

Utilisation d'outils statistiques dans la détermination des scénarios de l'avalanche de référence et l'aide à la décision

Christophe Ancey et Maurice Meunier

Cemagref - division Érosion Torrentielle Neige et Avalanche

Claude Charlier

Études & conseils (SARL)

Summary

The design of suitable works against avalanche hazard requires to define a reference avalanche, which may be characterized by its period of return. In this paper, emphasis is given on a proper definition of the period of return. A statistical approach based on classical probability distributions used in hydrology is developed to that end. Among others, it is shown that the snow mass involved by the avalanche is a reliable parameter to specify the scale of an avalanche from a statistical point of view. Several practical examples illustrating the followed method are given. However, owing to several disturbing factors such as snow transport by wind or the landscape transformation, uncertainty on the mass triggered by avalanches may be significant. To get round this difficulty, it is suggested employing scenarios for the reference avalanche, which specify its features and the way by which the transformation of a fallen snow mass into a volume involved by the avalanche is performed.

1. Problématique

En zone de montagne, de nombreux sites (habitations, voies de communication, équipements) et activités humaines sont vulnérables aux avalanches. Les maintenir en place requiert du maître d'ouvrage de mettre en œuvre un certain nombre de techniques pour s'en

protéger. Il en est ainsi du responsable de domaine skiable qui décide de purger à l'aide d'explosifs les pentes menaçant les pistes ou bien du maire qui fait construire une digue pour protéger des habitations. Naturellement, chacun a conscience qu'en la matière aucune technique n'est la panacée : la protection totale et définitive contre le risque d'avalanche n'est en pratique jamais réalisée. Tout naturellement également, plus la protection mise en place sera étendue, plus on peut escompter que le degré de sécurité assurée sera bon : par exemple, en doublant la hauteur de digue, un maire peut espérer accroître sensiblement la protection des habitations, mais le prix pour y parvenir sera multiplié par quatre. Le choix d'une protection résulte donc le plus souvent d'un compromis entre la volonté d'assurer la meilleure protection et la capacité à la financer ou l'importance des enjeux. Cela implique que le maître d'ouvrage a la lourde tâche de décider quel est justement ce niveau de sécurité souhaité. Ce faisant, cela signifie implicitement qu'il cherche à se protéger contre les événements les plus fréquents, mais qu'il accepte également que l'efficacité de la protection préconisée trouve ses limites pour des événements exceptionnels. On mesurera ici toute la difficulté pour un maître d'ouvrage de répondre de but en blanc à la question de la détermination du risque acceptable (c'est-à-dire ce que recouvre ci-dessus les termes de *fréquent* et d'*exceptionnel*) le plus souvent sur la base d'informations lacunaires et en l'absence de contraintes réglementaires. Le présent exposé présente un certain nombre d'outils élaborés à cette fin. L'accent sera plus particulièrement mis sur l'utilisation des méthodes statistiques pour probabiliser le risque ; la matière de notre réflexion est le plus souvent issue de l'approche utilisée en hydrologie, mais les particularités propres aux avalanches nous amèneront à définir la méthode des scénarios. Nous commencerons par rappeler au § 2 quelques notions de bases utiles à la bonne compréhension de l'exposé, puis nous exposerons au § 3 les principes du traitement statistique. Enfin, nous indiquerons au § 4 une extension par la formulation des scénarios.

2. Quelques notions de base

Nous allons rappeler dans cette section un certain nombre de généralités sur les caractéristiques des avalanches et sur les outils statistiques. Nous essaierons aussi de montrer les problèmes rencontrés dans la mise en œuvre des outils statistiques en matière d'avalanche, et ce faisant, nous indiquerons quelques limitations de notre approche.

2.1. Définition de l'aléa de référence

On parle ici d'*aléa de référence* pour désigner le phénomène naturel maximal contre lequel le maître d'ouvrage cherche à se protéger étant entendu qu'il souhaite que tous les phénomènes d'ampleur plus faible ne causent aucun dommage et qu'il admet des dommages pour des phénomènes d'ampleur plus importante. Notons d'ores et déjà que l'aléa de référence peut être aussi bien un événement historique (pour lequel le maître d'ouvrage aura en sa possession suffisamment d'éléments) qu'une notion fictive (dont les caractéristiques auront été établies par le chargé d'études en concertation avec le maître d'ouvrage). Notons aussi que nous avons fait apparaître la notion d'*ampleur* et de manière sous-jacente l'idée que l'on peut *classer* les phénomènes naturels en fonction de leur ampleur. Dans le contexte des avalanches, cette simple notion de classement suggère que, pour caractériser l'ampleur, il faut arriver à estimer une grandeur *intrinsèque, quantifiable, unique* telle que son énergie, son volume, sa masse, la distance parcourue, etc. A ce stade, il nous faut choisir le paramètre le plus pertinent, le plus représentatif de l'avalanche (si tant est qu'il existe et soit unique). Certaines grandeurs telles que l'énergie sont à écarter d'emblée, car elles ne sont pas facilement mesurables. D'autres telles que le volume sont facilement mesurables mais leur valeur dépend de l'état de la neige : par exemple, compte tenu de la compressibilité de la neige, le volume dans la zone de dépôt sera significativement plus petit que celui de la zone de départ. Des grandeurs telles que la cote d'arrêt et la masse semblent convenir. Du point de vue du maître d'ouvrage, il est certain que la cote d'arrêt semble être une donnée plus tangible que la masse. Du point de vue du chargé d'études, elle n'est pas pratique car, contrairement à la masse qui est une donnée brute, elle reflète en fait l'influence de beaucoup de paramètres mal maîtrisés (l'état de la neige, la topographie du terrain, etc.). Pour comprendre cela, il suffit d'examiner la corrélation entre masse et cote d'arrêt : si celle-ci est bonne en moyenne¹, elle n'est ni générale, ni régulière. Par exemple, des conditions particulières de neige peuvent provoquer des avalanches exceptionnelles² par leur extension mais non par leur masse. De

¹ Cela se comprend bien : plus la masse est grande, plus l'énergie cinétique est élevée et plus loin l'avalanche peut aller.

² Voir l'exemple de l'avalanche de janvier 1996 de la Daille à Val-d'Isère qui a touché une piste de ski de fond et tué un skieur : elle est survenue après de faibles chutes de neige et a mobilisé un faible volume, mais a

même, des configurations de terrain particulières (radoucissement à mi-pente par exemple) peuvent provoquer l'arrêt des avalanches d'une certaine ampleur et laisser transiter des avalanches plus grosses ; dans ce cas, il y a une discontinuité³ dans la relation masse/ distance d'arrêt (effet de seuil). Pour ces motifs, nous retiendrons pour la suite de l'exposé que, parmi toutes les variables quantifiables, la masse mobilisée est la variable la plus pertinente pour rendre compte de l'ampleur du phénomène. Ce choix implique que la période de retour de l'avalanche est implicitement liée à la période de retour des précipitations.

Une fois précisée la masse de l'avalanche, nous avons encore besoin d'un certain nombre de renseignements pour caractériser pleinement l'aléa de référence. Parmi les plus importants, il faut citer le type d'avalanche. Il est en général commode de considérer deux types limites⁴ d'avalanche selon la forme du mouvement :

- *l'avalanche coulante* : c'est le déplacement d'une masse de neige homogène (en première approximation) le long du sol. L'écoulement est astreint à suivre le relief. L'échelle de hauteur d'écoulement est le mètre ;
- *l'avalanche en aérosol* : c'est un écoulement rapide de neige sous la forme d'un nuage, qui résulte du mélange de l'air et des particules de glace. Cet aérosol est composé de grandes bouffées turbulentes, dont la trajectoire n'est pas entièrement déterminée par le relief. L'échelle de hauteur est la dizaine de mètres.

Enfin, il faut également caractériser l'état mécanique de la neige mobilisée et les conditions d'écoulement (rugosité du chenal d'écoulement, reprise de neige, etc.). Par exemple, si on utilise le modèle classique de Voellmy, il faut estimer le paramètre de frottement solide (qui traduit la fluidité de la neige et la dissipation d'énergie en son sein) et le paramètre de frottement turbulent (qui dépend de la géométrie du chenal d'écoulement, de la

parcouru une distance exceptionnellement grande qui n'a été observée que deux ou trois fois au cours de ce siècle.

³ Le site d'Arinsal en Andorre est assez typique : la plupart des avalanches s'étalent sur un replat entre 2100 et 2250 m, mais les plus grosses (comme l'avalanche catastrophique de février 1996) peuvent franchir le radoucissement de pente et être canalisées dans un couloir raide jusqu'à la station.

⁴ Entre ces deux cas limites, il existe une gamme variée d'écoulements répondant (au cours de leur écoulement) à la fois à des critères distinctifs des avalanches coulantes et des aérosols : on parle d'avalanche mixte.

rugosité, etc. et qui est donc en principe une grandeur intrinsèque au site). En bref, on retient que les principales données servant à caractériser l'avalanche de référence sont :

- sa masse ;
- son type (coulante/ aérosol) ;
- les caractéristiques mécaniques de la neige et les conditions d'écoulement.

2.2. La période de retour

Pour la plupart des phénomènes naturels d'occurrence régulière comme les crues ou les avalanches, on observe que leur ampleur (la masse de l'avalanche ou le débit de pointe de la crue) est inversement liée à leur fréquence : on observe plus souvent des avalanches mobilisant de petites masses de neige que des avalanches en mobilisant de grandes. Cela suggère intuitivement qu'il doit exister une relation entre la fréquence d'un phénomène et son ampleur. C'est justement l'objet des études statistiques de mettre en évidence cette relation (quand elle existe). Dans le cas des précipitations, des lois classiques comme la loi exponentielle simple ou la loi de Gumbel permettent de rendre correctement compte de cette relation. Comme la masse de neige mobilisée par une avalanche résulte très souvent du cumul des derniers jours, on peut raisonnablement penser qu'une relation statistique similaire à celle des précipitations existe entre masse de neige et fréquence.

Avant d'entrer plus en avant dans les méthodes statistiques, il est important de préciser un peu le vocabulaire et d'introduire un certain nombre de termes, quelque peu effrayants pour le profane mais qui s'imposent rapidement quand on cherche à comprendre ce que signifie une loi statistique. Généralement, dans la plupart des études statistiques, on introduit une *probabilité de non-dépassement* (F), c'est-à-dire la probabilité pour qu'une valeur donnée ne soit pas dépassée. Par exemple, une probabilité de non-dépassement 0,99 signifie qu'il y a 99% de chances pour que cette valeur ne soit pas dépassée ou réciproquement 1% de chances qu'on trouve une valeur qui lui soit supérieure sur un laps de temps donné. En pratique, il est plus commode de parler en termes de *période de retour* définie comme :

$$(1) T=1/(1-F)$$

T est exprimée en années. A la probabilité de non-dépassement de 0,99 est donc associée la période de retour T=100 ans ; c'est le phénomène qui a 1% de chance d'être dépassé en moyenne sur une période quelconque d'un an. Il faut bien retenir que le phénomène centennal

n'est pas le plus gros phénomène qui intervient une fois tous les cent ans, mais celui qui a 1 % de chance de se produire ou d'être dépassé chaque année, c'est-à-dire *en moyenne* une fois par siècle. Ainsi, il peut y avoir plusieurs événements centennaux par siècle. La probabilité P pour qu'il y ait n phénomènes de période de retour T (ou de fréquence $p=1-F=1/T$) pendant un laps de temps de N années peut être représentée à l'aide d'une loi de Poisson :

$$(2) \quad P(n) = e^{-Np} \frac{(Np)^n}{n!}$$

La probabilité qu'il y ait au moins un phénomène de période de retour T pendant N années est :

$$(3) \quad 1 - P(0) = 1 - e^{-Np}$$

La probabilité d'avoir une avalanche centennale est de donc de 18 % dans les vingt ans à venir, de 63% dans le prochain siècle, et de 95 % dans les trois siècles à venir.

En pratique, toutes les grandeurs mathématiques que nous venons de voir ne sont pas directement calculables car il faudrait des séries de données infiniment longues. Il est en revanche possible d'arriver à des valeurs empiriques à partir d'une série suffisamment longue de données. Par exemple, supposons que nous ayons N valeurs annuelles maximales successives de cumuls journaliers de pluie⁵ (avec N supérieur à 20 ans). Pour estimer la période de retour empirique, on peut dans un premier temps et en première approximation procéder de la manière suivante : on classe par ordre croissant les N données, puis on attribue à chaque valeur classée (i) la période de retour empirique $1/(1-i/(N+1))$. Enfin, en reportant sur un diagramme les couples (valeur de pluie, période de retour empirique), il est possible de caler une loi statistique sur ces points.

2.3. Les limites de la méthode statistique

De manière générale, pour faire des statistiques, il faut posséder des échantillons de données cohérentes. Dans le domaine des avalanches, cette exigence se traduit par : s'assurer

⁵ On retient la valeur maximale du cumul de pluie tombée sur une journée entre le 1er janvier et le 31 décembre de chaque année.

du caractère stationnaire des données (vis-à-vis du climat ou d'une intervention humaine), vérifier que les conditions de départ sont *grosso modo* du même type. Ces deux points sont développés au § 2.3.1 et 2.3.2. Au § 2.3, on s'intéresse à la prise en compte de l'intervention humaine.

2.3.1. Sur la période de retour

Le calcul d'une période de retour n'a de sens que si les paramètres caractérisant le site sont stationnaires, autrement dit qu'ils ne subissent pas de variations significatives sur l'échelle de temps considérée. Or, dans le domaine des avalanches, les sites peuvent connaître au fil des décennies des changements importants. Ceux-ci peuvent être d'origine humaine (par exemple déforestation ou reboisement) ou bien climatique (réchauffement ou refroidissement). Par exemple, la crue avalancheuse de la moitié du XVIII^e siècle dans les Alpes du Nord est principalement due au petit âge glaciaire qui a été accompagné par une diminution significative de la limite de la végétation : des avalanches catastrophiques (Vallorcine, Vallouise, Huez, Costeroux) se sont déclenchées avec une ampleur qui n'a pas été observée depuis. Replacées dans une série statistique, ces avalanches exceptionnelles constituent sans doute des anomalies par rapport aux autres avalanches.

2.3.2. Sur le déclenchement des avalanches

Nous avons retenu ici dans notre démarche que les avalanches majeures étaient consécutives à des chutes de neige et que le volume accumulé durant les trois derniers jours correspondait à peu près au volume mobilisé par l'avalanche. De toute évidence, cela est souvent vrai mais il existe des exceptions notables.

Certaines avalanches majeures sont causées par un redoux important (remontée de l'isotherme 0° C, chutes de pluie). La crue avalancheuse exceptionnelle du 16 mai 1983 dans la vallée de Chamonix en est un exemple typique. Le volume mobilisé est très variable mais, dans le cas des avalanches exceptionnelles, il est généralement important (avalanche de fond mobilisant toute l'épaisseur du manteau neigeux). De tels phénomènes sont rares et le plus souvent associés à de la neige humide. Il est à notre connaissance très difficile de cerner leur occurrence.

D'autres avalanches sont consécutives à des ruptures du manteau neigeux sous l'effet d'un choc (éboulement, chute de corniches). Ces avalanches peuvent concerner des manteaux neigeux pourtant très stables (vis-à-vis de la pratique du ski). C'est l'impact d'éléments étrangers qui est alors à même de rompre l'équilibre du manteau neigeux. Un exemple typique est l'avalanche de la combe du Pra (Fond-de-France, Isère) du 17 avril 1987 : un morceau de corniche tombé de la cime de la Jasse entraîna la rupture du manteau neigeux sous-jacent (fracture de 350 m de large et 2 m d'épaisseur) et causa une avalanche exceptionnelle (1 mort). Comme précédemment, l'évaluation d'un volume mobilisé et d'une probabilité d'occurrence ne nous semble pas possible.

2.3.2. Sur la prise en compte de l'effet de la correction active et de la végétation

Dans certains cas, des ouvrages de génie civil (râteliers, etc.) ou de la végétation sont en place. Se pose alors la question de la prise en compte de leur effets ou non dans l'estimation de la masse de neige mobilisée par l'avalanche de référence. C'est le cas par exemple du site avalancheux de Saint-Hilaire-du-Touvet (Isère), où toute une série d'ouvrages ainsi que des plantations de pins à crochets ont été disposées dans la zone de départ.

Dans la plupart des cas, les ouvrages de soutien (râteliers, claies, filets) maintiennent efficacement le manteau neigeux à condition qu'ils soient judicieusement placés, qu'ils occupent une surface suffisante de la zone d'accumulation du site, et qu'ils soient en bon état. Leur efficacité peut diminuer si le manteau neigeux les recouvre en totalité ou presque totalité (sous l'effet de suraccumulations par exemple ou en cas de chutes de neige exceptionnelles durant la saison) ou bien si la neige présente une cohésion très faible. Dans ces cas, des départs peuvent avoir lieu à travers les lignes d'ouvrages. Par exemple, en février 1990, une piste de ski du domaine de Tignes est touchée par une avalanche due à la purge partielle des râteliers protégeant le secteur ; durant les quatre jours précédents, environ deux mètres de neige étaient tombés à 2100 m. Rappelons de même que la forêt joue un rôle efficace dans le maintien du manteau neigeux lorsqu'elle recouvre entièrement la zone d'accumulation du site ; son efficacité peut être illusoire lorsqu'elle ne recouvre qu'une partie de la zone d'accumulation ou bien lorsque sa densité et les essences en présence ne sont pas convenables. Il est très difficile d'estimer le degré de protection assurée par les ouvrages de soutien et la végétation sur le long terme. Il est en général très bon dans des conditions

normales (entretien correct, qualité et quantité de neige normales, etc.) sans qu'on sache bien le quantifier. Il peut y avoir une réduction de son efficacité pour les phénomènes rares et de grande ampleur. Comme justement ce sont ces phénomènes qui sont visés lorsqu'on s'intéresse à la protection d'habitations, on ne peut raisonnablement garantir l'efficacité complète des techniques de protection permanente active.

Un point de vue possible est que, lorsqu'on s'intéresse à des événements de faible période de retour (l'avalanche tricentennale est un événement qui a 0,3 % de chance d'être observé sur une année), on ne peut négliger la survenue d'autres phénomènes de faible probabilité rendant inefficace la protection active (coup de vent détruisant les plantations, éboulements ruinant les ouvrages de soutien, chutes de neige exceptionnelles durant la saison, qualité de neige exceptionnelle, etc.). Pour aller dans le sens de la sécurité (la direction généralement préconisée par le chargé d'études), il ne faudrait donc pas tenir compte de l'influence des aménagements sur le déclenchement des avalanches exceptionnelles.

Bien entendu, le point de vue opposé se défend. Si le dispositif est bien conçu et pérenne et s'il est bien entretenu, il stockera une grande partie de la neige et les avalanches qui se déclencheront sont de plus petite taille. Le dispositif contribue ainsi à augmenter la période de retour de l'événement catastrophique. Pour aller dans le sens de la diminution des coûts de protection (la direction vers laquelle préfère regarder le maître d'ouvrage), il faudrait tenir compte de l'influence de la défense active dans l'estimation du volume mobilisé.

Il est clair que ces deux points de vue dualistes devront être conciliés lors de la définition de l'avalanche de référence. Il y a là donc nécessité d'une discussion entre les acteurs du projet (le maître d'ouvrage, le chargé d'étude, les administrations concernées, etc.) pour lever toutes les ambiguïtés du problème, notamment les questions concernant le risque acceptable, la responsabilité, etc.

2.4. Conséquence : l'obligation de raisonner à partir de scénarios

En résumé, il nous apparaît important de retenir deux points. D'une part, à l'échelle de temps qui intéresse le maître d'ouvrage, la notion de période de retour doit plus être vue comme une probabilité d'occurrence d'un phénomène que comme sa fréquence ; il faut bien garder à l'esprit qu'une période de retour n'a de sens que si l'on dispose d'une série statistique

suffisamment longue et fiable⁶. D'autre part, on retient comme variable représentative d'une avalanche sa masse. Généralement, un usage (qui court à notre connaissance sur toute la planète) veut qu'en prédétermination, on prenne le cumul des trois derniers jours comme épaisseur déclenchée par une avalanche. Cela signifie que, selon notre définition, la période de retour de l'avalanche est directement liée à celle des précipitations qui l'ont précédée. Contre cette définition, on pourra objecter que sur un site donné, une même chute de neige peut provoquer une grosse avalanche ou au contraire une petite coulée. On bute ici contre une subtilité dans le raisonnement : implicitement on sent bien qu'après une chute de neige, il y a un volume de neige mobilisable (et c'est bien lui qui peut faire l'objet de calcul de probabilité). C'est un volume de neige qui peut *potentiellement* donner naissance à une avalanche. D'autres paramètres⁷ interviennent pour qu'un volume potentiel soit réellement mobilisé : la température, le vent, un effet détonateur (chute de corniche, coulée...), etc. De là, on comprend que contrairement à la crue de projet pour un cours d'eau, il faille indiquer d'autres renseignements pour spécifier l'avalanche de référence. Contrairement aux précipitations, les grandeurs influant sur le départ d'avalanches (température, vent, etc.) ne sont pas des variables aléatoires que l'on peut probabiliser en termes de période de retour (au mieux on peut les décrire comme des processus stochastiques). Il s'ensuit que leur détermination est généralement faite à dire d'expert. On appellera par la suite *scénario* le descriptif des caractéristiques de l'avalanche de référence (nous y reviendrons au § 4). On retiendra que la définition de l'avalanche de référence fait donc appel :

- à une mesure objective quantifiable (probabilisable) relative à son ampleur : sa masse ;
- à des paramètres arbitraires dont la détermination relève d'une analyse experte ou bien à une décision maître du d'ouvrage : qualité de neige, température, prise en compte de la défense active, etc.

⁶ Il n'est pas rare d'entendre le raisonnement suivant après un accident : «avant aujourd'hui, la dernière fois que l'avalanche est arrivée là, c'était il y a cinquante ans. C'est donc l'avalanche cinquantennale qui est tombée». Cela est évidemment un raccourci de la pensée qui amène généralement à une fausse conclusion.

⁷ Ce sont là des paramètres naturels, indépendants, et non maîtrisables. Dans certains cas particuliers, il existe également des paramètres qui résultent directement d'une action humaine : ouvrages de soutien, évolution de la population forestière, etc.

3. Le traitement statistique

3.1. Statistiques sur les précipitations

Généralement, il est rare de disposer de données de précipitations (recueillies à l'aide d'un pluviographe, c'est-à-dire un pluviomètre automatique qui enregistre les cumuls de précipitation avec un pas de temps typiquement de l'ordre de quelques minutes) sur le site avalancheux étudié. La première opération consiste donc à sélectionner un poste représentatif parmi les 82 pluviographes actuellement en place en France. Dans certains cas, notamment dans les stations de ski possédant un poste de nivo-observateur depuis plusieurs années, il est possible d'utiliser les données recueillies même si le plus souvent elles ne concernent que la saison d'hiver. La seconde opération va consister à dépouiller les données et à les classer. Par exemple, sur N années consécutives, on prendra les maxima annuels des précipitations sur $d=1, 2, 3, 6, 12$ et 24 h. Comme on l'a dit plus haut, en classant par ordre croissant les données et en attribuant à chaque valeur de rang (i) une fréquence empirique de non-dépassement $i/(N+1)$, il est possible d'arriver à une première statistique entre précipitations et périodes de retour.

Par exemple, nous reportons dans le tableau 1 les résultats du dépouillement des données entre 1951 et 1989 du poste d'Eybens (Isère).

| | 1 h | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h | 24 h |
|--------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 2 ans | 16 | 21 | 25 | 32 | 42 | 53 |
| 5 ans | 22 | 28 | 32 | 42 | 54 | 69 |
| 10 ans | 25 | 32 | 37 | 48 | 62 | 80 |
| 20 ans | 31 | 39 | 45 | 57 | 73 | 94 |

Tableau 1. Cumul de précipitation sur Eybens en fonction de leur durée et de leur période de retour. Valeurs exprimées en mm d'eau. Origine des données : Météo-France. Dépouillement : Cemagref.

Il est possible à partir de là de caler sur ces données des fonctions qui permettent de relier cumul de précipitation, période de retour et durée. Au nombre des fonctions classiques qui marchent bien en France, il faut mentionner la loi de Montana (qui relie précipitation et durée) et des lois de type Gumbel ou exponentielle simple (qui lient précipitation et période de retour). On utilisera ici la méthode des moindres carrés pour caler les coefficients, d'autres

méthodes sont possibles et peuvent conduire à des valeurs de coefficient légèrement différentes.

La loi de Montana exprime le cumul de précipitation (pour une période retour donnée) comme une fonction puissance de la durée :

$$(4) \quad P(T, d) = a d^{1-b} \quad [\text{mm}]$$

avec :

- a et b coefficients de Montana, qui dépendent de la période de retour T ;
- d durée de la précipitation (en h).

Sur la figure 1, on a reporté les résultats du calage non linéaire de la loi de Montana sur les données pour deux périodes de retour T=2 ans, T=10 ans. On obtient comme valeurs de a et b les valeurs indiquées dans le tableau 2. On remarque que, contrairement à a, b ne varie (presque) pas avec la période de retour.

| | <i>a</i> | <i>b</i> |
|-----------------|-------------|-------------|
| <i>T=2 ans</i> | <i>16,4</i> | <i>0,63</i> |
| <i>T=10 ans</i> | <i>24,8</i> | <i>0,63</i> |

Tableau 2. Coefficients de Montana pour Eybens.

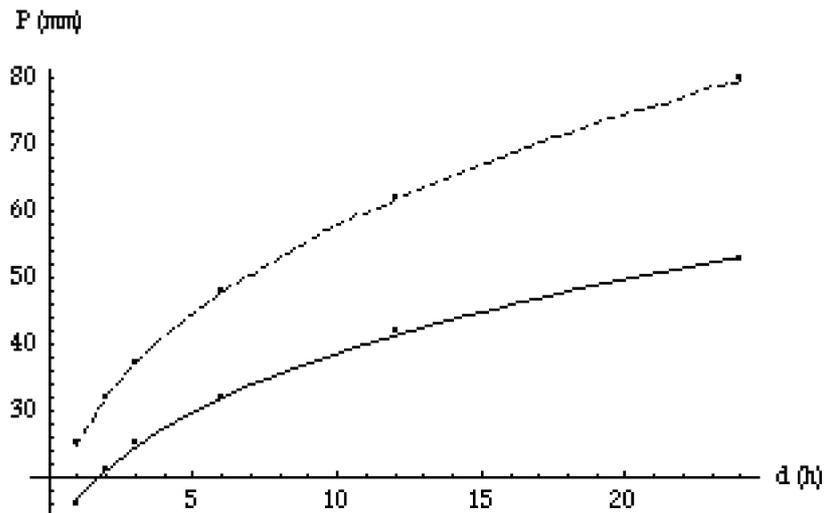


Figure 1. Variation du cumul de précipitations à Eybens en fonction de la durée (en heures) pour deux périodes de retour $T=2$ ans (trait plein) et $T=10$ ans (trait pointillé fin). Les points correspondant aux mesures sont également reportés.

La distribution des précipitations en fonction de la période de retour (T) peut généralement être correctement décrite par une loi de type Gumbel⁸, qui est exprimée sous la forme suivante :

$$(5) \quad P(T, d) = P_0(d) - G_p(d) \ln(-\ln(1-1/T)) \quad [\text{mm}]$$

avec :

- $G_p(d)$: gradex des précipitations de durée d [mm] ;
- $P_0(d)$: paramètre de position (appelé encore mode) [mm].

En utilisant une méthode de calage non linéaire par les moindres carrés, on obtient les valeurs de P_0 et G_p à partir du dépouillement des données de précipitations en se servant de l'équation (2) ; les valeurs sont reportées dans le tableau 3 :

| | P_0 [mm] | G_p [mm] |
|-----|------------|------------|
| 1 h | 12,1 | 6,6 |
| 2 h | 16,1 | 8,1 |

⁸ On aurait pu utiliser également la loi exponentielle simple : $P(T, d) = P_0(d) + G_p(d) \ln(T)$

| | | |
|------|------|------|
| 3 h | 19,4 | 8,9 |
| 6 h | 25,6 | 11,1 |
| 12 h | 34,3 | 13,6 |
| 24 h | 44,2 | 17,1 |

Tableau 3. Coefficients de position et gradex obtenus par dépouillement des données de pluie sur Eybens et en se servant de la fonction de calage (5).

De plus, en première approximation, le gradex des pluies peut être relié à la durée des pluies par une loi puissance similaire à la loi de Montana :

$$(6) \quad G_p(d) = a' d^{1-b} \text{ et } P_0(d) = a'' d^{1-b} \quad [\text{mm}]$$

avec a' , a'' deux paramètres constants à caler sur les mesures. On prendra comme second coefficient de Montana $b=0,63$ pour Eybens. En calant par la méthode des moindres carrés, on obtient les paramètres a' et a'' : $a'=5,83$ et $a''=14,0$.

En conclusion, la loi de distribution des précipitations⁹ sur la station d'Eybens peut donc s'écrire ($1 < d < 72$ h, $2 < T < 100$ ans) :

$$(7) \quad P(d, T) = d^{0,37} \left(14,0 - 5,83 \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad [\text{mm}]$$

avec d exprimée en heures, T en années.

⁹ Attention, il s'agit de pluies mesurées sur des pas de temps données à origine fixe (on parle de valeurs *non centrées*). On note par exemple de légères différences entre la pluie journalière (par exemple tombée de 6 h T.U à 6 h T.U le lendemain matin) et la pluie de durée centrée sur 24 h (tombée durant 24 h sans que l'origine de temps soit spécifiée). Pour la pluies centrée d'une durée donnée à partir de la valeur non centrée, il faut la multiplier par le coefficient de Weiss correspondant à la durée. Par exemple pour la pluie journalière ce coefficient vaut 1,14.

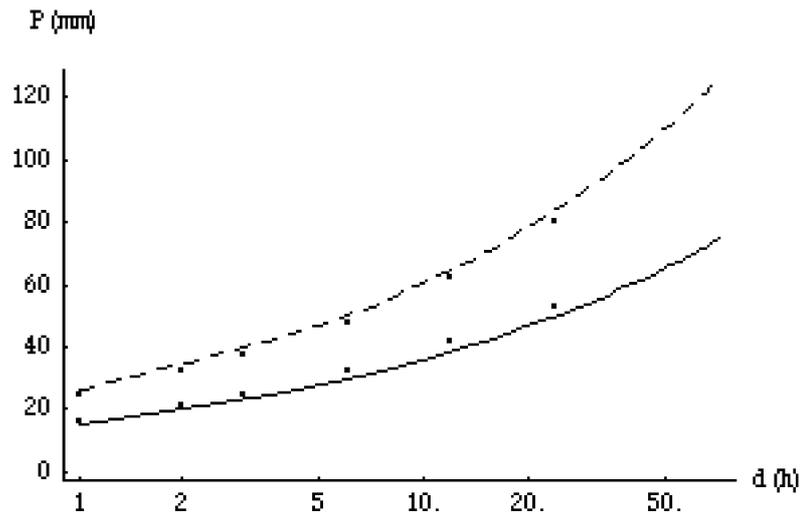


Figure 3. Variation de la pluie en fonction de la durée (pour des pluies comprises entre 1 h et 3 j) pour deux périodes de retour : 2 ans (trait continu) et 10 ans (tiret fin) Les courbes représentent les variations de la pluie issues de l'équation (7). Les points correspondant aux données d'Eybens sont également reportés.

3.2. Extrapolation aux précipitations neigeuses

A partir de l'étude statistique de la distribution des pluies, il est possible d'estimer la distribution des cumuls de neige. A cet effet, il faut formuler plusieurs hypothèses :

- ♣ la densité de probabilité des précipitations extrêmes ne dépend pas de manière significative de la saison. C'est une hypothèse qui peut sembler un peu forte mais qui peut être considérée comme pertinente en première approximation. Sur les épisodes de courte durée (de l'ordre de l'heure), les maxima sont enregistrés durant l'été ; dans ce cas, on a généralement affaire à des évolutions orageuses. Sur des épisodes de plus longue durée (la journée), la saison à risque est principalement l'automne et, dans une moindre mesure, l'hiver. Si on étend encore la durée des épisodes pour s'intéresser aux situations pluvieuses soutenues sur plusieurs jours, les différences entre saisons s'estompent. Ainsi, sur Saint-Pierre-de-Chartreuse, il tombe en moyenne entre 160 et 185 mm de pluie par mois quelle que soit la saison ; les fluctuations autour de la valeur moyenne de 171 mm/mois sont donc faibles ($\pm 10\%$ environ). Dans notre cas, comme on s'intéresse à des précipitations comprises entre la journée et 3 jours, il n'est pas utile

de différencier les précipitations hivernales des précipitations intervenant le reste de l'année ;

- ¶ le pluviographe sur lequel on a fait la statistique est souvent distant de plusieurs kilomètres du site avalancheux étudié. Compte tenu de l'altitude, du relief, etc., il est probable que le cumul des précipitations diffère de manière significative entre le site et le lieu de mesures. Il est donc nécessaire d'extrapoler les valeurs des précipitations. En général, on trouve que le second coefficient de Montana (b) est à peu près constant pour une même entité géographique (quelle que soit l'altitude), ce qui permet de ne jouer que sur les paramètres a' et a'' pour extrapoler les données. A l'aide des données issues d'un pluviomètre placé à proximité du site ou bien à partir des cartes intensité-durée-fréquence disponibles sur les Alpes françaises (voir la thèse de Kiefer), il est le plus souvent possible de corriger la loi statistique (7) pour tenir compte des effets de l'altitude.

- ⑦ le cumul de neige est généralement exprimé en cm de neige, même si c'est seulement la mesure de son équivalent en eau qui a un sens. Si l'on veut convertir une valeur en eau en une épaisseur de neige ou réciproquement, il faut se donner la masse volumique de la précipitation. Celle-ci varie fortement en fonction principalement de la température et du vent. A défaut de valeur moyenne sur le site, on peut prendre une masse volumique moyenne de la neige autour de 50 à 80 kg/m³ (neige froide et température de l'air négative) ce qui est assez souvent observé. A titre d'exemple, sur le col de Porte (Isère, 1360 m), l'analyse des chutes de neige extrêmes annuelles sur 38 années a montré que la masse volumique est comprise entre 15 et 165 kg/m³, mais que le plus souvent, on a des valeurs comprises entre 55 et 85 kg/m³ comme le montre la figure 4. Notons par ailleurs que le dépouillement des données nivo-météorologiques de postes d'altitude doit être réalisé avec soin et circonspection : les cumuls de neige peuvent être affectés par le transport de neige par le vent, lors de fortes chutes de neige, la mesure de la valeur en eau (réalisée à l'aide d'un seau) est souvent erronée. Enfin notons qu'un tassement intervient rapidement au cours de la précipitation. Ainsi le cumul de neige sur trois jours n'est pas égal à la somme des trois cumuls journaliers (il lui est inférieur de l'ordre de 30 % en moyenne). Or, dans les dépouillements, on définit généralement le cumul sur trois jours en faisant la somme sur trois jours consécutifs des

cumuls de neige. On prendra donc garde aux erreurs possibles selon la définition choisie.

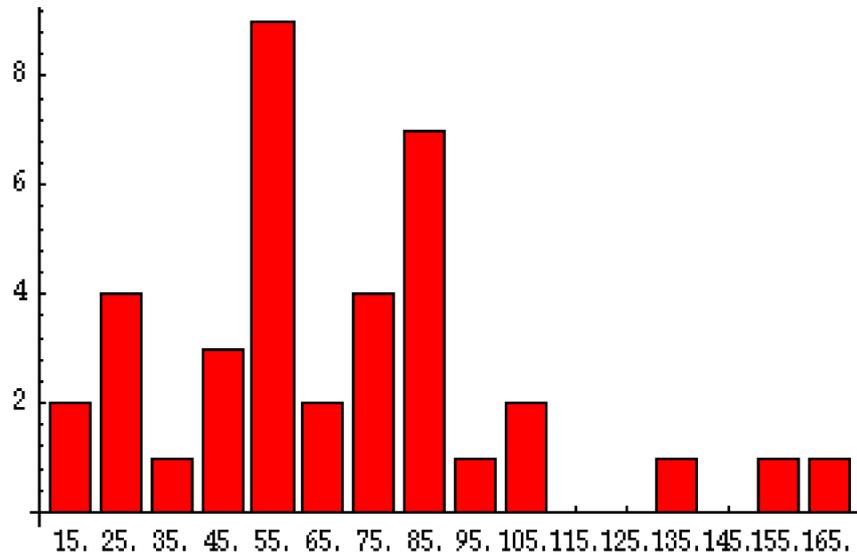


Figure 4. Histogramme des masses volumiques (en kg/m^3) des cumuls de neige journaliers annuels entre 1969 et 1998 au col de Porte. D'après des données Météo-France. La valeur moyenne est de 70 kg/m^3 .

Une autre méthode pour déterminer la distribution statistique des chutes de neige est de travailler directement sur des données de cumul de neige. Cela est possible si, par exemple, on doit faire une étude de risque à proximité d'un domaine skiable où un poste de nivo-observateur est en place. Bien entendu, compte tenu de la spécificité de la mesure (variabilité de la masse volumique de la neige illustrée dans la figure 4, effet du vent, etc.), on peut redouter l'échec de l'approche statistique. Nous l'avons tentée sur le poste du col de Porte et nous reportons le résultat sur la figure 5. Il apparaît clairement qu'en dépit des réserves apportées plus haut, les chutes de neige de neige journalières suivent grosso modo une loi de type Gumbel. Ainsi, par la méthode des moments, on obtient¹⁰ :

$$(8) \quad P = 42,8 - 8,1 \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right) \quad [\text{cm}]$$

¹⁰ Le test du χ^2 (réalisé avec 8 classes) donne un taux de vraisemblance de 80 %.

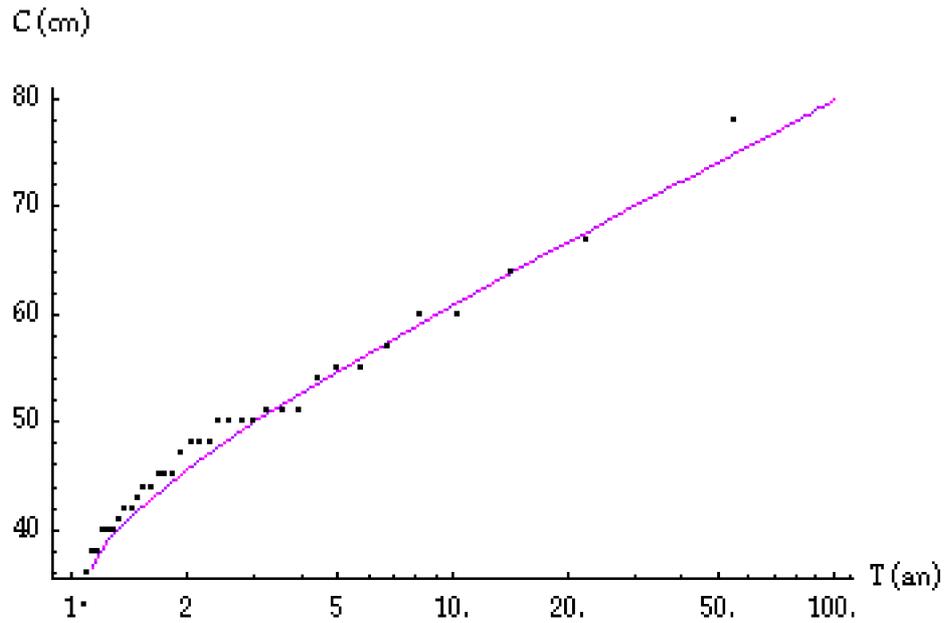


Figure 5. Distribution des maxima annuels des cumuls journaliers de neige au col de Porte. La courbe continue correspond à la loi de Gumbel (éq. 8) et les points aux mesures. D'après des données de Météo-France.

3.3. Calcul des masses mobilisées par l'avalanche

En règle générale, on admet que, pour les phénomènes majeurs, l'avalanche mobilise la couche de neige résultant des trois derniers jours de précipitations. A partir de la loi de distribution des pluies (comme l'éq. 7) et de l'estimation de la surface de l'aire de départ, on peut calculer la masse de neige mobilisable par l'avalanche en fonction de la période de retour. On prendra garde que la surface à prendre en compte est la surface telle qu'on la mesure sur la carte et non la surface développée au sol.

3.4. Un exemple d'application : Valmeinier 1800

On présente ici un exemple d'application tiré d'une étude concernant la station de Valmeinier 1800 en Savoie. L'exemple est instructif, car il permet de comparer la distribution statistique des chutes de neige journalières selon qu'elles sont calculées à partir des chroniques des précipitations neigeuses ou bien extrapolées des précipitations pluvieuses.

Les données pluviométriques sont issues du pluviographe du Châtelard situé à proximité de Saint-Michel-de Maurienne. En suivant la procédure explicitée au § 3.1, il est possible d'aboutir à une loi de distribution des précipitations. Nous avons corrigé certains paramètres de cette loi pour prendre en compte l'effet de l'altitude. A cet effet, nous avons utilisé les données du pluviomètre situé à Valmeinier (1400). On a trouvé que la loi de distribution des précipitations pluvieuses est la suivante :

$$(9) \quad P = d^{0,5} \left(7,8 - 2,4 \log \left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad [\text{mm}]$$

Nous avons considéré que la masse volumique moyenne de la neige est de 70 kg/m³. On en déduit la distribution des cumuls de neige (avant tassement) :

$$(10) \quad P = d^{0,5} \left(11,7 - 3,6 \log \left(-\log \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad [\text{cm}]$$

En parallèle, nous avons dépouillé les données nivo-météorologiques du poste de nivo-observateur n°888 de Météo-France situé à la station de Valmeinier 1800 et géré par la SEMVAL. Nous avons reporté dans le tableau 5 les maxima annuels des cumuls sur 1 jour, 3 jours¹¹, et les valeurs des équivalents en eau. Sur la figure 6, nous avons représenté les maxima annuels de cumul de neige sur un et trois jours.

| | <i>cumul 1 j (cm)</i> | <i>cumul 3 j (cm)</i> | <i>PJ 24 (mm)</i> | <i>R (cm/mm)</i> |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| 1987/88 | 30 | 68 | - | |
| 1988/89 | 50 | 90 | 28,0 | 1,8 |
| 1989/90 | 80 | 131 | 69,2 | 1,2 |
| 1990/91 | 32 | 48 | 17,4 | 1,8 |
| 1991/92 | 62 | 142 | 72,4 | 0,9 |
| 1992/93 | 30 | 40 | 26,2 | 1,1 |
| 1993/94 | 40 | 97 | 25,0 | 1,6 |
| 1994/95 | 77 | 125 | 56,8 | 1,4 |
| 1995/96 | 22 | 40 | 10,8 | 2,0 |
| 1996/97 | 28 | 41 | 19,5 | 1,4 |
| 1997/98 | 66 | 129 | 29,4 | 2,2 |
| Moyenne | 47 | 86,5 | 35,5 | 1,5 |

Tableau 4. Valeurs maximales annuelles des cumuls de neige sur 1 jour, 3 jours. Valeur maximale annuelle de la pluie journalière enregistrée pendant la saison touristique. Données tirées du poste de nivo-observateur n° 888. Le rapport R donne le rapport entre le cumul de neige sur un jour et la pluie journalière annuelle. D'après des données SEMVAL.

¹¹ calculés comme la somme des cumuls sur trois jours.

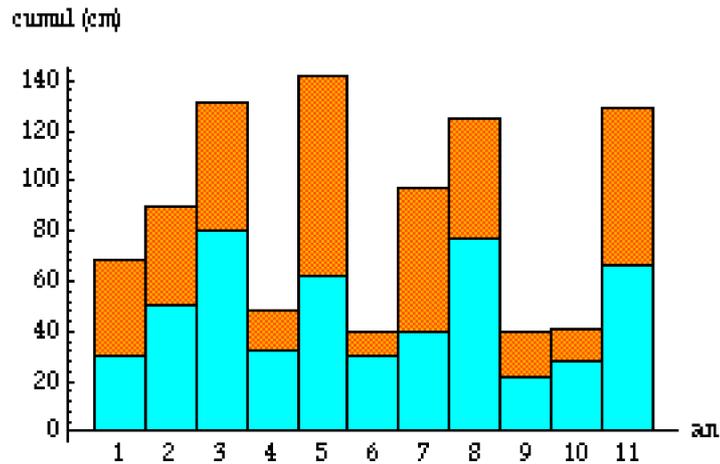


Figure 6. Maxima annuels des cumuls sur un et trois jours depuis 1987/88 jusqu'à 1997/98.

On prendra garde qu'il ne s'agit que de valeurs enregistrées durant l'ouverture de la station, c'est-à-dire en moyenne de la mi-décembre à la mi-avril. Certaines années, les maxima annuels des cumuls journaliers sont intervenus hors de la période touristique et ne figurent donc pas dans les statistiques. Il en est ainsi par exemple du mois de novembre 1996, connu comme un mois record en termes de chutes de neige, et du mois de décembre 1990 (plus de 50 cm de neige en une journée) ; notons que ces deux années sont associées à des cumuls journaliers annuels faibles dans le tableau 5 (respectivement 28 et 32 cm), ce qui illustre parfaitement les erreurs qui peuvent être commises en se fondant uniquement sur les données du poste nivo-observateur de Valmeinier 1800. Notons par ailleurs que la date correspondant à la pluie journalière annuelle correspond en général également à celle du plus fort cumul de neige en un jour (mais cela n'est pas vérifié systématiquement pour le cumul à trois jours). Le rapport R entre la valeur en eau et le cumul de neige sur une journée varie entre 0,9 et 2,2 (soit une fourchette de masse volumique allant de 45 à 110 kg/m³). La moyenne est de 1,5 cm/mm (soit une masse volumique de 70 kg/m³). Malgré le caractère manifestement lacunaire et biaisé de la chronique de précipitations sur Valmeinier, nous avons cherché à en tirer une loi statistique. Signalons par ailleurs qu'aucune des lois calées sur

les données de Valmeinier 1800 ne satisfont au test du χ^2 , ce qui montre encore leur caractère lacunaire¹².

Sur la figure 7, on a ainsi reporté la distribution des maxima annuels de cumul de neige fraîche sur un jour. On a également tracé la courbe de calage (modèle de Gumbel) ainsi que la loi de distribution extrapolée à partir des données du Châtelard (éq. 10). On a ensuite reporté sur les figures 8 et 9 respectivement les maxima annuels des cumuls sur trois jours et les précipitations (neige ou pluie) journalières annuelles (exprimées en mm). On notera sur la figure 7 un décalage entre les prédictions théoriques données par l'éq. 10 et la distribution empirique : la loi théorique semble surestimer les cumuls journaliers. Ce décalage se retrouve sur la figure 8 pour les chutes de neige sur 3 jours mais disparaît pour les valeurs en eau journalières (fig. 9). Dans ce dernier cas, il semblerait que la distribution de précipitations extrapolée à partir des données du Châtelard sous-estime les précipitations sur Valmeinier.

En conclusion, on notera l'incertitude de la méthode lorsque les séries de données sont lacunaires et insuffisamment longues. Ainsi, dans le cas de Valmeinier, la méthode par extrapolation des distributions de pluie aboutit à une chute de neige journalière décennale de 95 cm contre 75 cm pour la méthode d'exploitation directe des données.

¹² Bien entendu, le faible nombre d'années (N=11) pouvait laisser craindre *a priori* un tel échec. Signalons que l'emploi de méthodes alternatives comme celle du renouvellement (non reportées ici) ne donnent pas de meilleur résultat.

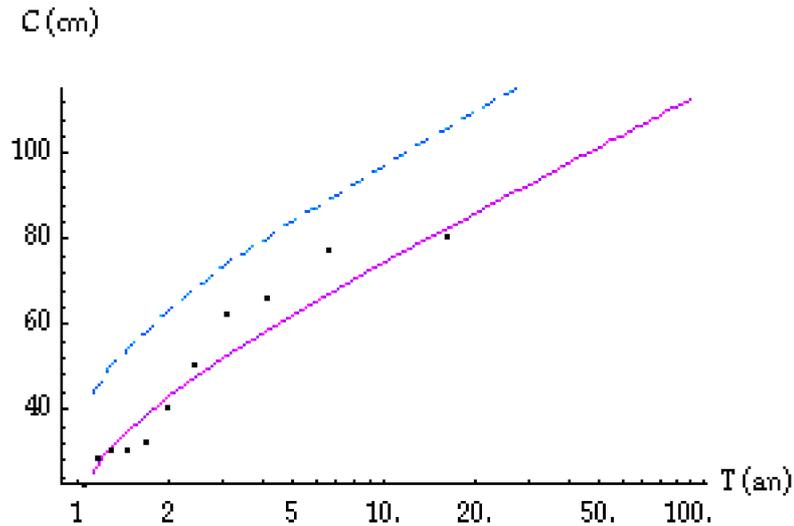


Figure 7. Distribution des maxima annuels de cumul de neige fraîche sur un jour en fonction de la période de retour établie à partir des données du poste nivo-observateur n° 888. En trait plein, loi de Gumbel calée sur les données :

$$P=7,66-3,35 \ln(-\ln(1-1/T)).$$

En trait discontinu, loi de Gumbel (éq. 10).

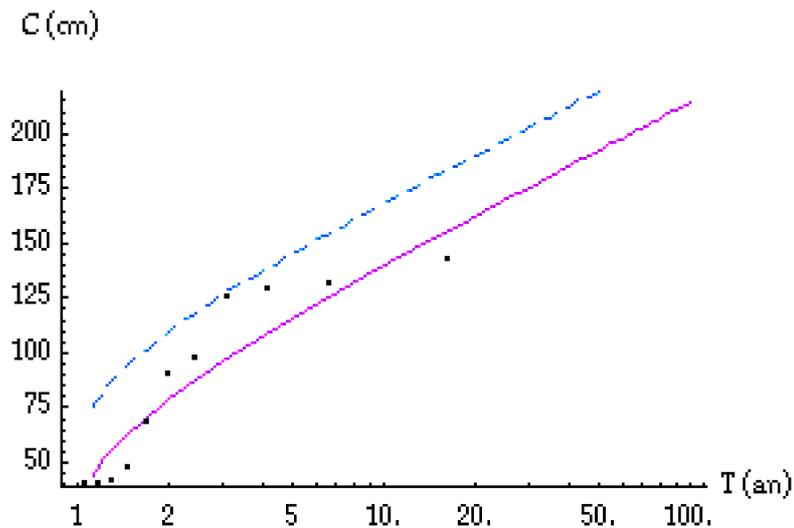


Figure 8. Distribution des maxima annuels de cumul de neige fraîche sur trois jours en fonction de la période de retour établie à partir des données du poste nivo-observateur n° 888. En trait plein, loi de Gumbel calée sur les données :

$$P=8,02-3,76 \ln(-\ln(1-1/T)).$$

En trait discontinu, on a tracé la courbe donnée par l'éq. 10.

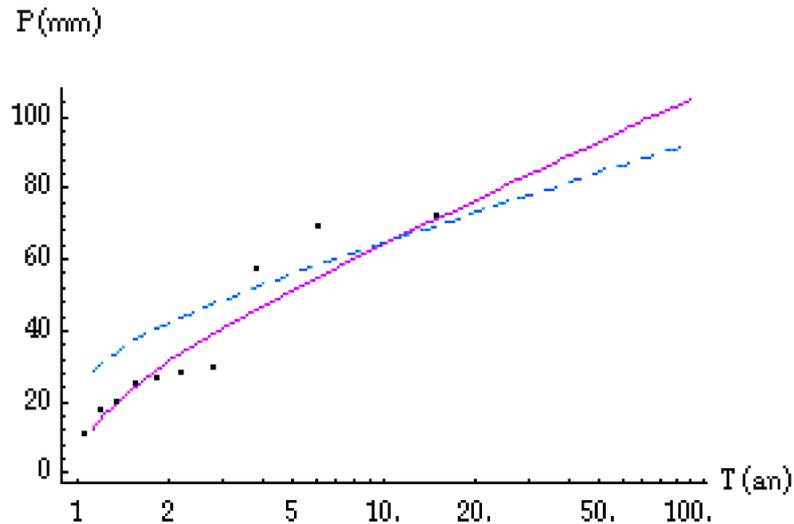


Figure 9. Distribution des maxima annuels de précipitation (équivalent en eau) journaliers en fonction de la période de retour établie à partir des données du poste nivo-observateur n° 888. En trait plein, loi de Gumbel calée sur les données :

$$P=5,2-3,51 \ln(-\ln(1-1/T)).$$

En trait discontinu, on a tracé la courbe donnée par l'éq. 9.

4. La formulation des scénarios

5.1. Quelle période de retour choisir ?

Le point crucial pour élaborer un dispositif de protection adaptée est de savoir quel est le risque contre lequel le maître d'ouvrage veut se protéger et comment caractériser ce risque. Pour cela, lorsque que, comme ici, on relie implicitement les dommages (ou l'amplitude) et la fréquence (plus la fréquence est faible, plus les dommages sont grands), il est commode de parler en termes de période de retour de l'aléa de référence. Reste à savoir comment faire pour déterminer rationnellement cette période de retour pour un enjeu donné.

Une méthode classique (qui a été utilisée par exemple en hydrologie) consiste à regarder le coût moyen estimé des dommages et de le rapporter au coût de la protection. En l'absence de protection, le coût moyen \bar{C} des dommages peut se calculer comme étant la valeur moyenne du coût des dommages (C) occasionnés par une avalanche de masse M et de fréquence F (en sachant que M est supposée être une fonction univoque de F), soit traduit sous forme mathématique :

$$(11) \quad \bar{C} = \int_0^{\infty} C(M) dF = \int_0^{\infty} \frac{C(M)}{T^2} dT$$

Lorsqu'on met en place un dispositif de protection qui protège contre les phénomènes de période de retour inférieure à la période de retour retenue pour le phénomène de référence ($T_{proj.}$), le coût moyen des dommages se trouve évidemment réduit puisqu'on suppose que le dispositif protège intégralement contre tous les événements de période de retour inférieure à $T_{proj.}$:

$$(12) \quad \bar{C}(T_{proj.}) = \int_{T_{proj.}}^{\infty} \frac{C(M)}{T^2} dT$$

Il s'ensuit que le coût moyen des dommages est une fonction décroissante de $T_{proj.}$. Si maintenant on examine le coût des investissements C_{inv} et entretiens nécessaires au dispositif de protection, on peut naturellement s'attendre à avoir une fonction croissante de $T_{proj.}$. On reporte sur la figure 10 un schéma des variations des deux fonctions ainsi que celle du coût total ($\bar{C} + C_{inv}$). La période de retour optimale du point de vue économique est celle qui minimise le coût total.

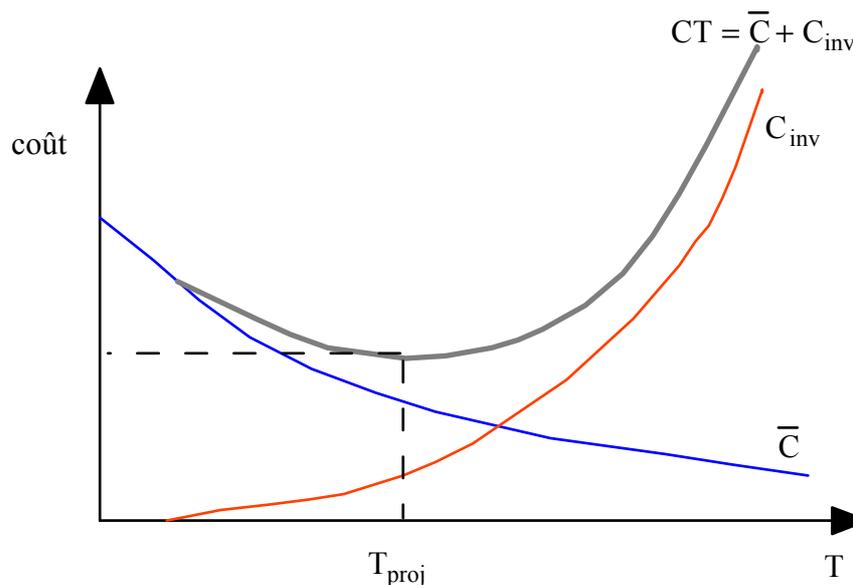


Figure 10. Schéma conceptuel représentant les variations du coût moyen des dommages, du coût de la protection, du coût total et définition de la période de retour optimale minimisant le coût total à supporter par le maître d'ouvrage.

Une telle procédure est très difficile à mettre en œuvre dès lors que les dommages ne sont pas uniquement matériels mais également corporels, ce qui est souvent le cas en matière d'avalanches. Dans pareilles situations, il est préférable de se fixer la période de retour du phénomène critique. Face à un choix qui peut sembler arbitraire, le maître d'ouvrage peut se demander quelles sont ses obligations et quelle est sa latitude dans le choix. En France, il n'y a actuellement pas de réglementation concernant la définition d'un aléa de référence, il y a seulement des usages. Par exemple, pour un grand barrage, il est admis qu'un évacuateur de crue doit laisser transiter la crue décennale. En matière d'avalanche, un usage assez courant (venu de Suisse) fixe arbitrairement à 300 ans la période de retour de l'avalanche de projet dans le cas d'une habitation. Cette période est prise égale à 1000 ans en Norvège et 2000 ans (voire plus) en Islande. En bref, dans un projet d'aménagement contre le risque d'avalanches, en fonction du contexte décisionnel, la période de retour du phénomène de référence pourra être arbitrairement définie ou bien elle fera l'objet d'une concertation entre les acteurs du projet.

5.2. Définition de l'avalanche de référence à l'aide de scénarios

Le choix de la période de retour ne suffit pas à caractériser complètement l'avalanche de référence. Il reste encore à préciser son type (aérosol/ coulante), la qualité de neige, l'apport de neige par le vent, etc. Deux classes de paramètres apparaissent dans la pratique :

- les paramètres « techniques » sont ceux fixés par le chargé d'étude à partir d'une étude des avalanches du site et de son expérience : type de neige, quantification des apports par le vent, rugosité, etc. Sauf cas particuliers, ils ne font pas l'objet de discussions avec le maître d'ouvrage ;
- les paramètres « décisionnels » sont ceux qui font l'objet d'une concertation entre les acteurs du projet, plus particulièrement entre le maître d'ouvrage et le chargé d'études : type d'avalanche, volume mobilisé, etc. C'est sur le maître d'ouvrage que repose le choix définitif des paramètres. Par exemple, en défense passive, il n'est pas toujours possible de lutter efficacement contre tous les types d'avalanche. Le choix du type de l'avalanche de référence prend alors toute son importance car il est rare qu'un site ne connaisse qu'un seul type d'avalanche. Par exemple, l'aménagement paravalanche de

Taconnaz (Haute-Savoie) est prévu selon la demande du maître d'ouvrage pour défendre le hameau contre des avalanches coulantes ; s'il a été vérifié qu'il n'aggrave pas le risque en cas d'aérosols, il n'est en principe pas très efficace contre ce type d'avalanche.

L'irruption de ces deux classes de paramètre dans la formalisation de l'avalanche de référence amène une part d'arbitraire qui peut sembler incompatible avec la démarche statistique dont nous venons de parler. Elle conduit en tout cas à introduire un descriptif de l'aléa de référence sur la base de plusieurs paramètres non probabilisables. Nous appelons *scénario* un tel descriptif. En fait, les deux démarches ne sont ni incompatibles, ni totalement étrangères mais au contraire se complètent utilement. Nous allons l'illustrer à travers l'exemple qui suit.

Nous avons vu que l'étude statistique permet d'établir le lien entre masse de neige précipitée (ou mobilisable) et période de retour. Il faut ensuite en déduire quelle masse de neige (ou volume) est mobilisé par l'avalanche de référence. Il y a donc toute une transformation de données à concevoir et à expliciter clairement. Cette opération fait intervenir un certain nombre de paramètres de nature très variable : masse volumique de la neige, extension maximale de l'aire de départ, cumul de neige par transport éolien, action des ouvrages de soutien (claires, râteliers) et de la forêt, etc. Nous retrouvons ici notre distinction entre paramètres aveugles et négociés : ici les paramètres aveugles sont des données plus ou moins intrinsèques déterminées par le chargé d'étude et peuvent être considérés comme des constantes du site (même si l'incertitude sur leur valeur est grande). Par exemple, la masse volumique de la neige doit être comprise entre 50 et 300 kg/m³ ; l'épaisseur des suraccumulations à l'échelle de l'aire de départ se compte en dizaines de centimètres. Les paramètres négociés sont du ressort du maître d'ouvrage. Il en est ainsi de la défense active (reboisement, ouvrages de soutien), dont l'efficacité peut évoluer significativement sur l'échelle de temps considérée. Ainsi, un dispositif très efficace doit permettre de fixer le cumul de neige même lors d'une chute de neige exceptionnelle (centennale par exemple) alors qu'un dispositif en partie délabré ne pourra en stocker qu'une partie. Dans le premier cas, le volume de neige mobilisable par l'avalanche est quasi nul tandis que dans le second cas l'avalanche pourra mobiliser le volume non maintenu par le dispositif de défense active. C'est

bien une décision (et l'engagement) du maître d'ouvrage sur l'entretien du dispositif qui permet de fixer un coefficient de stockage pour la zone d'accumulation.

L'effet de ces deux classes de paramètre sur la transformation (masse précipitée -> volume mobilisé) est bien distinct :

- Dans le cas des paramètres techniques, les différentes courbes que l'on peut obtenir en faisant varier la valeur des paramètres (constants et intrinsèques au site) sont toutes de forme similaire. Le chargé d'études peut se fixer un jeu de valeurs vraisemblables (à dire d'expert) pour ces paramètres et ainsi tracer une courbe maîtresse donnant le volume mobilisé en fonction de la période de retour comme l'illustre la figure 11. Compte tenu de l'incertitude sur le jeu de paramètres, il faudrait tenir compte non pas d'une courbe maîtresse mais d'un faisceau de courbes. On peut alors faire remarquer que l'incertitude sur l'estimation des volumes peut se traduire en incertitude sur la période de retour réelle du phénomène critique contre lequel on cherche à se protéger. Dans ce cas, l'analyse statistique reste sous-jacente à l'établissement du scénario.

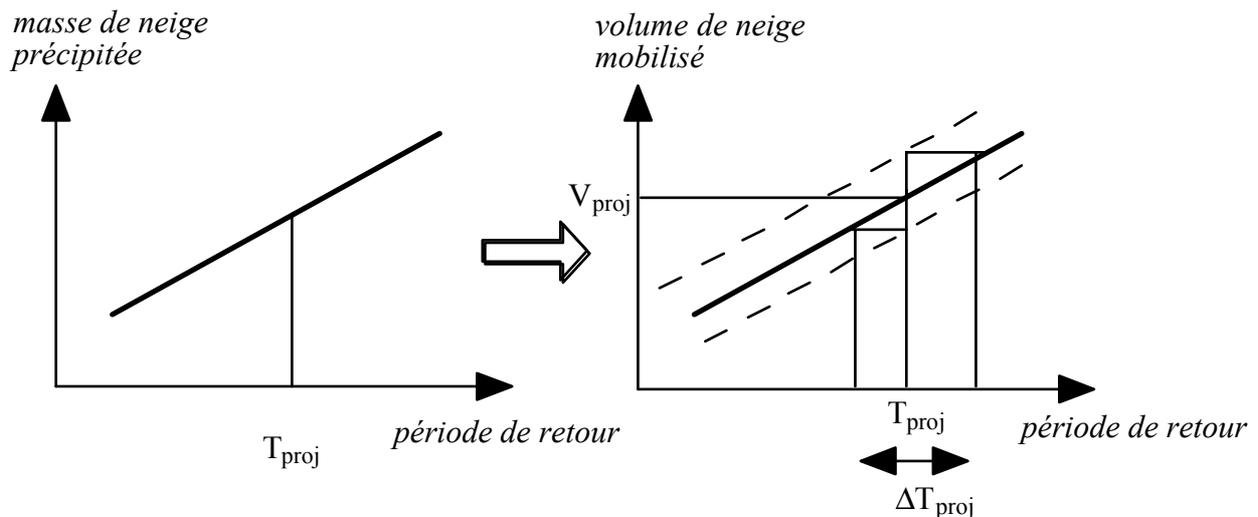


Figure 11. Schéma conceptuel de transformation de la courbe masse de neige précipitée/ période de retour en une courbe volume mobilisé/ période de retour. En fait, selon les paramètres retenus, il n'y a pas une mais plusieurs courbes possibles. Plutôt que d'introduire une incertitude sur les volumes ainsi estimés, on préfère introduire une plage d'incertitude sur la période de retour effective du phénomène critique contre lequel on se protège.

• Dans le cas des paramètres décisionnels, les différentes courbes donnant le volume mobilisé peuvent être très différentes les unes des autres. L'effet de seuil indiqué plus haut dans l'exemple de la défense active en est une parfaite illustration. Reprenons-le. Sur la figure 12, nous reportons un schéma conceptuel représentant l'évolution de la courbe maîtresse (volume mobilisé/ période de retour) en fonction du temps. Nous supposons initialement un dispositif de défense active pleinement efficace. Initialement (à t_0), si la période de retour retenue est inférieure à la période de retour du seuil, le volume mobilisé par l'avalanche est nul. Au cours du temps (à t_1 puis à t_2), si, faute d'entretiens ou bien à cause de phénomènes perturbateurs extérieurs (par exemple écoulement), le dispositif se dégrade, la courbe maîtresse évolue, et avec elle le volume qui est mobilisé par des avalanches. C'est un choix possible que celui du maître d'ouvrage de demander au chargé d'études de prendre en compte ou non la défense active avec un taux de stockage moyen (à définir), mais cette décision équivaut aussi à un engagement de sa part d'assurer l'entretien sur l'échelle de temps du projet. Là encore, l'approche statistique est sous-jacente à la formulation du scénario ; elle est utile car elle permet de mettre réellement en perspective les problèmes liés au choix de la période de retour de l'avalanche de référence.

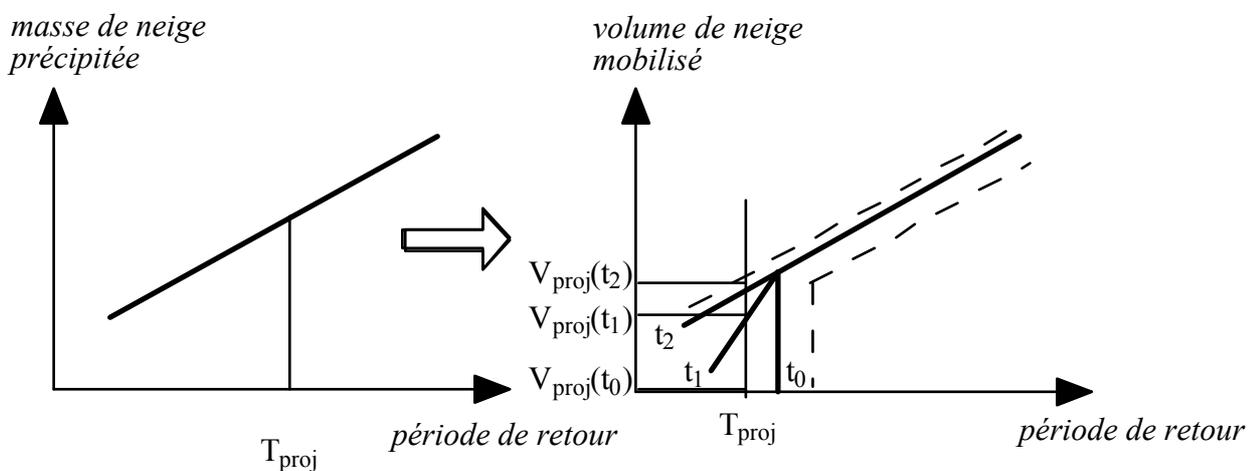


Figure 12. Schéma conceptuel de transformation de la courbe masse de neige précipitée/ période de retour en une courbe volume mobilisé/ période de retour. En fait, selon l'évolution des paramètres, la

courbe maîtresse peut évoluer. Le volume de projet (c'est-à-dire le volume de neige mobilisé par l'avalanche de référence de période de retour T_{proj}) peut alors varier dans de grandes proportions.

6. Conclusions

L'utilisation d'outils statistiques (empruntés à l'hydrologie) permet de déterminer la masse de neige précipitée en fonction de la période de retour sur un site donné. En admettant que l'avalanche de référence est consécutive à des précipitations de neige importante et que le volume mobilisable résulte du cumul sur les trois derniers jours, il est possible d'établir une distribution statistique du volume de neige mobilisable en fonction de la période de retour. A cause de l'effet d'un certain nombre de paramètres d'origine naturelle ou humaine, le volume de neige mobilisé par l'avalanche de référence ne coïncide pas nécessairement avec le volume précipité. L'opération de transformation (masse précipitée -> volume mobilisé) fait partie d'un processus que doit entreprendre le chargé d'études en vue de caractériser pleinement l'avalanche de référence. On a appelé *scénario d'avalanche* le descriptif ainsi obtenu. Le recours à des paramètres traduisant tout à la fois l'incertitude, l'influence de facteurs perturbatifs, des choix du maître d'ouvrages, etc. peut laisser redouter une part d'arbitraire qui ruinerait les efforts d'objectivité et de rationalité accomplis par l'approche statistique. Nous avons montré qu'au contraire l'approche statistique reste toujours sous-jacente au scénario. Permettant ainsi une mise en perspective des problèmes, elle reste très utile au maître d'ouvrage dans la détermination de la période de retour de l'avalanche de référence.

Nous avons également insisté sur la part de décision relevant du maître d'ouvrage dans l'établissement du scénario de l'avalanche de référence. Si le choix de certains paramètres (l'effet du vent par exemple) est du ressort des compétences techniques du chargé d'études, d'autres descripteurs (le type de l'avalanche) sont déterminés sous la responsabilité du maître d'ouvrage après une phase de concertation entre les acteurs du projet. C'est cette phase que les sociologues appellent le «risque négocié». Dans la mesure où la recherche en responsabilité sera de plus en plus systématique après des accidents d'avalanche, le partage des rôles et la délimitation des champs de décision sont de première importance ; ils devront être clairement explicités au cours de l'étude. On s'éloigne de la période où le chargé d'études, sous la

casquette d'expert, assumait toute la chaîne de décision. L'outil statistique comme outil mathématique et graphique sera sans doute de plus en plus utile pour échanger les points de vue entre les acteurs du projet. Puissant et robuste, il souffre néanmoins de posséder une terminologie qui peut prêter à confusion. L'actualité du mois de février 1999 avec son cortège de catastrophes sur l'arc alpin en est un triste écho. La mémoire collective sous le choc et la presse relatent des phénomènes rarissimes : on a parlé d'avalanches «centenaires» (sic). Pourtant le XX^e a connu plusieurs crues avalancheuses d'ampleur égale ou supérieure. Sans doute l'absence d'hiver rigoureux depuis 1981 a-t-il entretenu l'idée que l'on en avait fini avec les avalanches monstrueuses d'antan ? Là encore, une mise en perspective statistique peut éclairer les décideurs sur la gestion des risques sur le long terme.

Outre ces aspects méthodologiques, l'article a abordé également certains points techniques. A notre connaissance, encore assez peu de choses a été réalisé en France sur la statistique des chutes de neige et sur le problème de la détermination de la période des avalanches. A ce stade des connaissances, les propositions données dans l'article manquent encore d'une validation plus complète. Tout un travail de recherches est encore à accomplir dans le domaine.

7. Références

- A. Burkard, B. Salm : "Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d_0 zur Berechnung von Fliesslawinen", rapport n°668, (IFENA, Davos, 1992). Une traduction française existe dans : "Estimation de l'épaisseur moyenne de déclenchement d_0 pour le calcul des avalanches coulantes", trad. C. Ancey, Cemagref, 1994.
- P. Foehn, P. Haechler : "Prévision de grosses avalanches au moyen d'un modèle déterministe-statistique", comptes rendus de la 2^e rencontre internationale sur la neige et les avalanches, Grenoble, avril 1978 (ANENA, 1978), 151-165.
- C. Ancey (coord.) : "Guide neige et avalanches", seconde édition (Édisud, Aix-en-Provence) 330 p, 1998.

- A Eybert-Berard, P. Perroud, G. Brugnot, R Mura, L. Rey : “Mesures expérimentales dans l’avalanche. Résultats expérimentaux du col du Lautaret (1972-1978)”, Comptes rendus de la 2^o rencontre internationale sur la neige et les avalanches, Grenoble, avril 1978, pp 203-224, ANENA (1978).
- O Gilard : “Les bases de la méthode Inondabilité”, Cemagref Éditions, 1998, 207 p.
- A. Kiefer Weisse, *Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises)*, Thèse de doctorat INPG (1998).
- Maurice Meunier (coord.), *Étude des courbes intensité-durée-fréquence des précipitations de 1 h à 24 h dans les Alpes*, Cemagref-EDF, à paraître, 1999.
- Geneviève Decrop, *De l’expertise scientifique au risque négocié. Le cas du risque en montagne*, Cemagref, éditions 1998.