit modifier les paramètres du modèle et observer le résultat. Des expériences menées sur l'Orfeo toolbox, une autre initiative logicielle libre, supportée par le Cnes, pour mettre à disposition de larges bibliothèques de traitement d'image, semblent indiquer qu'elle peut servir de support à ce travail, avec justement ces capacités de *streaming*.

Une réponse dynamique ouvre la possibilité d'une optimisation des paramètres, en fonction de sortie de référence — qui sont indispensables, qu'elles soient fournies par l'expérience de l'expérimentateur ou, mieux, issues d'observations précises. Permettre à un spécialiste de disposer d'une véritable boucle de rétroaction serait déjà un progrès sensible par rapport aux conditions actuelles. Cependant, la véritable avancée serait de disposer de sorties de références (des zones de départ tracées spatialement, solidement établies), et de réaliser l'apprentissage automatiquement, par exemple avec des réseaux de neurones artificiels pour explorer l'espace des paramètres.

Le modèle invite à travailler selon des scénarios. Les départs d'avalanches sont a priori étroitement liés aux conditions nivo-météorologiques, avec des effets de chroniques pouvant s'étaler sur des semaines, voire des mois, et des effets immédiats très importants. Plutôt que de chercher à qualifier directement des périodes de retour d'avalanches, ce qui est à la fois délicat et assez dépourvu de sens, si l'on considère que les avalanches que l'on peut observer en un endroit peuvent être de types très différents, on peut se référer à des scénarios, et renvoyer l'évaluation de leurs probabilités à une étude météorologique.

Les scénarios sont immuables, ils se caractérisent bien, alors que les probabilités sont incertaines, remaniées par chaque nouvelle information. Cette décomposition peut s'avérer très propice dans un contexte climatique a priori non stationnaire, où l'hypothèse habituelle que savoir tout ce qui a été permet d'envisager tous les futurs possibles ne tient plus. Par ailleurs,

en raisonnant en scénarios, on est plus enclin à imaginer par exemple deux avalanches d'ampleur moyenne, consécutives à des précipitations fraîches, se succéder de telle façon que la première comble une digue et permet à la seconde de sauter par-dessus. En étant focalisé sur des périodes de retour d'avalanches, ce genre d'intuition est moins spontanée.

Explorer toute la gamme des échelles avec des données lidar. On a vu que même le modèle du relief en courbes de niveau à 5 m présentait quelques défauts, et quoi qu'il en soit, des détails plus fins peuvent avoir un effet significatif sur les départs — et la propagation — d'avalanches. Accéder à la limite de résolution utile (et accessible aujourd'hui : quelques centimètres) est donc une perspective très intéressante pour éliminer une des multiples sources de bruit dans les données de modélisation des zones de départ. La résolution et la précision offertes par le lidar donnent une bonne marge par rapport aux niveaux que l'on pense nécessaires pour les travaux sur les avalanches. Le lidar permet également une très bonne connaissance de la couverture végétale, qui joue un rôle important sur l'érosion et les avalanches.

Un levé lidar de la vallée de Chamonix devrait justement être accessible courant 2008, qui permettrait d'explorer l'ensemble de l'espace d'échelle utile et évaluer la fiabilité et les biais de prédictions construites d'après des courbes de niveau établies à 5 m, ou annoncées à 25 m au pas de 50 m comme l'IGN peut le fournir aujourd'hui en standard. Leur tracé comprend une généralisation qui aboutit à un résultat différent de toute position dans l'espace d'échelle. Une des réponses importantes à obtenir est de savoir quelles données minimales il faut pour pouvoir prononcer un avis qualifié.

L'IGN considère son modèle numérique de terrain comme médiocre par ses standard d'aujourd'hui, il a donc mis en chantier son remplacement par un modèle « submétrique » sur tout le territoire français à l'horizon 2014 ; avec en prévision un écart-type d'erreur de 20 à 30 m en montagne, 5 m ailleurs. De son côté, l'évolution des coûts des levés lidar les rend de plus en plus accessibles, en tous cas à l'échelle de fragments de massifs où l'on s'intéresse aux avalanches ; cependant l'horizon où l'ensemble des massifs français concernés sera disponible est encore lointain.

Réévaluer dans ces conditions l'utilisation d'automates cellulaires pour représenter des phénomènes de rupture et de propagation d'avalanche.

Étudier la morphologie des zones de départ et des couloirs d'avalanches. Ce qui a été dit, notamment à propos de la planéité des zones de départ n'est pas conclusif. Une façon de capter ce que contiennent comme

information les emprises de la CLPA, avec toutes les difficultés que cela représente, consiste à extraire des informations par recoupement entre les portions hautes des emprises et un modèle numérique de terrain, éventuellement avec un contrôle visuel. On peut ainsi obtenir toutes sortes de paramètres de pente, concavité, etc., tels qu'ils se présentent factuellement pour des couloirs connus et bien documentés, et les soumettre à une analyse de données.

Un modèle sur les zones de départ d'avalanches a pour entrée quasi-exclusive le relief (figure 18b), toutes les autres informations s'appliquent en se combinant aux données de relief, aussi il est important d'exploiter tous les moyens de relever une information factuelle sur la situation, la configuration, la morphologie des zones de départ.

Remerciements

Je tiens à remercier Mohamed Naaim, pour m'avoir incité et encouragé à travailler sur ce sujet dont il m'a montré la pertinence ; Sébastien Escande, pour ses discussions sur les avalanches ; Florence Naaim et Hervé Bellot, sur les questions des effets du vent ; Yves Durand, pour tous les aspects météorologiques ; Gilles Borrel, pour tout ce qui concerne la CLPA ; François Rapin, pour l'ensemble des questions de déclenchement ; Vivian Bonnetain et Michaël Deschâtres, pour les nombreuses discussions et séances avec ArcGIS ; Frédéric Berger, notamment sur le rôle de la forêt dans la protection contre les avalanches, et les perspectives sur le lidar ; d'une façon générale toute l'équipe Etna ; et aussi celle de Tetis qui m'a accueilli et m'a offert un environnement technique agréable et stimulant pour achever cette étude.

Références

- [1] Christophe Ancey, editor. *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*. Édisud, Aix-en-Provence, 1996.
- [2] Christophe Ancey, Christian Gervasoni, and Maurice Meunier. Computing extreme avalanches. *Cold regions science and technology*, 39(2-3) :161–180, October 2004.
- [3] Frédéric Berger and Jérôme Liévois. *Forêt et risques naturels en montagne : de la représentation de l'aléa au zonage du risque — l'exemple des avalanches*, chapter 5, pages 115–143. Hermès ; Lavoisier, Paris, 2001.
- [4] Laurent Buisson. *Le raisonnement spatial dans les systèmes à base de connaissances : application à l'analyse de sites avalancheux*. PhD thesis, université Joseph Fourier, Grenoble 1, 5 novembre 1990.

- [5] Laurent Buisson. *Systèmes d'information, bases de connaissances et aide à la décision : quelques applications aux risques naturels*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Joseph Fourier, Grenoble, 26 janvier 1998.
- [6] Cam Campbell and Bruce Jamieson. Spatial variability of rutschblock results in avalanche start zones. In *Proceedings of the 2004 International Snow science workshop in Jackson Hole, WY*.
- [7] ministère de l'Écologie, 14 décembre 2006. Cartographie des risques naturels et technologiques majeurs en France, <http://cartorisque.prim.net/>, accès 2007.09.
- [8] Hubert L. Dreyfus. *Intelligence artificielle, mythes et limites*. Flammarion, 1984. Édition originale, *What computers can't do. The limits of artificial intelligence*, Harper & Row, Publishers, Inc., New-York, 1972-1979. Traduit par Rose-Marie Vassallo-Villaneau. Discussions de Jacques Arzac, Mario Borillo, Jacques Pitrat.
- [9] P. Foehn, M. Stoffel, and P. Bartelt. Formation and forecasting of large (catastrophic) new snow avalanches. In *Proceedings of the International Snow and science workshop, Penticton, B.C., 2002*.
- [10] Hervé Hamy and Patrice Prez. Processus de diffusion en vision computationnelle : analyse critique de la notion d'échelle. Technical Report 9518, CREA, CREA – Antenne de Palaiseau, École Polytechnique, F-91128 Palaiseau cedex, jun 1995.
- [11] Carl B. Harbitz. Same : Snow avalanche modelling, mapping and warning in Europe. EU contract no. ENV4-CT96-0258.
- [12] Alfred Korzybski. *Une carte n'est pas le territoire : prolégomènes aux systèmes non-aristotéliens et à la sémantique générale*. Éditions de l'Éclat, Paris, 1998. Traduit de *The estate of Alfred Korzybski*, Charlotte Read, 1933, 1949, 1950, par Didier Kohn, Mireille de Moura & Jean-Claude Dernis; titres originaux «The role of language in perceptual processes», chapter 7 in *Perception : An approach to personality*, Robert Blake and Glenn Ramsay editors, New York, 1950, —reprinted by permission of John Wiley and Sons, Inc.; «General Semantics», from *The American people's encyclopedia*, Spencer Press, Inc. , 1949; «Preface to the first edition, 1933 : *Science and sanity*».
- [13] Tony Lindeberg. Scale-space : A framework for handling image structures at multiple scales. In *Proceedings of the Cern School of computing, Egmond aan Zee, The Netherlands*, page 12, 8–21 September 1996.
- [14] Tony Lindeberg. Principles for automatic scale selection. Technical Report ISRN KTH NA/P-98/14-SE, Department of numerical analysis

and computing science, KTH (Royal Institute of Technology), S-100 44 Stockholm, Sweden, Aug 1998.

- [15] Margherita Maggioni. *Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping*. PhD thesis, Université de Zürich, 2004.
- [16] M[argherita] Maggioni and U[rs] Gruber. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold regions science and technology*, 37(3) :407–419, November 2003.
- [17] David McClung and Peter Schaerer. *The avalanche handbook*. The Mountaineers, Seattle, Washington, 1993. Fourth printing, 1998.
- [18] Maurice Meunier and Christophe Ancey. Towards a conceptual approach to predetermining long-return-period avalanche run-out distances. *Journal of Glaciology*, 50(169) :268–278, 2004.
- [19] Mohamed Naaim. Risques liés à la neige et aux avalanches : étude des mécanismes et modélisation. Mémoire d’habilitation à diriger des recherches, université Joseph Fourier, Grenoble, 1998.
- [20] Laurent Nottale. *Fractal space-time and microphysics : towards a theory of scale relativity*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1993.
- [21] George [=Györgi] Pólya. *How to solve it : a new aspect of mathematical method*. Princeton University Press, expanded Princeton Science Library edition, with a new foreword by John H. Conway. First edition, 1945 edition, 2004.
- [22] Karl Raimund Popper. *La logique de la découverte scientifique*. Payot, Bibliothèque scientifique, Paris, 1973. Traduit de *The logic of scientific discovery*, Hutchinson & C^o., London, 1959, 1968, par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, version originale allemande *Logic der forschung*, 1934.
- [23] Rajiv Prasad, David G. Tarboton, Glen E. Liston, Charles H. Luce, and Mark S. Seyfrid. Testing a blowing snow model against distributed snow measurements a Upper Sheep Creek, Idaho, United States of America. *Water resources research*, 37(5) :1341–1350, May 2001.
- [24] R. S. Purves, J. S. Barton, W. A. Mackaness, and D. E. Sugden. The development of a rule-based spatial model of wind transport and deposition of snow. *Annals of glaciology*, 26 :197–202, 1998.
- [25] Service des pistes des Sept-Laux, Isère, France. Communication personnelle, 2006.

- [26] Sun Tsu. *L'art de la guerre*. Carthame éditions, Les Tattes, F-74250 Fillinges, 1993. Traduit de la version dessinée par Tsai Chih Chung, *The art of war*, Asiapac Books, 1991.
- [27] Laurence Viennot. Les étudiants et Newton. *La Recherche*, 7(72) :980–983, novembre 1976.
- [28] Laurence Viennot. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire, 28 avril 1977. thèse de doctorat d'état présentée à l'université de Paris 7.
- [29] Laurence Viennot. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Hermann, Actualités scientifiques et industrielles, n°1384, Paris, 1979.
- [30] Laurence Viennot. *Raisonner en physique : la part de sens commun*. De Boeck Université, collection pratiques pédagogiques, Paris, Bruxelles, 1996.
- [31] Peter Weisinger. Modelling of avalanche starting zones from terrain variables at Poplar Creek, B.C. <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/g470/class97/weisinger/sad.html#study%20Area>, 15 juin 2006.