

Analyse des fluctuations spatio-temporelles des nombres d'avalanches dans les Alpes du Nord à partir de l'EPA

L'enquête permanente sur les avalanches (EPA) est une chronique très détaillée d'événements d'avalanche sur près de cinq mille sites sélectionnés en France. Source d'information extrêmement précieuse pour les gestionnaires du risque en montagne, ses données sont utilisées ici par des chercheurs pour quantifier et étudier les variations de l'activité avalancheuse dans l'espace et dans le temps, et ce afin de mieux comprendre la structure spatiale des avalanches et sa réponse aux variations du climat. Les résultats obtenus dans cette étude, une fois confrontés à des données climatiques, pourront aider à mieux anticiper l'évolution future de l'activité avalancheuse.

P

our la connaissance des avalanches*, les mesures sur sites instrumentés sont irremplaçables car elles permettent d'obtenir une information très détaillée (profils de vitesses et pression, régime d'écoulement, etc.). En contrepartie, elles sont coûteuses et

par conséquent rares. Les expériences de laboratoire à échelle réduite sur la neige ou les matériaux granulaires sont plus faciles à répéter dans des conditions contrôlables, mais elles ne correspondent pas complètement à des avalanches réelles. À « mi-chemin » entre ces deux types d'approches, les données historiques concernent un nombre restreint de variables (extension, date, etc.) mais de vraies avalanches. Elles permettent de mieux connaître les avalanches à une échelle spatiale assez large correspondant à celle des massifs montagneux et du forçage* climatique. En outre, elles présentent un intérêt pour la gestion du risque* dès lors qu'elles sont collectées de façon systématisée.

En France, l'information historique sur l'aléa* avalancheux repose sur deux bases de données anciennes : une chronique enregistrant les événements se produisant sur des sites sélectionnés, l'enquête permanente sur les avalanches (EPA*), et une carte d'avalanches couvrant des zones plus larges avec un objectif d'exhaustivité des sites recensés, la carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA*). EPA et CLPA offrent des visions temporelle et spatiale complémentaires d'un même phénomène. Plus récemment, une base dite « sites sensibles d'avalanches » (SSA*) a été créée afin d'inventorier les sites présentant les niveaux de risque les plus élevés.

Le fort développement de la collecte des données historiques en France est fortement lié aux choix réglementaires effectués dans notre pays. Les zones d'aléa y ont été

introduites en 1974 et, dès le départ, le rôle central des bases de données avalancheuses pour leur élaboration a été souligné. Depuis, la législation s'est renforcée, avec notamment l'intégration des plans de zones exposées aux avalanches (PZEA*) dans les plans de prévention des risques (PPR*), mais son esprit ne s'est pas modifié. Ainsi, le besoin en information historique persiste, et celle-ci prime toujours sur l'emploi systématisé de modèles numériques déterministes.

L'EPA, sa rénovation et sa valorisation

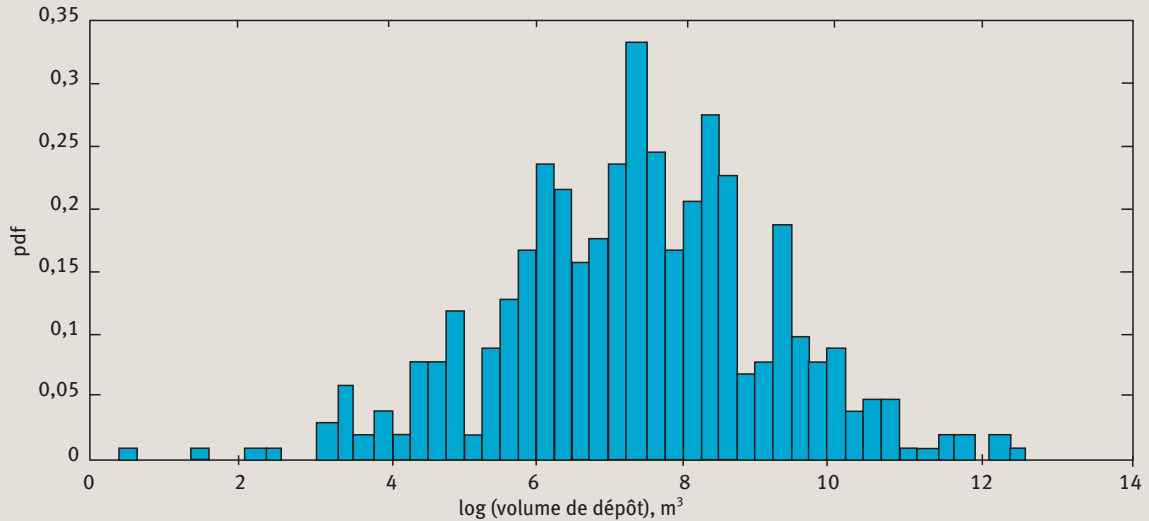
L'EPA, à l'interface entre recherche et nécessités opérationnelles

La première qualité d'une base de données avalancheuse est de proposer un recueil systématisé selon un protocole standardisé afin de disposer de longues séries de données homogènes. L'EPA répond assez bien à cette exigence puisque les données les plus anciennes remontent au tout début du vingtième siècle et que le protocole de collecte a assez peu évolué depuis. L'information fournie par l'EPA est donc extrêmement précieuse, aussi bien pour la prédétermination à visée opérationnelle qu'en termes de connaissance des avalanches. De ce fait, au sein des bases de données dédiées aux avalanches en France, l'EPA occupe une place à part, très représentative de la complémentarité entre recherche et expertise de terrain qui est au cœur des missions du Cemagref.

L'EPA historique

L'EPA a été initiée par l'inspecteur général des eaux et forêts Mougins (1922). Elle a d'abord concerné la Savoie et la Haute-Savoie, puis a été progressivement étendue

1 Volumes de dépôt des avalanches sur sites EPA durant l'hiver 2006

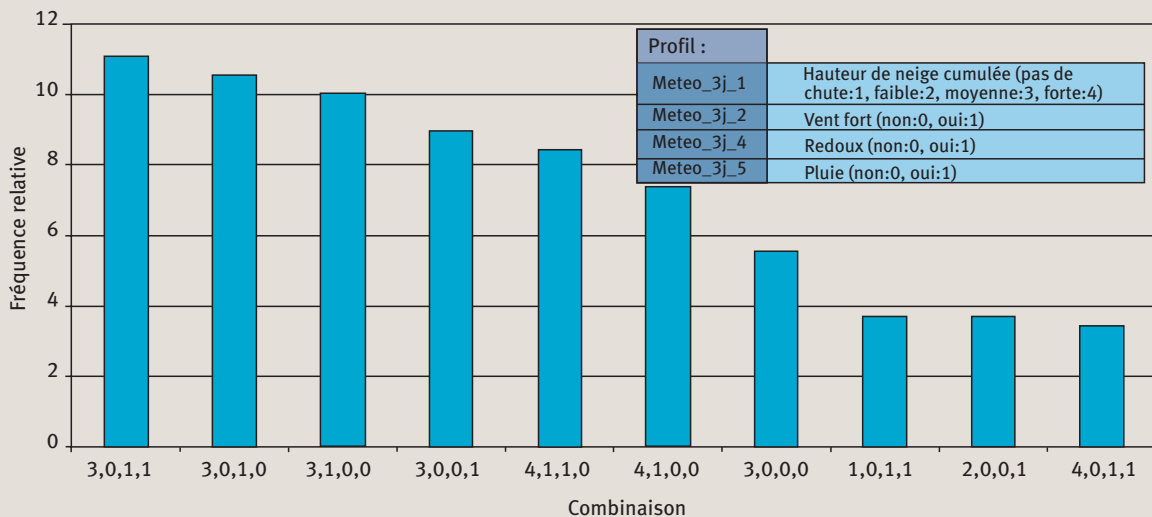


426 valeurs disponibles ; 322 d'entre elles correspondent à des avalanches de moins de 5 000 m³, 98 d'entre elles à des avalanches de 5 000 à 100 000 m³ et 6 d'entre elles à des avalanches de plus de 100 000 m³, avec un maximum annuel de 300 000 m³.

à l'ensemble des Alpes et des Pyrénées. La collecte de données est assurée par des agents de l'Office national des forêts (ONF*), chaque agent étant responsable d'un nombre précis de sites. Les observations recueillies sont consignées dans un carnet puis centralisées dans le fichier EPA proprement dit par le Cemagref de Grenoble. Depuis le début de l'observation, plus de 80 000 événements ont été enregistrés sur près de 5 800 sites, avec de 1 à plus de 100 événements par site. Une telle quantité d'informations sur des avalanches naturelles est quasi unique au monde. Le fichier EPA contient les dates des événements avalancheux observés, ainsi que des informations quanti-

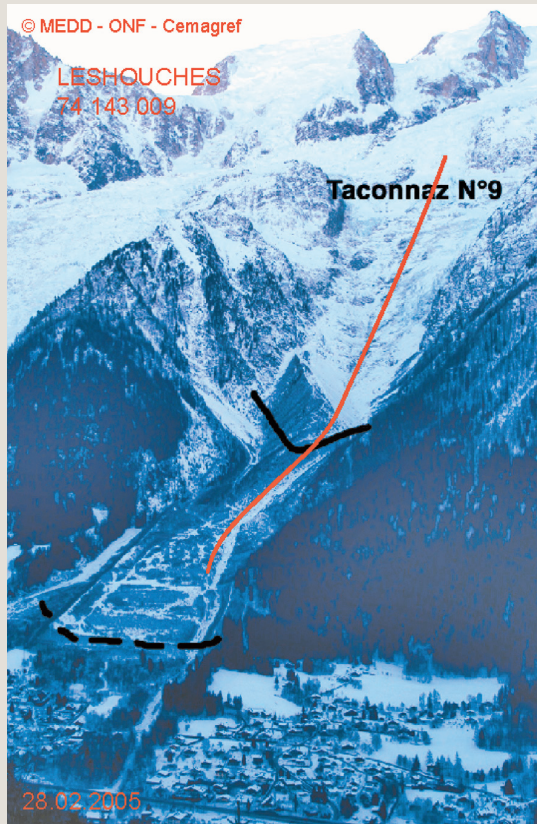
tatives et catégorielles sur les événements. Les variables quantitatives sont principalement les altitudes de départ et d'arrêt ainsi que les trois dimensions (longueur, largeur et hauteur) du volume de dépôt. La figure 1 présente ainsi les volumes de dépôt enregistrés au cours de l'hiver 2006. Les variables catégorielles permettent de mieux connaître les conditions météorologiques au moment du déclenchement, de décrire sommairement leurs caractéristiques (nature de la zone de départ, mode de propagation, etc.) et les dégâts occasionnés. Les conditions météorologiques de déclenchement correspondant à la campagne 2006 sont ainsi présentées sous la forme des combinaisons les plus fréquentes en figure 2.

2 Profils météorologiques de déclenchement sur sites EPA durant l'hiver 2006



Le cumul de neige est enregistré selon quatre modalités et le vent fort, le redoux et la pluie, sous forme de présence/absence. La majorité des déclenchements se sont produits dans un contexte relativement homogène de chutes de neige moyennes et/ou fortes accompagnées de pluie et/ou de redoux et/ou de vent fort.

3 Exemple d'un site EPA : Couloir de Taconnaz, Haute-Savoie, France



Le tracé rouge correspond au chenal d'écoulement principal. Le tracé noir correspond au seuil d'observation. Le tracé noir pointillé correspond au seuil d'alerte qui est pour ce couloir exceptionnel la digue frontale de l'ouvrage paravalanche installé en début de zone d'arrêt.

► La rénovation de l'EPA

Suite à la catastrophe de Montroc en 1999, une vigoureuse action de rénovation des bases de données consacrées aux avalanches en France a été effectuée entre 2002 et 2006 (Bélangier et Cassayre, 2004). Celle-ci a été financée par le ministère chargé de l'environnement et conduit par l'ONF et le Cemagref. Les protocoles d'observation ont été entièrement revus et une grande quantité d'informations nouvelles a été acquise sur le terrain. L'ensemble des données cartographiques, textuelles et quantitatives a été numérisé et le site internet www.avalanches.fr a été développé de façon à permettre un accès rapide à la donnée ainsi qu'à une documentation technique adaptée. À présent, l'effort porte principalement sur l'inscription du fonctionnement des dispositifs dans une démarche qualité ainsi que sur leur stabilisation, de façon à en assurer la pérennité sur le très long terme.

La rénovation de l'EPA s'est essentiellement traduite par une mise à jour du réseau d'observation et de la liste des sites suivis. Chaque site présent dans la chronique a de ce fait été étudié individuellement. Il s'agissait de décider si l'observation devait être poursuivie ou arrê-

tée en fonction du nombre et de la qualité des données collectées depuis le début de l'observation ainsi que du niveau d'exposition d'éventuels enjeux*. Quelques nouveaux sites présentant de forts enjeux ont également été ajoutés, de sorte que l'EPA compte à présent quelque 3 900 sites en cours d'observation.

Pour chacun des sites, une description topographique a été effectuée. Une photographie (figure 3) permet de localiser précisément le site sur la carte. La carte du site est tracée sur un fond topographique noir et blanc à l'échelle 1/25 000. Elle comprend la délimitation de la zone à observer, le chenal d'écoulement principal, un seuil d'observation, un seuil d'alerte et un point d'observation (figure 4). Les événements dont l'altitude d'arrêt est inférieure au seuil d'observation doivent systématiquement être enregistrés. Des événements plus modestes peuvent l'être également s'ils présentent un intérêt quelconque (victimes, trajectoire ou volume atypique, par exemple). Le seuil d'alerte, atteint par des avalanches extrêmes seulement, est utilisé pour l'enregistrement de l'événement par le service de restauration des terrains en montagne (RTM*), et éventuellement dans la CLPA dans le cas d'un dépassement des limites connues. Le point d'observation est un endroit sûr, même par conditions météorologiques difficiles et offrant une bonne visibilité sur le site.

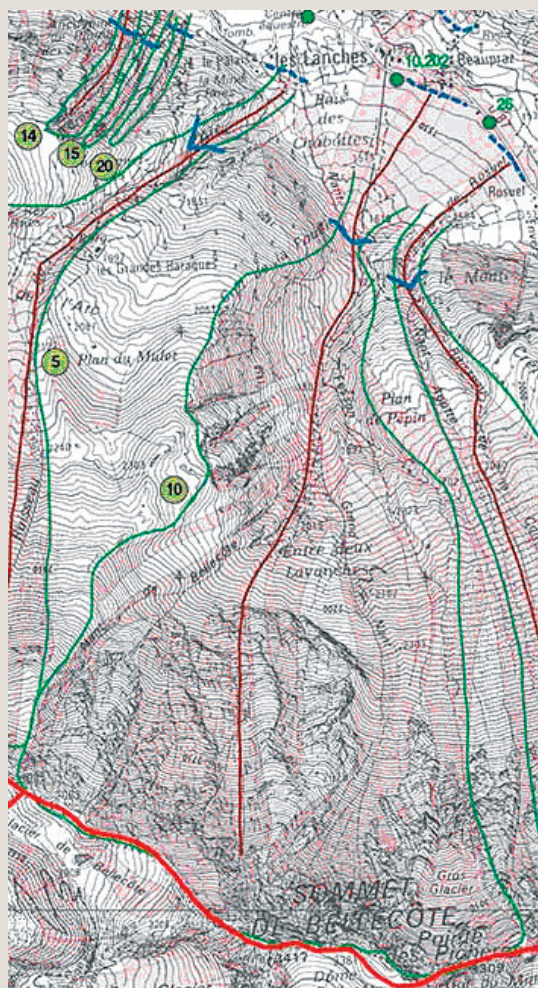
Quelle confiance accorder aux données ?

Du fait de son protocole de collecte original, le problème de la qualité des données de l'EPA se pose de façon très aiguë. L'utilisateur est donc rappelé à la plus grande prudence et est invité autant que possible à confronter l'EPA aux autres informations locales disponibles. Les principales sources d'erreur sont :

- l'état d'observation des sites. Actuellement, les sites observés sont connus précisément. Par contre, avant la rénovation, le nombre de sites où les événements étaient effectivement observés n'est souvent pas connu, de sorte que l'absence d'événements dans la base ne signifie pas nécessairement que l'activité a été nulle ;
- la localisation des sites. Pour les données anciennes, elle est parfois incertaine car les noms de certains sites ont changé au cours du temps. Plus généralement, l'information cartographique n'était pas précise avant 1950, de sorte qu'un niveau d'incertitude assez élevé entoure les altitudes et les dimensions de dépôt les plus anciennes ;
- l'imprécision irréductible due à la difficulté de l'observation : limites en termes de visibilité, difficulté à évaluer l'altitude de départ depuis le point d'observation, difficulté de l'estimation visuelle des dimensions de dépôt, etc.
- des erreurs ponctuelles introduites dans le fichier, soit au moment de l'observation, soit au cours des opérations successives d'archivage des données.

Malgré tout, sous réserve de ne considérer que les régions où les événements sont nombreux et enregistrés depuis longtemps, et de se placer à des échelles de temps et d'espace assez grandes pour s'affranchir des variations de la qualité de l'observation locale, l'EPA présente une certaine régularité. L'ensemble des travaux engagés

4 Site EPA « Les Lanches » sur fond topographique, Peseix-Nancroix, Savoie, France



Pour chaque site EPA, son identifiant et le point d'observation apparaissent en vert, le chenal d'écoulement principal en brun, les seuils d'observation et d'alerte en bleu. Les emprises de CLPA apparaissent en rosé sur le fond topographique.

depuis 2001 vont d'ailleurs dans le sens d'un renforcement de la crédibilité de l'information.

Valorisation en prévision

En France, l'EPA n'est pas utilisée pour la prévision des déclenchements car une approche physique est privilégiée par Météo France. Celle-ci repose sur l'acquisition et l'assimilation en temps réel de données météorologiques, la modélisation numérique de l'évolution du manteau neigeux à l'échelle de massifs montagneux et une synthèse experte effectuée par les prévisionnistes. Toutefois, quelques travaux ont exploré les corrélations entre le forçage météorologique et l'activité avalancheuse enregistrée dans l'EPA, en particulier à l'aide de modèles de type logistiques (Jomelli *et al.*, 2007). Les situations météorologiques favorables au déclenchement à l'échelle des massifs ont également été explo-

rées, notamment sous la forme de corrélations entre les événements observés et le niveau de risque affiché par Météo France.

Valorisation pour la prédétermination

La valorisation usuelle des données de l'EPA est la prédétermination locale. Les informations y figurant sont en effet très utiles pour évaluer la variabilité de l'aléa, ses caractéristiques extrêmes et les conditions d'occurrence* des événements. Les informations de l'EPA s'intègrent donc facilement dans la synthèse experte généralement utilisée pour dresser les cartes d'aléa. De même, les altitudes de départ et d'arrêt ainsi que les dimensions du dépôt enregistrées dans l'EPA sont particulièrement utiles à la calibration de modèles numériques de propagation. L'EPA permet également la mise en œuvre d'approches statistiques. Les « méthodes norvégiennes », un ensemble de régressions simples développées dans les pays nordiques, ne sont pas très utilisées en France, car il a été montré qu'elles n'étaient pas bien adaptées aux géométries complexes caractérisant les couloirs des Alpes. Plus récentes mais plus délicates dans leur mise en œuvre, les approches statistiques-dynamiques sont parfaitement adaptées à l'EPA (Eckert *et al.*, 2008). Un autre article de ce numéro leur est consacré.

Utilisation à l'échelle « régionale »

Les figures 1 et 2 ont déjà donné des exemples d'utilisation de l'EPA pour la caractérisation de l'intensité des événements de l'hiver 2006/07. La figure 5 présente quant à elle la distribution spatiale des événements de l'hiver précédent à l'échelle des massifs utilisés pour la prévision du risque d'avalanche. De telles analyses permettent d'établir un bilan annuel de l'activité avalancheuse en France, de mettre en évidence les pics exceptionnels (Cosse *et al.*, 2005) ou de relier les conditions nivo-météorologiques de déclenchement avec l'intensité des événements.

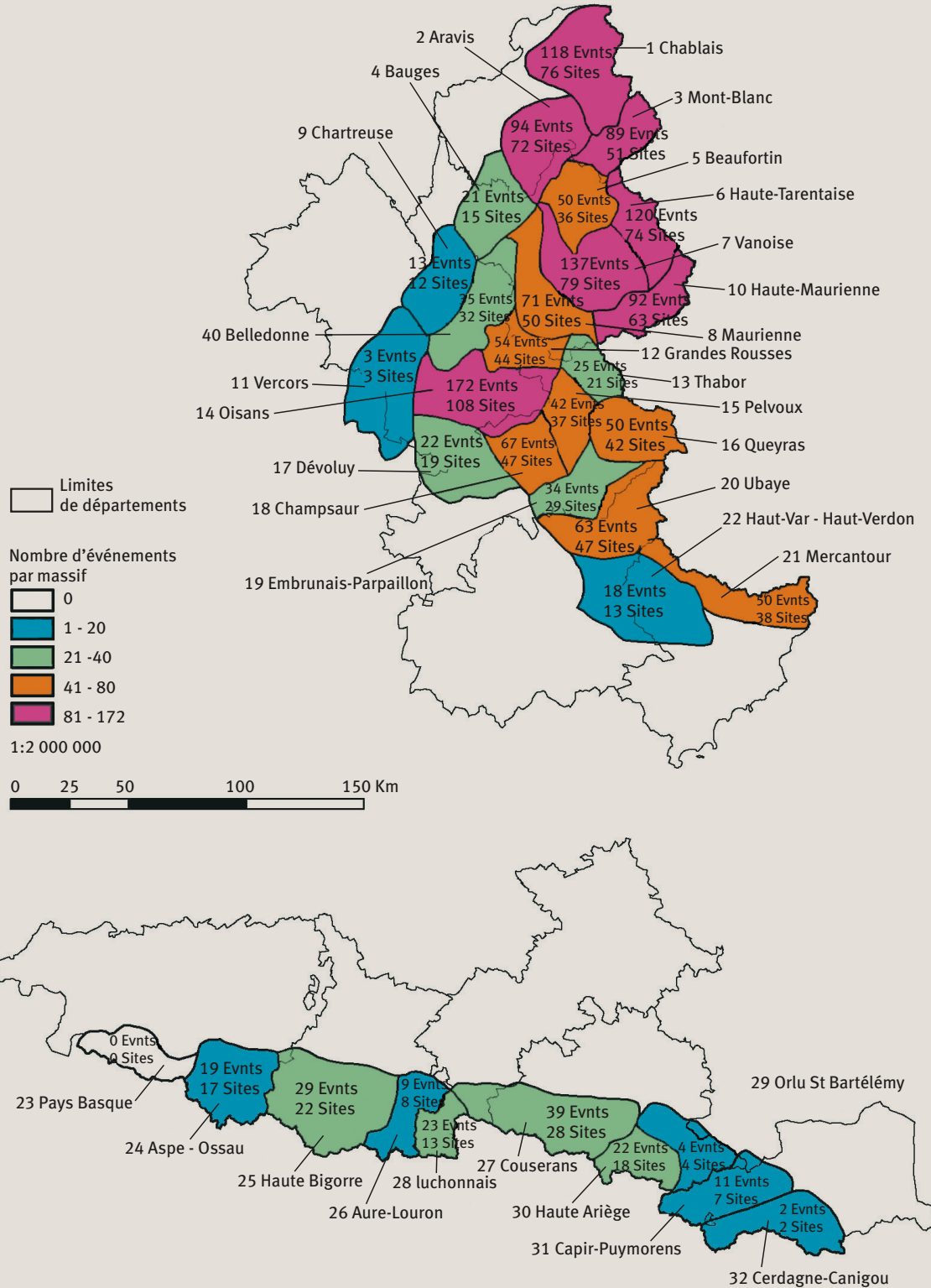
Analyse spatio-temporelle des nombres d'avalanches

Évaluer la fréquence* des avalanches à l'échelle communale

En guise d'illustration des utilisations possibles de l'EPA, cet article présente une analyse spatio-temporelle des fluctuations des nombres d'avalanches par couloir et par hiver enregistrés dans les Alpes du Nord sur la période 1946-2005. Elle s'appuie sur des travaux récents du Cemagref (Eckert *et al.*, 2007; 2010) auquel le lecteur intéressé est invité à se référer pour davantage de précisions techniques, notamment concernant la méthode d'analyse statistique et sa mise en œuvre.

Pour les sites EPA en cours d'observation, un nombre moyen d'avalanches par hiver peut être estimé simplement en divisant le nombre d'événements observés par le nombre d'hivers d'observation. Malheureusement, le faible nombre d'avalanches affectant généralement un site donné rend un tel calcul très incertain. L'idée proposée est donc de moyenniser sur un ensemble plus large, la

5 Distribution spatiale des avalanches sur sites EPA durant l'hiver 2005



Dans les Alpes (en haut), la majeure partie de l'activité a été localisée dans les Alpes du Nord avec quatre massifs enregistrant plus de 100 événements. Dans les Pyrénées (en bas), l'activité a été notable (de 11 à 39 avis) dans six massifs plutôt situés au centre de la chaîne.

► commune, et de partager l'information d'une commune à une autre au moyen d'un modèle statistique où la structure spatiale est représentée de façon explicite. Bien-sûr, tous les sites d'une même commune n'ont en réalité pas le même fonctionnement, du fait d'altitudes, de topographies et d'expositions différentes. De même, la similarité de fonctionnement n'est pas fonction de la distance uniquement. Néanmoins, l'activité avalancheuse présente une certaine cohérence géographique à l'échelle des massifs du fait de caractéristiques géologiques (nature des roches, pentes) et climatiques (températures, précipitations) communes. Cette cohérence est exploitée par Météo France pour l'évaluation et l'affichage du niveau de risque journalier d'avalanche. Elle est également mise à profit dans cette étude.

Les variations interannuelles de l'activité avalancheuse à l'échelle régionale sous l'action du climat constituent une autre difficulté. L'analyse proposée comprend donc une composante non stationnaire explicite traduisant la variabilité du climat hivernal en haute altitude. L'étude présente ainsi également un intérêt en termes de quantification de la réponse de l'activité avalancheuse au changement climatique. Par hiver, on entend ici la « campagne EPA », l'hiver 2000 étant par exemple l'ensemble des jours du 1^{er} septembre 2000 au 30 août 2001. Notons que l'on se place dans une logique de prédétermination, c'est-à-dire d'évaluation de valeurs moyennes utiles à l'aménagement du territoire, et pas de prévision. Les relations entre activité avalancheuse et forçage climatique instantané ne sont donc pas explicitées comme elles le sont dans les approches de type « plus proche voisin » à la base des modèles statistiques de prévision du déclenchement (e.g. Obled et Good, 1980).

Une méthode d'analyse adaptée à la structure des données

La région étudiée (au sens large du terme, par exemple un ou plusieurs départements) est composée de M communes. Les nombres d'avalanches se produisant chaque hiver sur l'ensemble des sites de chaque commune au cours des T_{obs} hivers d'observation sont notés $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{j1}, \dots, a_{MT_{obs}})$, $j \in [1, M]$, $t \in [1, T_{obs}]$. L'occurrence d'une avalanche étant un phénomène discret et rare, on la modélise par une loi de Poisson à un seul paramètre λ . Les paramètres λ_{jt} , $j \in [1, M]$, $t \in [1, T_{obs}]$ résument alors l'activité avalancheuse locale et ses variations au cours du temps (équation 1).

Afin de comparer les observations d'une commune à l'autre et d'un hiver à l'autre et de détecter les « anomalies », une normalisation par un nombre e_j , $j \in [1, M]$ d'avalanches attendu chaque hiver dans chaque commune est utilisée (équation 2). Les RR_{jt} sont alors « les risques relatifs » : si RR_{jt} est significativement supérieur à 1, un excès de risque a existé dans la commune j durant l'hiver t . Réciproquement, si RR_{jt} est significativement inférieur à 1, la commune considérée a été sous-exposée durant l'hiver t .

Les log risques relatifs (équation 3) sont décomposés en un terme local non structuré v_j , un terme spatialement structuré u_j et un terme temporel g_t (équation 4). v_j permet de représenter un défaut ou un excès local dans le risque relatif qui

n'est pas corrélé avec ce qui est observé dans les autres communes. Il est modélisé par un bruit blanc gaussien avec un paramètre σ_v à estimer (équation 5). u_j traduit la corrélation spatiale à travers un modèle gaussien « conditionnel autorégressif » (CAR*). Ce modèle avec seulement un paramètre σ_u à estimer suppose que, sachant toutes les autres valeurs $u_{-j} = u_{k \neq j}$ du champ spatial $u = (u_1, u_2, \dots, u_M)$, la valeur u_j est issue d'une distribution normale dont la moyenne est égale à la moyenne de u_{-j} pondérée par l'inverse de la distance ω_{jk} entre la commune considérée et toutes les autres communes. L'écart-type est, quant à lui, proportionnel à la somme des distances inverses $\omega_{j+} = \sum_{k \neq j} \omega_{jk}$ entre la commune considérée de toutes

les autres communes. La valeur u_j est ainsi lissée par tous les autres u_{-j} avec un niveau de lissage dépendant de l'inverse de la distance totale séparant la commune considérée et toutes les autres (équation 6). Enfin, g_t modélise de possibles variations d'un hiver sur l'autre des risques relatifs à l'échelle régionale. Aucune structure temporelle n'est imposée sur la période d'observation, de sorte qu'il est supposé gaussien et de moyenne nulle quel que soit l'hiver, avec un paramètre de variance* σ_g^2 quantifiant la variabilité interannuelle (équation 7).

Une bonne mesure de la significativité des différents termes est donnée par la comparaison de leurs variances respectives. Ainsi le rapport r_s compare la variance du terme spatial à la variabilité totale (équation 8). De même, le rapport r'_s compare uniquement le terme spatial au bruit blanc, de façon à évaluer la significativité de la structure spatiale (équation 9). r_s et r'_s peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 en vérifiant toujours $r_s < r'_s$. Si $r'_s > 0.5$, des motifs spatiaux significatifs existent. Si, en outre, $r_s > 0.5$, la structure spatiale domine les deux autres sources de variabilité. Enfin, le rapport r_{temp} compare la variabilité temporelle à la variabilité totale de façon à évaluer l'influence des fluctuations interannuelles sur les observations (équation 10).

Application aux Alpes du Nord

Les données utilisées sont les décomptes avalancheux à l'échelle communale en Savoie et Haute-Savoie pour les hivers allant de 1946 à 2005, soit soixante ans d'EPA. Le nombre total d'événements concernés s'élève ainsi à 30 082 avalanches sur 204 communes. Deux procédures de test complémentaires ont été employées pour détecter de façon automatisée les observations manquantes dans les chroniques communales. La première détecte, pour les communes où l'activité avalancheuse est importante, les hivers où il n'y a pas eu d'observation. La seconde détecte, quelle que soit la taille de la commune, des longues périodes sans observation, à cause de l'absence persistante d'un observateur local, par exemple. La donnée n'est finalement considérée comme correcte que si elle est résistante aux deux tests. Dans le cas contraire, elle est considérée comme manquante.

L'application de ce double filtrage conduit à considérer 4 975 valeurs de a_{jt} comme non observées, soit

ÉQUATIONS...

$$p(a_{jt} | \lambda_{jt}) = \frac{\lambda_{jt}^{a_{jt}}}{a_{jt}!} \times \exp(-\lambda_{jt}) \quad \text{①}$$

$$\lambda_{jt} = e_j \times RR_{jt} \quad \text{②}$$

$$\ln(\lambda_{jt}) = \ln(e_j) + \ln(RR_{jt}) \quad \text{③}$$

$$\ln(RR_{jt}) = v_j + u_j + g_t \quad \text{④}$$

$$v_j \sim N(0, \sigma_v^2) \quad \text{⑤}$$

$$u_j | u_{-j} \sim N\left(\frac{1}{\omega_{j+}} \times \sum_{k \neq j} \omega_{jk} \times u_k, \frac{\sigma_u^2}{\omega_{j+}}\right) \quad \text{⑥}$$

$$g_t \sim N(0, \sigma_g^2) \quad \text{⑦}$$

$$r_s = \frac{\text{VAR}[u]}{\text{VAR}[u] + \sigma_v^2 + \sigma_g^2} \text{ avec } \text{VAR}[u] = \frac{1}{M} \times \sum_{j=1}^M \left(\left(u_j - \frac{1}{M} \times \sum_{j=1}^M u_j \right)^2 \right) \quad \text{⑧}$$

$$r'_s = \frac{\text{VAR}[u]}{\text{VAR}[u] + \sigma_v^2} \quad \text{⑨}$$

$$r_{temp} = \frac{\sigma_g^2}{\text{VAR}[u] + \sigma_v^2 + \sigma_g^2} \quad \text{⑩}$$

$$\ln(e_j) = \ln\left(\left(\sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^{T_{obs}} a_{jt} \right) \times \frac{c_j}{T_{obs} \times \sum_{j=1}^M c_j} \right) + l_1 \times neige_{T_{10j}} + l_2 \times z_{moyj} \quad \text{⑪}$$

► 41 %, des $T_{obs} \times M = 12\,240$ valeurs totales, et à ne retenir ainsi que 21 682 avalanches, soit 72 % des événements observés, pour l'estimation du modèle. Cela peut sembler un « sacrifice » important, mais le nombre d'événements utilisés reste substantiel. De plus, il a été considéré qu'il valait mieux, d'un point de vue opérationnel, avoir des intervalles de confiance plus larges du fait d'un échantillon moins important que sous-estimer les fréquences avalancheuses moyennes.

Covariables et nombres attendus

Les nombres e_j d'avalanches attendus par couloir et par an ont été évalués par régression à l'aide de deux covariables* : une covariable nivo-météorologique, la précipitation décennale hivernale à l'échelle communale notée $neige_{T_{10j}}$, et une covariable topographique, l'altitude moyenne z_{moyj} de chaque commune. La précipitation décennale hivernale s'entend à une altitude de 2 500 m correspondant à la majorité des zones de départ d'avalanches. Les deux paramètres l_1 et l_2 quantifient la

force de la corrélation entre les covariables et l'activité avalancheuse. Un facteur de normalisation permet de tenir compte du fait que le nombre de sites EPA c_j varie d'une commune à l'autre (équation ⑪).

Fréquence avalancheuse moyenne à l'échelle communale

Les fréquences avalancheuses moyennes obtenues par couloir et par an à l'échelle communale constituent le résultat opérationnel de cette étude. Elles peuvent être utilisées pour une expertise, soit sur un site EPA, soit sur un autre site de la commune pour lequel très peu d'information est disponible. En effet, le principal intérêt de la démarche est de fournir une valeur spatialisée définie quel que soit le site, que celui-ci soit inscrit à l'EPA ou non. À l'échelle régionale, la valeur moyenne de 0,368 événements par site et par an est obtenue, soit en moyenne un peu plus d'une avalanche tous les trois ans sur chaque site. Les variations intersites sont toutefois très fortes, puisque la fréquence moyenne annuelle par

site est quasi nulle pour quelques communes EPA tandis qu'elle atteint près de 2,5 événements dans la commune la plus active. Les fortes fréquences avalancheuses sont observées essentiellement dans les massifs du Chablais-Faucigny, des Bauges, de la Vanoise et des Aiguilles d'Arves (figure 6).

Les communes sont représentées par classes, avec en légende le nombre de communes appartenant à chaque classe.

Structure spatiale des occurrences avalancheuses et bruit local dans les Alpes du Nord

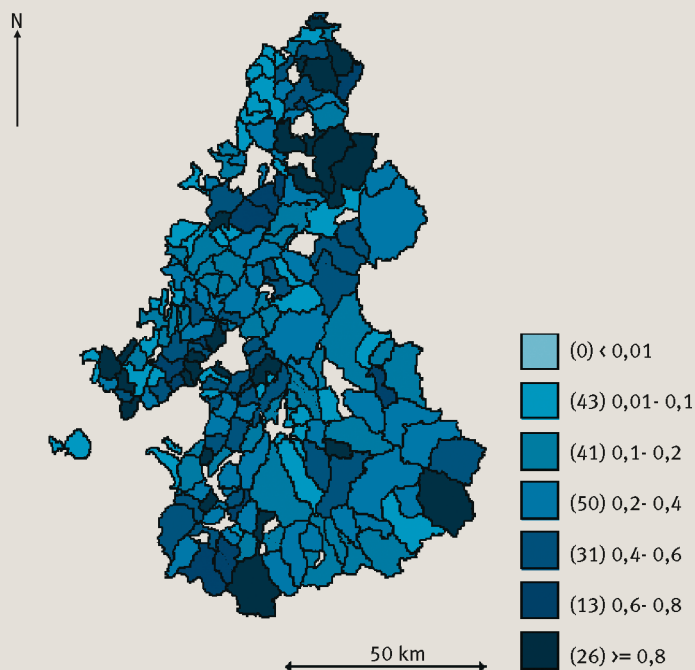
La carte des u_j donne la vision la plus claire de la structure spatiale de l'activité avalancheuse puisque celle-ci a alors été séparée du bruit. Seuls deux groupes de communes des Bauges et du Chablais ressortent vraiment (figure 7, à droite). L'excès de risque relatif dans ces communes est lié à leur altitude relativement modeste, l'activité forte qui y est observée n'étant pas prévue par le calcul des nombres attendus. Au contraire, pour les massifs d'altitude élevée, la composante spatiale est relativement homogène et faible. Presque toute la structure spatiale y a donc été capturée dans les nombres attendus. Relativement faible en moyenne, le bruit local est fort dans quelques communes, ce qui indique une variabilité locale non négligeable (figure 7, à gauche). Toutefois, les rapports r'_i et r'_s s'établissent à 0,66 et 0,54 respectivement, ce qui indique que la variabilité spatiale domine nettement les autres sources de variabilité. Ces informations confirment que la structure en massifs (altitude, géologie et forçage climatique associé) explique la majeure partie des variations de l'activité avalancheuse.

Structure temporelle des occurrences avalancheuses dans les Alpes du Nord

Les variations de g_t permettent de faire ressortir ce qui change d'un hiver à l'autre mais pas d'une commune à l'autre, c'est-à-dire l'effet annuel global qu'il est tentant de relier aux fluctuations climatiques à large échelle. Le rapport r_{temp} s'établit à 0,19. Les fluctuations interannuelles du climat expliquent ainsi environ 20 % de la variabilité des observations sur la région étudiée, valeur assez faible mais non négligeable.

La figure 8 présente les valeurs successives prise par g_t au cours des soixante hivers étudiés sous la forme de box-plots*. L'incertitude associée à chaque g_t est relativement faible. En conséquence, de nombreuses valeurs de g_t sont significativement différentes les unes des autres, ce qui prouve que les occurrences avalancheuses sont bien un phénomène non stationnaire. Ainsi 1963, qui se distingue par une valeur très négative, correspond à un hiver exceptionnel caractérisé par un déficit d'enneigement très important. Seulement cinq avalanches ont alors été observées à l'échelle régionale dans l'EPA, contre trois cent soixante en moyenne sur soixante ans. De même, l'hiver qui présente le maximum d'avalanches observées, 1994, correspond à la valeur la plus élevée de g_t , et les hivers catastrophiques 1950 et 1998 ressortent nettement. Enfin, les hivers où g_t est proche de la valeur 0 représentent les hivers d'activité avalancheuse

6 Fréquence avalancheuse moyenne à l'échelle communale pour les Alpes du Nord



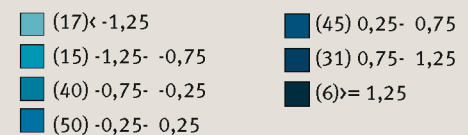
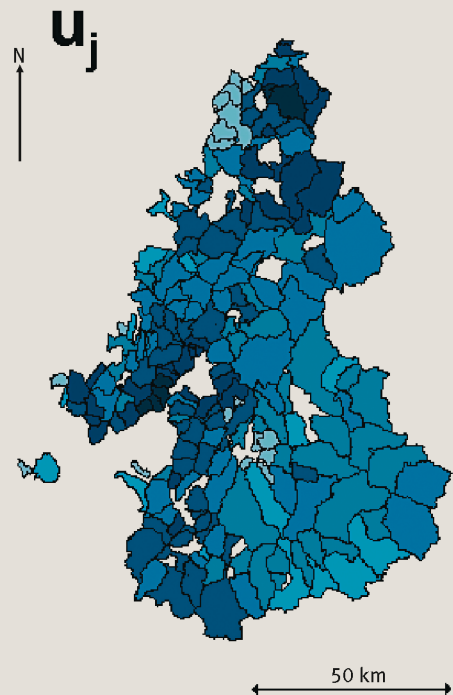
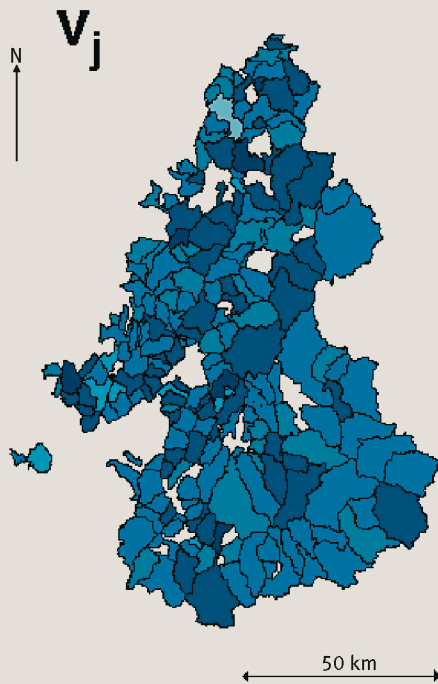
Les communes sont représentées par classes, avec en légende le nombre de communes appartenant à chaque classe.

moyenne. C'est le cas, par exemple, des hivers 1954, 1984 ou 2003.

Graphiquement, il n'existe ni dérive ni rupture en moyenne, ni même en variance, au cours des soixante hivers. Des tests de stationnarité simples, effectués sur les estimateurs moyens, confirment cette impression visuelle. En revanche, à plusieurs reprises, les valeurs prises par g_t sont proches pour des hivers successifs, comme par exemple entre 1949 à 1954. Quatre cycles de type pseudopériodique, d'une durée de dix à quinze ans, peuvent ainsi être grossièrement visualisés. En outre, ces cycles sont fortement bruités par des fluctuations très brusques, des valeurs faibles succédant parfois à des valeurs fortes, comme par exemple entre 1987 et 1988. Plutôt que par un changement brutal qui traduirait une modification forte du climat hivernal, l'activité avalancheuse dans les Alpes du Nord semble donc se caractériser par une structure temporelle complexe ayant peu varié au cours des soixante dernières années.

Conclusion

L'EPA est une source d'information extrêmement précieuse sur les avalanches en France. Grâce à sa rénovation, elle est désormais facilement utilisable, aussi bien pour la recherche que pour les applications opérationnelles.

7 Composante locale v_j et composante spatiale u_j dans les Alpes du Nord

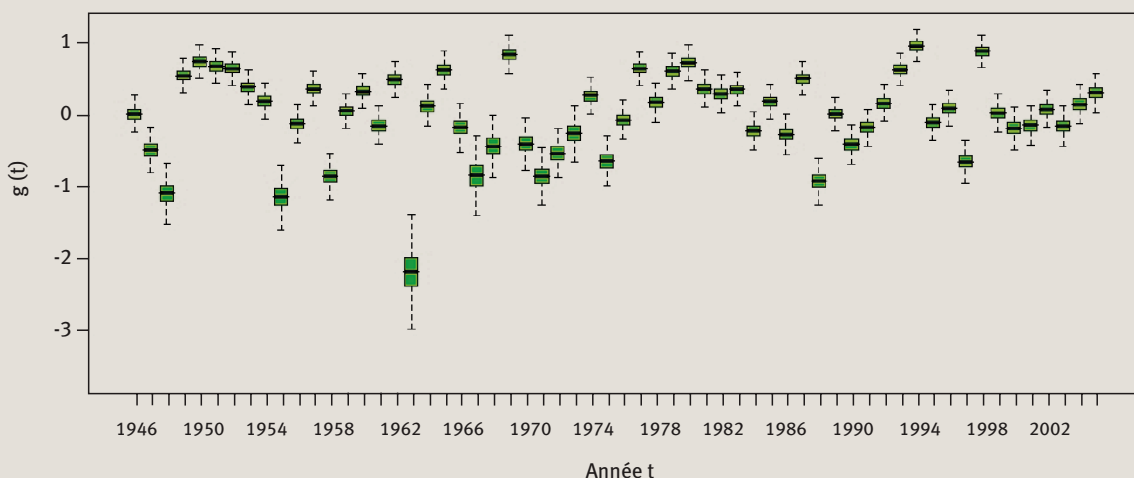
► Ainsi, cet article a montré comment elle pouvait être utilisée pour quantifier les fluctuations de l'activité avalancheuse dans l'espace et dans le temps. L'étude des variations spatio-temporelles de l'activité permet de mieux comprendre la structure spatiale des avalanches et sa réponse aux variations interannuelles du climat. Au niveau opérationnel, les fréquences avalancheuses moyennes calculées peuvent être utilisées en ingénierie pour l'évaluation des périodes de retour utiles au zonage paravalanche sur des sites pas ou peu documentés.

Les résultats pour l'ensemble des Alpes françaises sont téléchargeables sur www.avalanches.fr grâce au support

du ministère chargé de l'environnement (DGPR*, direction générale de la prévention des risques).

Les perspectives de développements futurs restent nombreuses. Du point de vue de la collecte et de l'archivage de l'information, un fonctionnement stabilisé de la base EPA doit encore être atteint afin de garantir la qualité de l'information sur le long terme. Quant aux exploitations des données à l'échelle de la base entière, elles doivent être poursuivies et leurs résultats confrontés à d'autres données environnementales, notamment climatiques, afin de pouvoir mieux anticiper l'évolution future de l'activité avalancheuse. ■

8 Box plot du terme temporel g_t dans les Alpes du Nord



Pour chaque année, le box plot présente la valeur estimée ainsi que l'incertitude associée (intervalle interquartile en vert, et intervalle de confiance à 95 % en noir).

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- ▣ BÉLANGER, L., CASSAYRE, Y., 2004, *Projects for past avalanche observation and zoning in France, after 1999 catastrophic avalanches*, Proceedings of the International Snow Science Workshop, 19-24 September 2004, Jackson Hole, Wyoming, p. 416-422.
- ▣ COSSE, J.-M., VAUTERIN, P., BELANGER, L., GARCIA, S., 2005, Regards croisés sur l'épisode neigeux de janvier 2004 dans les Hautes Alpes, *Neige et Avalanches*, n° 109.
- ▣ ECKERT, N., PARENT, E., BELANGER, L., GARCIA, S., 2007, Hierarchical modelling for spatial analysis of the number of avalanche occurrences at the scale of the township, *Cold Regions Science and Technology*, n° 50, p. 97-112.
- ▣ ECKERT, N., PARENT, E., NAAIM, M., RICHARD, D., 2008, Bayesian stochastic modelling for avalanche predetermination: from a general system framework to return period computations, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, p. 185-206.
- ▣ ECKERT, N., PARENT, E., KIES, R., BAYA, H., 2010, A spatio temporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps, *Climatic Change*, in press, Doi : 10.1007/s10584-009-9718-8.

► Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr

Les auteurs

Nicolas Eckert

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR,
Érosion torrentielle, neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex
nicolas.eckert@cemagref.fr

Mickaël Deschatres

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR,
Érosion torrentielle, neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex
mickael.deschatres@cemagref.fr

Laurent Bélanger

DDA du Doubs,
6 rue du Roussillon,
BP 1169,
25003 Besançon
laurent.belanger@equipement-agriculture.gouv.fr