Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français

Évaluation des impacts et cartographie de la perte d'accessibilité
territoriale

**Frédéric Leone, Albert Colas, Yann Garcin, Nicolas Eckert, Vincent Jomelli
et Monique Gherardi**

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/2491>

DOI : 10.4000/rga.2491

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

The snow avalanches risk on Alpine roads network - URL : <https://journals.openedition.org/rga/2501>
[en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Frédéric Leone, Albert Colas, Yann Garcin, Nicolas Eckert, Vincent Jomelli et Monique Gherardi, « Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 102-4 | 2014, mis en ligne le 30 septembre 2014, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/2491> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2491>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.

Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français

Évaluation des impacts et cartographie de la perte d'accessibilité territoriale

Frédéric Leone, Albert Colas, Yann Garcin, Nicolas Eckert, Vincent Jomelli et Monique Gherardi

NOTE DE L'AUTEUR

Ce travail a été effectué dans le cadre du programme de recherche MOPERA (Modélisation Probabiliste pour l'Évaluation du Risque Avalanche) financé par l'ANR 2009, programme « Risques Naturels : Compréhension et Maîtrise ». Nous tenons à remercier le service SIG du Conseil Général des Hautes-Alpes pour la mise à disposition de sa base de données « évènements » ainsi que les relecteurs de cet article pour leurs suggestions.

- 1 L'accessibilité routière revêt un caractère particulièrement stratégique pour le maintien des activités économiques mais également pour les interventions de secours. Dans les Alpes françaises, cette accessibilité est réduite, en particulier en fond de vallée, et peut être davantage dégradée par l'occurrence de divers aléas naturels. À ce titre, les avalanches représentent une menace particulièrement forte car, outre les victimes et dommages directs qu'elles peuvent causer, elles entraînent très souvent des coupures de routes plus ou moins prolongées à une époque de l'année où les réseaux sont déjà fortement altérés par les fermetures saisonnières. Il en résulte parfois une véritable fracture territoriale qui affecte tout particulièrement les sociétés montagnardes et les enjeux liés à l'économie touristique.
- 2 Dans le domaine des avalanches comme pour d'autres aléas naturels, les méthodes traditionnelles de prise en compte du risque, très souvent aléa-centrées, évoluent progressivement vers des approches tenant compte de la présence d'enjeux de natures variées (humains, matériels, fonctionnels) associant différentes formes de

vulnérabilités (Eckert *et al.*, 2012, Leone *et al.*, 2010, Leone et Vinet, 2006). La vulnérabilité y est définie comme une propension au dommage ou au dysfonctionnement qui peut être mesurée par une intensité des dommages, exprimée en taux ou en probabilité de destruction/décès (D'Ercole, 1994 ; Leone *et al.*, 1996 ; Reghezza, 2006). Dans le domaine des avalanches, ces mesures sont encore très empiriques et prennent les formes de matrices ou de courbes d'endommagement qui donnent pour chaque type d'enjeu le niveau de dommage attendu en fonction de la magnitude du phénomène (pression exercée par l'avalanche en particulier) (Barbolini *et al.*, 2004). Les applications pratiques existantes concernent principalement le zonage du risque pour l'urbanisme (Keylock *et al.*, 1999) et l'évaluation du risque routier.

- 3 L'essentiel des travaux sur l'évaluation du risque routier dû aux avalanches est basé sur le travail de Wilhelm (1997) qui a proposé des formules pratiques d'estimation du taux de décès en fonction de l'intensité du trafic, du nombre moyen de passagers par véhicule, de la vitesse du transit et de la longueur de tronçon routier exposé. Le calcul peut s'effectuer pour un seul couloir, ou une section de route plus longue traversée par plusieurs couloirs, par simple addition. Les applications classiques de ce formalisme concernent la comparaison de différentes stratégies de traitement de la viabilité hivernale des grands cols alpins (fermeture permanente ou temporaire, construction de protections permanentes de type tunnels, etc.). De multiples raffinements ont été proposés, portant sur la façon de modéliser l'aléa (Wastl *et al.*, 2011 ; Zischg *et al.*, 2005b), l'éventuelle monétarisation des pertes (Rheinberger *et al.*, 2009), ou encore la prise en compte du risque additionnel pour les véhicules stoppés par les coupures de routes durant leur transit (Hendrikx et Owens, 2009). Dans tous les cas, l'acuité de l'évaluation du risque est fortement dépendante de la qualité de l'estimation de l'aléa avalancheux en termes de longueur du ou des tronçons exposés et de l'intensité des impacts potentiels. Néanmoins de nombreux pays s'y réfèrent : Suisse (Margreth *et al.*, 2003), Autriche (Zischg *et al.*, 2005a), Norvège (Kristensen *et al.*, 2003), etc., en tenant compte d'éventuelles spécificités locales (caractéristiques nationales du parc de véhicules par exemple).
- 4 Pour les Alpes françaises, en revanche, il semble que l'emploi de ce type d'approche reste très peu répandu, et ce alors que l'information historique concernant l'activité avalancheuse est particulièrement abondante, bien que morcelée (cf. notre 2^e partie). Ce peu d'intérêt peut s'expliquer par une limite forte de ces approches, à savoir qu'elles ne s'intéressent qu'aux conséquences directes des impacts d'avalanches, négligeant totalement les conséquences liées aux pertes d'accessibilité et qui sont pourtant souvent les plus fortes.
- 5 Cette problématique éminemment géographique de l'accessibilité territoriale en lien avec les risques naturels repose sur plusieurs notions, propres à la géographie des risques ou empruntées à la géographie des transports. Elle permet donc d'opérer un couplage entre différentes approches qui apparaît encore sous exploité dans une perspective d'aide à la gestion de crise. On peut néanmoins citer les travaux de géographes de l'IRD qui ont cherché à analyser l'accessibilité en tant que composante essentielle de la vulnérabilité territoriale face aux crises, mais sans pour autant développer des méthodes d'évaluation quantitatives basées par exemple sur la théorie des graphes (D'Ercole et Metzger, 2009 ; Demoraes et D'Ercole, 2009 ; Metzger *et al.*, 2011). *A contrario*, d'autres chercheurs ont appliqué tout aussi récemment ces théories aux risques naturels (Chang, 2003 ; Gleyze, 2005 ; Nabaa, 2011), mais sans formaliser une

conception territoriale du risque confrontant par le biais de l'accessibilité, la notion d'espace du risque direct à celle d'espace du risque indirect. Des travaux récents menés à Mayotte pour le risque tsunami (Leone *et al.*, 2013) ou dans les Alpes pour les coulées de débris (Leone *et al.*, 2011), tendent cependant à formaliser cette approche territoriale du risque en se basant sur des modèles déterministes (pour un scénario de coupure de routes donné) et non pas sur une analyse de risque de coupure telle que proposée ici pour les avalanches.

- 6 Afin de remédier partiellement à ces lacunes, et d'évaluer rétrospectivement la vulnérabilité physique, fonctionnelle et humaine des réseaux routiers au risque d'avalanche dans les Alpes françaises, la première étape de notre étude a consisté à géo-référencer et harmoniser au sein d'un SIG, les informations provenant des principales bases de données disponibles sur les conséquences des avalanches pour trois départements alpins français (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes-Maritimes). Cela a permis d'identifier les impacts avalancheux sur les routes depuis 1937, de mesurer leur fréquence, leur distribution géographique, leur gravité et la nature des dommages directs et indirects. Une seconde étape de la recherche s'inscrit dans une approche d'évaluation du risque de perturbation fonctionnelle du réseau routier. Elle se traduit par la construction d'indices établis à l'échelle des tronçons en combinant des indicateurs de coupure et des valeurs fonctionnelles permettant d'apprécier l'importance de chaque tronçon dans le fonctionnement global du réseau. Ainsi, dans un troisième temps, l'identification de ces tronçons vulnérables et /ou exposés a permis de cartographier à l'échelle régionale le risque d'isolement de certaines parties du territoire et des populations associées. Cette dernière étape de la recherche a fait appel à une modélisation sur graphe et à des algorithmes de recherche des plus courts chemins au départ de trois grandes villes desservant ces trois départements alpins : Grenoble, Marseille et Nice.

Types d'avalanches et processus d'endommagement

- 7 Le phénomène avalancheux est généralement défini comme un déplacement rapide d'une masse de neige sur un versant. Cette définition très générale regroupe des phénomènes très variés en fonction du type de déclenchement ou de la dynamique de l'écoulement, eux-mêmes étroitement liés à l'état de la neige (Ancey *et al.*, 2006). Du point de vue de la dynamique, on distingue les avalanches s'écoulant en partie sous forme d'aérosol (mélange de neige et d'air de très faible densité), des avalanches denses. Parmi ces dernières, une distinction supplémentaire entre neige sèche et humide (présence d'eau liquide) peut être utile.
- 8 Malgré une localisation assez précise des sites avalancheux les plus dangereux et l'installation de dispositifs de protection, les cas d'extensions en dehors des enveloppes historiques de la CLPA (Carte de localisation des Phénomènes Avalancheux) sont relativement fréquents. Les dépôts (phase dense) issus de telles grandes avalanches peuvent obstruer de grandes longueurs de réseau et poser d'importantes difficultés de déblaiement sur des tronçons encore menacés. Les avalanches de neige humide sont en particulier responsables de la majorité des coupures de routes. Même lorsqu'elles n'entraînent que des obstructions localisées du fait de la chenalisation souvent importante de leur écoulement, leur déblaiement est souvent long à cause de la forte densité de la neige. C'est la phase dense de neige et les débris rocheux et végétaux

transportés qui causent l'essentiel des dommages sur les routes. Pour les avalanches de type aérosol, l'effet de souffle affecte peu la chaussée mais endommage souvent les équipements latéraux. Signalons également les dégâts indirects provoqués lors du dégagement de la masse neigeuse par des engins qui doivent travailler dans l'urgence avec une visibilité très faible.

Méthodologie

Construction des bases de données SIG

- 9 Cette recherche repose sur la constitution d'un Système d'Information Géographique (SIG) couvrant la totalité des trois départements étudiés. Certaines données sont issues d'organismes publics (INSEE, IGN, RTM/ONF), d'autres proviennent des collectivités territoriales. Elles couvrent plusieurs champs thématiques et ont fait l'objet d'un fastidieux travail de compilation, d'intégration, d'harmonisation et de validation, en particulier sur le terrain. Deux référentiels topographique et démographique, d'échelle régionale, ont été exploités :
 - La base vectorielle Route500 de l'IGN (2010) qui représente la voirie principale avec une précision de 100 m. Elle permet de différencier 5 classes de vocation de routes pour les calculs de vitesses (type autoroutier, liaison principale, liaison régionale, liaison locale, bretelle). Elle nous renseigne également sur l'état de fermeture hivernale des routes principales.
 - La base de données carroyée de la population établie par l'INSEE (2012) fournit le nombre de résidents permanents au km² et a été établie à partir d'une exploitation spécifique des fichiers fiscaux. Par ailleurs, des données complémentaires sur les périodes de fermeture habituelle des cols ou de certaines routes secondaires ont été produites à partir de sources diverses (Internet, Conseil régionaux, BD Topo IGN, témoignages).
- 10 Le gros du travail a consisté à établir une nouvelle base de données sur les impacts des avalanches sur le réseau routier des trois départements entre 1937 et 2011. Cette base fusionne des informations provenant de trois sources principales qu'il a fallu géoréférencer manuellement, au cas par cas, après vérification et suppression des doublons. Au total 1042 impacts exploitables ont été recensés et localisés. 60% des données sont issus de la base EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches) gérée par l'Irstea. L'EPA est une chronique d'événements sur près de 4000 couloirs, parfois depuis le début du XX^e siècle, décrivant notamment les caractéristiques physiques des avalanches et les dégâts ou perturbations occasionnés. La longueur et la qualité des séries a déjà été largement mise à profit pour d'autres études, notamment des analyses de risque pour l'urbanisme incluant le dimensionnement de paravalanches (Eckert *et al.*, 2007 ; Naaïm *et al.*, 2010) ou pour établir le lien entre activité avalancheuse et climat (Jomelli *et al.*, 2007 ; Castebrunet *et al.*, 2012), mais jamais pour la quantification du risque routier. Le reste des données provient du service RTM (Restauration des terrains de Montagne) de l'ONF (34%) et du service SIG du Conseil Général des Hautes-Alpes (6%). La base « impacts » ainsi produite a été codée de manière à pouvoir différencier l'intensité des dommages physiques et fonctionnels sur le réseau routier selon une typologie inédite, tout en préservant un champ descriptif sur la nature de ces impacts.
- 11 Par ailleurs, les zones exposées aux avalanches, également exploitées dans la partie suivante de cette recherche (cf. 4^e partie) ont été extraites de la Carte de Localisation

des Phénomènes d'Avalanche (CLPA) également gérée par l'Irstea. Cette cartographie, régulièrement mise à jour, recense les emprises maximales observées (témoignages et archives) ou supposées (photo-interprétation) sur la quasi-totalité des Alpes (Bonnetoy *et al.* 2010 ; Robinet et Bonnetoy, 2013). Bien qu'extrêmement utilisée localement pour l'établissement des Plans de Prévention des Risques (PPR) des communes de montagne, son potentiel pour la quantification du risque routier à l'échelle régionale commence seulement à être exploité (Tacnet *et al.*, 2013).

Modélisation de l'accessibilité routière au moyen de graphes

- 12 Selon Bavoux *et al.* (2005), l'accessibilité d'un lieu est la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants. Utilisée aujourd'hui en informatique ou en économie, la théorie des graphes trouve tout particulièrement son intérêt dans le domaine des transports. En effet, la transformation d'un réseau routier « réel » en graphe offre la possibilité de multiples applications. Si la théorie de graphes permet de simplifier le réseau visuellement, c'est avant tout dans les calculs et les représentations graphiques de l'accessibilité qu'elle devient la plus utile. Tout d'abord il faut transformer le réseau en graphe, c'est-à-dire en un objet mathématique composé de sommets et d'arcs. Les sommets (les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (les liaisons) sont associés aux tronçons routiers. Le graphe doit rendre compte fidèlement de la hiérarchie routière urbaine et donc distinguer les différents types de voies qui composent le réseau (Appert & Chapelon, 2008). Dans le cadre des réseaux routiers, il est important d'attribuer des valeurs aux graphes. En effet, les lieux de départs et d'arrivées sont situés dans l'espace et n'ont pas forcément le même poids : les routes ont des vitesses et des capacités différentes. Chaque arc est caractérisé par sa longueur en kilomètres et par la vitesse de circulation automobile permise sur l'infrastructure qu'il représente dans le respect du code de la route.
- 13 Le graphe routier utilisé pour les applications qui suivent a été construit à partir de la BD Route500 de l'IGN. Par conséquent il ne dessert que les agglomérations principales, quelques villages mais la totalité des stations touristiques. Les calculs d'accessibilité ont été réalisés avec l'utilitaire RouteFinder® conçu pour la création et l'exploitation de cartes d'accessibilité dans un environnement SIG MapInfo®. Les itinéraires ont été définis respectivement au départ de Grenoble, Marseille et Nice, vers chaque maille du territoire habitée et susceptible d'être isolée par une ou plusieurs avalanches. Ce choix se justifie au regard du volume d'enjeux touristiques drainés par ces agglomérations, de départ ou de transit, sur des périodes hivernales à forte fréquentation et présentant donc un risque d'isolement de populations maximal. Ils ont été calculés selon les chemins les plus rapides donnés par l'algorithme de Dijkstra (1959) proposé par l'application RouteFinder®. Ces trois scénarios d'accessibilité reposent sur un graphe routier dégradé, c'est-à-dire en condition de viabilité hivernale, sur voies principales seulement, avec 14 cols sur 24 fermés à la circulation, et sans passer par l'Italie. On peut de toute manière considérer que les petites voies secondaires de montagne, en particulier communales et forestières, sont inutilisables en hiver, et de surcroît inadaptées aux flux routiers en provenance des grandes villes voisines. Les vitesses de circulation appliquées ont été adaptées de Chapelon (1996) à partir des travaux effectués par le CETE de l'Est pour l'outil d'analyse des itinéraires alternatifs (ANITA).

Au final, nous avons retenu 5 classes de vitesses qui s'étendent de 40 à 110 km/h en fonction des types routiers proposés par la base Route500.

Impacts directs et indirects des avalanches (1937-2011)

Distribution temporelle et géographique

- 14 La distribution annuelle des impacts montre une nette hausse au cours de la période d'étude. Celle-ci est vraisemblablement davantage révélatrice de l'amélioration de la collecte des données que d'une augmentation des avalanches. On note en particulier le seuil des années 70 durant lesquelles le recueil des informations s'est progressivement systématisé (figure 1B). La distribution permet aussi de distinguer des saisons où le nombre des impacts a été bien supérieur à sa moyenne, souvent à cause d'abondantes chutes de neige. Les plus remarquables sont 1950/1951, 1977/1978 et 2008/2009. Par opposition, certaines saisons ont été très pauvres en impacts (1988/1989, 2004/2005) ou même épargnées comme en 2000/2001. Par ailleurs, cette distribution masque en réalité des périodes de crise très courtes durant lesquelles de très nombreux impacts se sont produits. Ainsi, la répartition temporelle des impacts sur 73 ans montre que les mois de janvier, février puis décembre sont de très loin les plus concernés (figure 1C). D'après nos données, c'est d'ailleurs le mois de décembre 2008 qui a connu le plus d'impacts sur le réseau routier des trois départements étudiés.

Figure 1. Distribution spatio-temporelle des témoignages d'impacts physiques d'avalanches sur le réseau routier principal (1937-2011)

A : par tronçon routier, B : par saison hivernale, C : mensuelle

- 15 La distribution des impacts par massif montre des différences spatiales importantes et une forte représentation du Champsaur et du Mercantour, en particulier sur le réseau ouvert en hiver pour ce dernier (figure 1A). À une autre échelle, les communes les plus concernées en valeur relative sont Isola (06), Abriès (05), La-Chapelle-en-Valgaudemar (05) et Villar-Loubière (05) avec un record pour cette dernière établi à 82 impacts pour 10 km de voirie ouverte en hiver. Les tronçons routiers les plus affectés par les phénomènes avalancheux peuvent appartenir à de grands axes routiers tels que la route du Lautaret (N91) ou de Barcelonnette (D900), à des routes sans issues (vallées du Valgaudemar, de la Vallouise ou du Haut-Queyras), ou passer par des cols (Vars) et mener à des stations de loisirs (Isola 2000). Le tronçon ouvert en hiver le plus touché depuis 73 ans (44 impacts) se situe entre Saint-Maurice-en-Valgaudemar et Villar-Loubière dans les Hautes-Alpes. Le croisement des BD impacts avec la BD TOPO routière de l'IGN permet de déterminer le type de voirie compris dans les enveloppes des avalanches. Il apparaît que les événements recensés se répartissent équitablement entre les réseaux locaux et infra-communaux (51%) et les réseaux régionaux et principaux (49%). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les voies principales, bien que moins nombreuses, restent plus souvent ouvertes en hiver et que les événements y sont mieux répertoriés.

Typologie des dommages directs et indirects

- 16 Les dégâts dus à un impact d'avalanche sur le réseau routier sont généralement mineurs. En revanche, les dégâts sur les équipements annexes et les ouvrages d'art peuvent être bien plus graves. Dans le cas des avalanches, le type de dommage dominant correspond à l'obstruction de chaussée. Ce type représente au moins 69,5% des événements dommageables recensés. Les dommages matériels affectent surtout les réseaux latéraux (5%), les équipements annexes (1,7%) et les véhicules (1,5%). On notera la très faible part des dommages à la chaussée proprement dite (0,7%), inférieure aux dommages sur les ouvrages d'art (1%). Ceci est lié au fait que les affouillements liés aux avalanches sont très rares.
- 17 Les différents gestionnaires du réseau routier ont mis en place des systèmes d'alerte, de déclenchement préventif d'avalanche et de fermeture du réseau afin de protéger les usagers. Ainsi, les décès liés aux avalanches sur les réseaux routiers sont rarissimes et seulement 11 décès ont été recensés depuis 1937 sur les trois départements étudiés.
- 18 D'après notre analyse, 79% des événements ont entraîné des perturbations fonctionnelles du type interruption de la circulation, mais on observe une grande incertitude sur la durée de ces coupures : 54% des cas correspondent à des coupures sans indication de durée, au moins 5% à une interruption du trafic routier supérieure à quelques heures, et 5% à plusieurs jours. Cette forte perturbation s'explique par le type de dommage physique dominant (obstruction), par la simultanéité des événements lors de périodes avalancheuses et par certaines difficultés d'acheminement des engins de déblaiement dans des zones le plus souvent peu équipées.

La crue avalancheuse de décembre 2008

- 19 Du 14 au 20 décembre 2008, suite à un phénomène météorologique de « retour d'est », les chutes de neige ont été très abondantes sur les massifs longeant la frontière

italienne et tout particulièrement sur le Queyras où les cumuls sur deux jours ont atteint jusqu'à 300 cm à Ristolas, 150 cm à St-Véran et Montgenèvre, et 100 cm à Névache. Ces chutes, accumulées sur un manteau déjà épais suite aux intempéries des 10 et 11 décembre, ont été accompagnées de vents violents donnant ainsi des valeurs records avec par exemple 2,30 m de neige à Saint-Véran. Cet événement météorologique a provoqué dans les vallées de La Tinée, de Névache et surtout du Queyras, une forte concentration d'avalanches de grande ampleur et qui ont largement débordé l'enveloppe spatiale de la CLPA (Eckert *et al.*, 2010). Ainsi, 34 événements ont justifié une modification de la CLPA sur sept communes du Queyras (Gaucher *et al.*, 2009).

Figure 2. Nombre d'impacts avalancheux sur le réseau routier durant la crue avalancheuse de décembre 2008

- 20 Ce sont les grandes avalanches des 15 et 16 décembre qui ont été responsables des principales coupures de routes, en particulier dans les Hautes-Alpes (Queyras) et les Alpes-Maritimes (figure 2) (Ocana & Escande, 2009). De très nombreuses avalanches se sont ainsi étendues jusqu'aux routes, les coupant sur une longueur pouvant atteindre 400 m (avalanche de « la Fourche » à Abriès). Durant cette crise, ce sont plus de trois mille personnes, résidents ou touristes, qui ont été soumises à l'isolement durant plusieurs jours. La situation a été particulièrement critique dans le Queyras où la dispersion de la population a nécessité des évacuations d'urgence, et dans la vallée de la Tinée où les coupures de route ont isolé plus de 1500 personnes, principalement des touristes, durant six jours. Ce n'est que le 19 décembre dans le Queyras et le 20 décembre à Isola 2000 que les liaisons routières ont été rétablies, mettant fin à la situation de crise.

La perte d'accessibilité comme mesure de la vulnérabilité territoriale

Indice de risque de dysfonctionnement

- 21 Dans une démarche d'aide à la décision et d'anticipation, le risque de perturbation fonctionnelle d'un tronçon routier peut se définir par une probabilité de coupure combinée à une valeur fonctionnelle qui permet d'apprécier l'importance stratégique ou fonctionnelle de ce tronçon vis-à-vis du reste du réseau routier (Leone *et al.*, 2011). Dans le cadre de cette étude, nous proposons un indice expérimental de dysfonctionnement (IRd) qui est le produit d'un indice de coupure (Ic) et d'une valeur fonctionnelle correspondant ici à la longueur minimale de déviation du tronçon exposé en évitant un col fermé en hiver (Ld en km). Cette longueur a été calculée au moyen du graphe routier construit sur notre zone d'étude. Chaque variable de l'indice de risque a été ramenée entre 0 et 1 par division avec sa valeur maximale, soit pour chaque tronçon :

$$\text{IRd (0-1)} = \text{Ic} * (\text{Ld} / \text{Ld_max})$$

- 22 Les indices de coupure (Ic) des 203 tronçons exposés ont été déterminés empiriquement en additionnant le nombre d'impacts connus depuis 1937 (Nimpacts) avec le pourcentage de longueur du tronçon exposé, c'est-à-dire traversant une enveloppe CLPA délimitée par photo-interprétation et analyse de terrain (%CLPA). Un coefficient de pondération de 2 a été affecté à la première variable pour renforcer le poids de la vulnérabilité constatée (le dommage) par rapport à l'exposition, soit pour chaque tronçon :

$$\text{Ic (0-1)} = ((\text{Nimpacts} / \text{Nimpacts_max}) * 2 + (\% \text{CLPA} / \% \text{CLPA_max})) / 3$$

- 23 La figure 3A illustre le principe du calcul en prenant pour exemple le tronçon le plus impacté qui se situe entre Saint-Maurice-en-Valgaudemar et Villar-Loubière dans les Hautes-Alpes. Cette mesure de l'exposition aux avalanches reprend le principe des méthodes empiriques reconnues en matière de cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain, méthodes qui combinent et pondèrent une part de données factuelles sur les dommages (ou les événements) historiques et une part de facteurs de prédispositions donnant l'enveloppe de l'aléa (Chassagneux *et al.*, 1998 ; Sri Hadmoko D., 2009).

Figure 3. Principes de calcul des indices: (A) de coupure (Ic) sur le tronçon routier le plus impacté (entre Saint-Maurice-en-Valgaudemar et Villar-Loubière dans les Hautes-Alpes), (B) d'isolement (Ii) d'une maille peuplée de la vallée du Queyras (Ristolas) au départ de Marseille selon le trajet le plus rapide

- 24 Le nombre maximal d'impacts est de 44 et le pourcentage maximal de longueur du tronçon exposé à une CLPA est de 100. La longueur maximale de déviation connue est de 143 km (Ld_max). Une valeur arbitraire de 286 km (double de la valeur maximale) a été attribuée aux tronçons ne disposant d'aucune possibilité de déviation (143 tronçons) pour bien faire ressortir leur grande valeur fonctionnelle et stratégique, puisque incontournables.
- 25 Les indices de coupure obtenus sont compris entre 0 et 0,7 (figure 4A). Les valeurs les plus élevées ($\geq 0,4$) concernent une dizaine de tronçons situés principalement dans les vallées du Valgaudemar et de la Haute-Romanche (05), du Bachelard (04), de la Haute Tinée et sur la route du col de la Bonette et d'Isola 2000 en direction du col de la Lombarde (06). L'indice IRd résultant permet de différencier les tronçons les plus à risque qui sont donc en théorie ceux qui présentent la plus forte probabilité d'entraîner le plus fort préjudice fonctionnel, exprimé en distance d'allongement de parcours (figure 4C). On retrouve pour l'IRD le même classement que pour l'Ic du fait de l'impossibilité de déviation des routes situées en fond de vallée, hormis pour la vallée de la Haute-Romanche qui offre un itinéraire de contournement de 137 km (figure 4B). Les indices IRd n'intègrent cependant pas la valeur d'usage du tronçon routier, élément permettant de relativiser l'impact fonctionnel d'une coupure pour la collectivité. Néanmoins, l'affichage de la hiérarchie routière permet de rendre compte de ce double impact, à la fois fonctionnel et utilitaire.

Figure 4. Indice de risque de dysfonctionnement par tronçon routier (IRd) (C) combinant l'indice de coupure (Ic) (A) et la longueur de déviation (Ld) (B)

Indice de risque d'isolement territorial

- 26 La dégradation de l'accessibilité du territoire est une conséquence préjudiciable des coupures de réseaux qui peut être modélisée au moyen de graphes. L'accessibilité se définissant pour des lieux de départ et d'arrivée bien définis, nous avons dans un premier temps sélectionné toutes les mailles du territoire susceptibles d'être isolées, c'est-à-dire totalement privées d'accès routier en cas d'avalanche au départ des grandes villes régionales, en situation de viabilité hivernale normale, c'est-à-dire avec 14 cols fermés (figure 5A). Pour ce faire nous avons supprimé dans le graphe tous les tronçons routiers ayant connu au moins un impact depuis 1937 et/ou traversant au moins une enveloppe CLPA. Ce scénario déterministe extrême isole 0,83 % de la population résidente des trois départements confondus (11 215 habitants, figures 5B et 5C). Il donne des résultats qui se rapprochent de la situation vécue en décembre 2008, qui une fois modélisée donne un équivalent de 4502 habitants. Les 6 communes les plus impactées, en nombre de mailles isolées, sont respectivement par ordre croissant : Isola (06), Arvieux (05), Allos (04), Saint-Paul (04), Tende (06), Saint-Etienne-de-Tinée (06). En population associée, le classement équivalent donne : Pelvoux (05), Isola (06), Vallouise (05), Allos (04), Tende (06), Saint-Etienne-de-Tinée (06). Notons que ces résultats n'intègrent pas la fréquentation touristique hivernale qui est très importante dans les secteurs pouvant être isolés ; secteurs qui comprennent près de 20 % des sites de sport d'hiver des trois départements (19 sur 103).

Figure 5. Population résidente permanente susceptible d'être isolée en cas d'avalanche (C), avec mailles du territoire susceptibles d'être isolées (A), et population recensée par l'INSEE (B)

- 27 De manière à hiérarchiser le risque d'isolement de ces portions du territoire, nous avons procédé au calcul d'un indice de risque d'isolement (IRi) qui résulte du produit d'un indice d'isolement (Ii) de chaque maille et de sa population résidente associée (Pop). Cet indice a également été ramené entre 0 et 1 par division de chaque variable par sa valeur maximale, soit pour chaque maille ou itinéraire associé :

$$IRi (0-1) = Ii * (Pop / Pop_max)$$

- 28 Les indices d'isolement (Ii) des 311 mailles « isolables » ont été déterminés empiriquement en additionnant le nombre d'impacts connus depuis 1937 avec la longueur totale de route traversant une enveloppe CLPA (LCLPA en km) (cf. figure 3B pour la méthode). Ces valeurs ont été calculées de manière itérative au moyen du graphe routier pour chaque itinéraire reliant les mailles et les trois villes principales que sont Grenoble, Marseille et Nice, en situation de viabilité hivernale normale avec 14 cols fermés, et selon les trajets les plus rapides (soit 933 itinéraires, figures 6A, B,C). Ici aussi, un coefficient de pondération de 2 a été affecté à la première variable pour renforcer le poids de la vulnérabilité constatée (le dommage) par rapport à l'exposition, soit pour chaque maille ou itinéraire associé :

$$Ii (0-1) = ((Nimpacts / Nimpacts_max) * 2 + (LCLPA / LCLPA_max)) / 3$$

- 29 Le nombre maximal d'impacts sur un itinéraire est de 109 et la longueur maximale de CLPA traversée de 13,77 km. La maille la plus peuplée comporte 634 habitants (Pop_max). Chaque maille s'est ensuite vue attribuée la moyenne des Ii et des IRi (respectivement figures 6D et 7).

Figure 6. Indices d'isolement des mailles territoriales (Ii) au départ de trois grandes villes (A : Grenoble, B : Nice, C : Marseille, D : Indice moyen)

- 30 Les communes présentant le plus de mailles à forte probabilité moyenne d'isolement ($I_i \geq 0.4$) sont par ordre croissant La-Chapelle-en-Valgaudemar (05), Névache (05), Ristolas (05), Abriès (05), Isola (06) et Saint-Paul (04). La population correspondante à ces mailles est de 426 habitants et les valeurs d'indice de risque moyen d'isolement les plus élevées ($I_{ri} \geq 0.1$) sont obtenues, par ordre croissant, sur les communes de la Grave (05), d'Abriès (05) et d'Isola (06). Il s'agit donc de portions du territoire qui présentent la plus forte probabilité d'isolement du plus grand nombre de personnes résidentes (figure 7). Notons que ce risque d'isolement s'aggrave en hiver, puisque les trois mailles concernées correspondent à trois stations touristiques qui proposent au total 9300 lits.

Figure 7. Indice moyen de risque d'isolement des mailles territoriales (IRi) au départ de Grenoble, Nice et Marseille, combinant l'indice d'isolement (Ii) et la population permanente

Conclusion et perspectives

- 31 Cette recherche, basée sur l'analyse spatiale et quantitative du risque avalancheux, renseigne la vulnérabilité d'un territoire à l'échelle régionale sur la base de l'exposition de son réseau routier. Le risque direct a été étudié rétrospectivement à travers l'analyse des impacts routiers sur plus de soixante-dix années. Le risque indirect a été évalué prospectivement au moyen d'indices de coupure du réseau et d'isolement de population. Cela a permis de valoriser des données historiques exceptionnelles encore sous exploitées en géographie des risques et d'utiliser les potentialités des graphes routiers fournis par l'IGN pour les calculs d'accessibilité. Il s'agit d'une approche assez novatrice dans le domaine des avalanches où la quasi-totalité des travaux d'évaluation de la vulnérabilité routière restent pour l'instant limités aux conséquences directes des impacts sur le réseau.
- 32 Les nouvelles bases de données produites sont géoréférencées et adaptées à une lecture géographique des dommages sur les routes. Nous encourageons ainsi la poursuite de leur développement et leur enrichissement, notamment par l'intégration de données socio-économiques plus nombreuses et élaborées qui permettront d'affiner progressivement les indicateurs obtenus. Par exemple, les typologies de dommages proposées devraient à l'avenir permettre d'estimer plus finement les coûts directs et indirects dont le recensement exhaustif à l'échelle régionale constitue toujours un véritable défi. Partant de ces bases de données, une approche statistique possible pour évaluer les coûts directs cumulés annuels imputables aux avalanches sur le réseau routier serait de multiplier les coûts moyens de chaque intensité de dommage par leur

fréquence annuelle. Cela implique au préalable de mieux recenser ces coûts moyens, point faible de notre étude. Par ailleurs, l'analyse macroéconomique des coûts indirects imputables à l'isolement territorial pourrait se faire sur la base de scénarios à l'échelle locale (vallée) ou régionale (massifs), en cumulant les pertes d'activités, les surcoûts liés à d'éventuels rallongements de trajets, les coûts des secours et de prise en charge des personnes isolées (ravitaillement, soins), etc. Le cumul de l'ensemble de ces coûts, par site étudié, pourrait alimenter une analyse coût/bénéfice permettant d'apprécier l'opportunité économique de certaines mesures de prévention des avalanches en estimant le montant des dommages évités.

- 33 Néanmoins, la partie exploratoire sur les indices de risque constitue déjà un pas en avant important. Elle permet de sortir d'une approche aléa-centrée du risque avalancheux pour s'intéresser aux enjeux humains et territoriaux de ce risque, en incluant pour la première fois les conséquences indirectes à l'échelle d'une partie importante des Alpes Françaises. Les bilans et cartes obtenus, bien que largement perfectibles, peuvent présenter un certain intérêt pour les gestionnaires du risque. En effet, contrairement à d'autres études traitant de la vulnérabilité fonctionnelle des réseaux routiers face aux menaces naturelles (Gleyze, 2005 ; Nabaa, 2011), cette approche cartographique permet d'associer au réseau des enjeux socio-économiques spatialisés et modulables, en volume comme en nature, dans des mailles à risque préalablement définies et connectées.
- 34 Pour l'exemple, les enjeux potentiellement isolables retenus ici correspondent à la population résidente recensée par l'INSEE sur une base carroyée. Mais on peut imaginer d'autres évaluations prenant en compte des variations temporelles de population (jour / nuit ou congés scolaires/hors congés), ou bien d'autres indicateurs socio-économiques tels que le nombre de journées/skieurs ou le chiffre d'affaire journalier des stations de ski. Il est aussi possible de changer d'échelle en affinant le réseau routier considéré (BD Topo de l'IGN par exemple) tout en le couplant à un maillage territorial plus fin. L'évaluation du risque d'isolement associé en sera d'autant plus précise sur le plan géographique. Inversement, les données peuvent être agrégées à des échelles plus petites pour exprimer des indices et des pertes d'accessibilité à l'échelle de vallée, de massifs ou d'entités administratives variables (communes, cantons, départements, etc.).
- 35 Une perspective de progrès importante concerne aussi l'amélioration de l'évaluation des probabilités de déclenchement des avalanches et des coupures consécutives des réseaux, évaluées de façon simple et empirique dans ce travail. Ces dernières pourraient être améliorées en utilisant des modèles numériques de propagation d'avalanche (Naaim *et al.*, 2004) et/ou en affinant l'évaluation temporelle sur la base des évolutions d'ores et déjà documentées de l'activité avalancheuse régionale en réponse au changement climatique (Eckert *et al.*, 2013). De telles perspectives permettraient d'affiner les scénarios de perte d'accessibilité et d'accompagner une réflexion avec les décideurs sur les stratégies de réponse à développer localement pour renforcer la résilience des territoires de montagne à forts enjeux touristiques mais à accessibilité réduite.

BIBLIOGRAPHIE

- ANCEY C. (dir.) 2006.– *Dynamique des avalanches*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- APPERT M., CHAPELON L., 2008.– « La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération », in Leone F. & Vinet F. (dir.), *La mise en carte des risques naturels. Diversité des approches. Géorisques*, n°2, Ed. Presses Universitaires de la Méditerranée, Montpellier, pp. 47-58.
- BAVOUX J.-J., BEAUCIRE F., CHAPELON L., ZEMBRI P., 2005.– *Géographie des transports*, Ed. Armand Colin, Collection U. Paris.
- BARBOLINI M., CAPPABIANCA F., SAILER R., 2004.– « Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment », in *Atti del convegno Risk Analysis 2004*, 27-29 Settembre, Rodi, Grecia. Ed. C. A. Brebbia, pp. 533-542.
- BONNEFOY M., BORREL G., RICHARD D., BÉLANGER L., NAAIM M., 2010.– « La carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) : enjeux et perspectives », Numéro spécial Risques naturels en montagne : Nouveaux outils, nouvelles connaissances et nouveaux savoir-faire, in *Sciences, Eaux et Territoires*, 2, pp. 6-14.
- CASTEBRUNET H., ECKERT N., GIRAUD G. 2012.– « Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 years in the French Alps », in *Climate of the Past*, 8, pp. 855-875.
- CHANG S., 2003.– « Transportation planning for disasters : an accessibility approach », in *Environment and Planning*, vol. 35, pp. 1051-1072.
- CHAPELON L., 1996.– « Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité », in *Mappemonde*, n°3, pp. 28-36.
- CHASSAGNEUX D., MEISINA C., VINCENT M., MÉNILLET F., BAUDU R., 1998. – *Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle nationale*, Rapport BRGM R40355.
- DEMORAES F., D'ERCOLE R., 2009.– « Risques et accessibilité des lieux dans le District Métropolitain de Quito (Équateur) », in *Mappemonde*, n°95 (3-2009).
- D'ERCOLE R., 1994.– « Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse », in *Revue de Géographie Alpine*, n°4, Tome LXXXII, pp. 87-96.
- D'ERCOLE R., METZGER P., 2009.– « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », in *Cybergeo : European Journal of Geography*, document 447.
- DIJKSTRA E. W., 1959.– « A note on two problems in connexion with graphs », in *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271.
- ECKERT N., PARENT E., RICHARD D., 2007.– « Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution », in *Cold Regions Science and Technology*, 49, pp. 88-107.
- ECKERT N., COLEOU C., CASTEBRUNET H., GIRAUD G., DESCHATRES M., GAUME J., 2010.– « Cross-comparison of meteorological and avalanche data for characterising avalanche cycles : the example of December 2008 in the eastern part of the French Alps », in *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 64, Issue 2, pp. 119-136.

- ECKERT N., KEYLOCK C. J., BERTRAND D., PARENT E., FAUG T., FAVIER P., NAAIM M., 2012.- « Quantitative risk and optimal design approaches in the snow avalanche field: Review and extensions », in *Cold Regions Science and Technology*, 79-80, pp. 1-19.
- ECKERT N., KEYLOCK C. J., CASTEBRUNET H., LAVIGNE A., NAAIM M., 2013. - « Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions : from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods », in *Journal of Glaciology*, Vol. 59, issue 213, pp. 93-114.
- GAUCHER R., PASQUIER X., BONNEFOY M., ESCANDE S., 2009.- « Quelques exemples d'avalanches exceptionnelles », in *Neige et Avalanche*, n°126, pp. 8-12.
- GLEYZE J.F., 2005.- *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*, thèse de doctorat, Université Paris 7, Laboratoire COGIT-IGN.
- HENDRIKX J., OWENS I., 2008.- « Modified avalanche risk equations to account for waiting traffic on avalanche prone roads », in *Cold Regions Science and Technology*, 51, pp. 214-218.
- JOMELLI V., DELVAL C., GRANCHER D. ET AL., 2007.- « Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps », in *Cold Regions Science and Technology*, 47, pp. 180-192.
- KEYLOCK C. J., MCCLUNG D., MAGNUSSON M., 1999.- « Avalanche risk mapping by simulation », in *Journal of Glaciology*, 45 (150), pp. 303-314.
- KRISTENSEN K., HARBITZ C.B., HARBITZ A., 2003.- « Road traffic and avalanches – methods for risk evaluation and risk management », in *Surveys in Geophysics*, Vol. 24, n°5-6, pp. 603-616.
- LEONE F. (dir.), DEYMIER J., JOMELLI V., CHAPELON L., BOUHET O., COLAS A., VINET F., CHEREL J. P., MASTER 2 GCRN, 2011.- *Vulnérabilités des réseaux routiers face aux débris flows dans les Alpes. Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale*, Rapport du Projet ANR SCAMPEI, UMR GRED, Université Montpellier 3.
- LEONE F., ASTE J.P., LEROI E., 1996.- « L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque », in *Revue de Géographie Alpine*, n°1, tome 84, pp. 35-46.
- LEONE F., VINET F., 2006.- « La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels » ; in Leone F. & Vinet F. (dir.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques – Géorisques*, n°1, coll. de l'Équipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, pp. 9-25.
- LEONE F., DE RICHEMOND N., VINET F., 2010.- *Aléas naturels et gestion des risques*, Ed. PUF, Collection Licence Géographie.
- LEONE F., PÉROCHE M., LAGAHÉ E., GHERARDI M., SAHAL A., VINET F., HACHIM S., LAVIGNE F., 2013.- « Modélisation de l'accessibilité territoriale pour l'aide à la gestion de crise tsunami (Mayotte, Océan indien, France) », in *Annales de Géographie*, n°693, pp. 502-524.
- MARGRETH S., STOFFEL L., WILHELM C., 2003.- « Winter opening of high alpine pass roads - analysis and case studies from the Swiss Alps », in *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 37, Issue 3, pp. 467-482.
- METZGER P., D'ERCOLE R., ROBERT J., HARDY S., SIERRA A., GLUSKI P., 2011.- « Les dimensions spatiales et territoriales de la gestion des situations de crise », in *Actes du Colloque international du GIS Collège International des Sciences du Territoire : Fonder les sciences du territoire*, Paris, novembre 2001, pp. 342-348.

- NAAIM M., NAAIM-BOUVET F., FAUG T., BOUCHET A., 2004.- « Dense snow avalanche modeling : flow, erosion, deposition and obstacle effects », in *Cold Regions Science and Technology*, 39, pp. 193-204.
- NAAIM M., FAUG T., NAAIM F., ECKERT N., 2010.- « Return period calculation and passive structure design at Taconnaz avalanche path, France », in *Annals of Glaciology*, Vol. 51, issue 54, pp. 89-97.
- NABAA M., 2011.- *Morphodynamique de réseaux viaires. Application au risque*, Thèse de doctorat, Université du Havre.
- OCANA J., ESCANDE S., 2009.- « La crise vue depuis le village d'Abriès », in *Neige et Avalanches*, n°126, p. 13.
- REGHEZZA M., 2006.- « La vulnérabilité : un concept problématique », in Leone F., Vinet F. (dir.), *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques, Géorisques*, n°1, coll. de l'Équipe d'Accueil GESTER, Éd. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, pp. 35-40.
- RHEINBERGER C., BRÜNDL M., RHYNER J., 2009.- « Dealing with the White Death : avalanche risk management for traffic routes », in *Risk Analysis*, Vol. 29, Issue 1, pp. 76-94.
- ROBINET J., BONNEFOY M., 2013.- « Mise à jour annuelle de la CLPA, dix ans d'expérience... Bilan, amélioration de la procédure et perspectives », in *Neige et Avalanches*, n°140, pp. 10-14.
- SRI HADMOKO D., 2009.- *Les mouvements de versant dans les Monts Menoreh, Java, Indonésie : variabilité spatio-temporelle, impacts, déclenchement, et analyse de la susceptibilité*, thèse de doctorat, Université Paris 1.
- TACNET J. M., MERMET E., ZADONINA E., DESCHATRES M., HUMBERT P., DISSART J.-C., LABBE S., 2013.- « Road network management in the context of natural hazards : a decision-aiding process based on multi-criteria decision making methods and network structural properties analysis », in *International Snow Science Workshop proceedings*, 7-11 October 2013, Grenoble-Chamonix, France, pp. 912-919.
- WASTL M., STÖTTER J., KLEINDIENST H., 2011.- « Avalanche risk assessment for mountain roads: a case study from Iceland », in *Natural Hazards*, 56, pp. 465-480.
- WILHELM C., 1997.- « Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung », in *Mitt.Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch.*, 54, pp. 1-309.
- ZISCHG A., FUCHS S., KEILER M., STÖTTER J., 2005.- « Temporal variability of damage potential on roads as a conceptual contribution towards a short-term avalanche risk simulation », in *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, pp. 235-242.
- ZISCHG A., FUCHS S., KEILER M., MEISSL G., 2005.- « Modelling the system behaviour of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic road », in *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, pp. 821-832.

RÉSUMÉS

L'accessibilité routière revêt un caractère particulièrement stratégique pour le maintien des activités économiques, mais également pour les interventions de secours. En montagne, les avalanches représentent une menace particulièrement forte car, outre les victimes et dommages directs qu'elles peuvent causer, elles entraînent très souvent une perte d'accessibilité plus ou moins prolongée à une époque de l'année où les réseaux sont déjà fortement altérés par les

fermetures saisonnières. Pourtant ces incidences sont rarement étudiées à l'échelle régionale. Afin d'évaluer la vulnérabilité physique, fonctionnelle et humaine des réseaux routiers, la première étape de notre étude a consisté à géo-référencer et harmoniser au sein d'un SIG les informations provenant des principales bases de données disponibles sur les conséquences des avalanches pour trois départements alpins (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes-Maritimes). Cela a permis d'identifier les impacts avalancheux sur les routes depuis 1937, de dresser la typologie et l'intensité des dommages, et d'évaluer la vulnérabilité fonctionnelle du réseau. Une seconde étape a consisté à produire des indices de risque de dysfonctionnement et d'isolement à l'échelle régionale. Ces indices intègrent les données historiques sur les dommages aux routes et reposent sur des calculs d'accessibilité utilisant la théorie des graphes dans un environnement SIG. Les cartographies produites présentent une valeur ajoutée pour l'aide à la décision en cas de crise et l'analyse spatiale comparative à l'échelle régionale.

INDEX

Mots-clés : avalanches, vulnérabilité, risque, routes, accessibilité, cartographie, Alpes

AUTEURS

FRÉDÉRIC LEONE

UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, BP 64501, 34394 Montpellier, France

ALBERT COLAS

UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, BP 64501, 34394 Montpellier, France.

YANN GARCIN

UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, BP 64501, 34394 Montpellier, France.

NICOLAS ECKERT

UR ETGR, Irstea / Université de Grenoble Alpes, BP 76, 38 402 Saint Martin d'Hères, France.

VINCENT JOMELLI

UMR LGP, 8591 CNRS / Université Paris 1, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon, France.

MONIQUE GHERARDI

UMR GRED, Université Montpellier 3 / IRD, BP 64501, 34394 Montpellier, France.