



HAL
open science

Reflexions on the basis of legal zoning for recurrent mountain risks

Nicolas Eckert, Mohamed Naaim, Florie Giacona, Philomène Favier, Aurore A. Lavigne, Didier Richard, Franck Bourrier, Eric Parent

► **To cite this version:**

Nicolas Eckert, Mohamed Naaim, Florie Giacona, Philomène Favier, Aurore A. Lavigne, et al.. Reflexions on the basis of legal zoning for recurrent mountain risks. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2018, 2018 (2), pp.38-67. 10.1051/lhb/2018019 . hal-02608960

HAL Id: hal-02608960

<https://hal.inrae.fr/hal-02608960>

Submitted on 30 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Repenser les fondements du zonage réglementaire des risques en montagne « récurrents »

Nicolas ECKERT¹, Mohamed NAAIM¹, Florie GIACONA²⁻¹, Philomène FAVIER³, Aurore LAVIGNE⁴, Didier RICHARD¹, Franck BOURRIER⁵, Eric PARENT⁶

¹ UR ETNA, Irstea Grenoble / Université Grenoble Alpes, Saint Martin d'Hères, France, e-mail: nicolas.eckert@irstea.fr

² Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève, Genève, Suisse

³ CIGIDEN, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chili

⁴ Université de Lille 3, Lille, France

⁵ UR EMGR, Irstea Grenoble / Université Grenoble Alpes, Saint Martin d'Hères, France

⁶ Equipe MORSE, UMR 518 INRA-AgroParisTech, 16 rue C Bernard, 75005, Paris, France

RÉSUMÉ. – Le zonage des risques en montagne reste pensé comme une procédure normative issue de la transposition du « modèle inondation ». Au cœur de ce schéma figure le phénomène centennal, référence probabiliste d'une définition problématique, inadaptée à des phénomènes destructeurs, et peu interprétable en termes d'exposition. Ces insuffisances sont sources d'incompréhensions, et elle rend nécessaire des raccourcis et des pratiques de terrain sécuritaires. Cet article propose un changement de paradigme. Le zonage y est envisagé comme la un compromis entre les pertes dues au phénomène dommageable et les restrictions que la société s'impose. L'état des connaissances scientifiques ne permet pour l'instant pas de définir une procédure directive complète qu'il ne revient de toute façon pas à la sphère technique d'énoncer. En revanche, cartographier le risque individuel en combinant modèle d'aléa et susceptibilité au dommages pour différents types d'enjeux puis définir le zonage sur la base de seuils d'acceptabilité permet d'ores et déjà d'intégrer le caractère multivarié de l'aléa, de prendre en compte les incertitudes et de tracer l'ensemble de la procédure de décision. Le choix des seuils de risque individuel constituant les limites de zones et l'affichage du risque résiduel après zonage matérialisent le compromis choisi, permettant une réappropriation de la question par la société. Le cadre générique proposé est compatible avec une large gamme de solutions techniques comme d'orientations institutionnelles. In fine des recommandations concrètes pour la pratique de même que des pistes de recherche futures sont formulées. L'ensemble est illustré par un cas d'étude détaillé issu du domaine des avalanches, mais la réflexion est transférable à l'ensemble des aléas gravitaires rapides récurrents.

Mots-clés : Risques En Montagne, Zonage Règlementaire, Risque Individuel, Acceptabilité Du Risque, Risque Résiduel, Incertitude.

Reflexions on the basis of legal zoning for recurrent mountain risks

ABSTRACT. – Risk zoning for mountain hazards remains generally seen as a normative process resulting from transposition of a scheme elaborated for floods. In its hearth is the centennial hazard, a probabilistic reference difficult to properly define, unsuitable for destructive phenomena and little interpretable in terms of exposure. These shortcomings are sources of misunderstandings and they make questionable shortcuts as well as conservative field practices necessary. This article proposes a paradigm shift. Zoning is seen as a compromise between the losses due to the damaging phenomenon and the restrictions that society imposes to itself. The current scientific knowledge does not allow specifying a complete directive procedure, which is anyway not the responsibility of the technical sphere. However, individual risk mapping by combining the hazard model and the damage potential for different elements at risk and then zoning on the basis of acceptability thresholds integrates the multivariate nature of the hazard, allows consideration of uncertainties and authorizes the traceability of the whole decisional procedure. The choice of the individual risk values to which the zone limits correspond and the display of the residual risk after zoning materialize the chosen social compromise, which enables a re-appropriation of the zoning issue by the society. The proposed formal framework is compatible with a wide range of technical solutions and institutional guidelines. Finally, specific recommendations for practice and for future research are formulated. The paper is illustrated by a case study from the field of snow avalanches, but the purpose is transferable to all recurrent rapid mass movements.

Key-words: Mountain Risks, Legal Zoning, Individual Risk, Risk Acceptance, Residual Risk, Uncertainty.

I. INTRODUCTION

En zone de montagne, l'espace disponible pour l'urbanisation est limité par les contraintes topographiques et la survie plus ou moins fréquente de phénomènes potentiellement

dommageables. La mitigation du risque pour les bâtiments et leurs occupants repose en premier lieu sur le zonage. Ce dernier correspond au découpage de l'espace en zones assorties de prescriptions réglementaires différenciées. La zone « rouge » est réputée inconstructible. La zone « bleue »

est constructible moyennant respect de prescriptions : renforcements des bâtiments [Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2011], contraintes d'usage, etc. La zone « blanche » est sans restriction. En apparence, la question du zonage réglementaire paraît simple. Son principe a été institutionnalisé par la loi instaurant les Plans de Prévention des Risques (PPR)¹ du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, dite loi Barnier, puis constamment réaffirmé depuis [Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Équipement, 1997]. Depuis la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, dite loi Bachelot, le PPR est même présenté comme un outil de prévention globale [Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable, 2006] autour duquel s'articule l'ensemble des mesures de mitigation : zonage, information préventive à caractère obligatoire [Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer et Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2005], etc. La figure 1 propose une illustration de zonage PPR autour du cas des avalanches de neige. Le propos de cet article se focalise essentiellement sur cet exemple illustratif, mais la réflexion est transposable à l'ensemble des aléas gravitaires de montagne, en particulier ceux dits rapides du fait de leur vitesse de propagation.

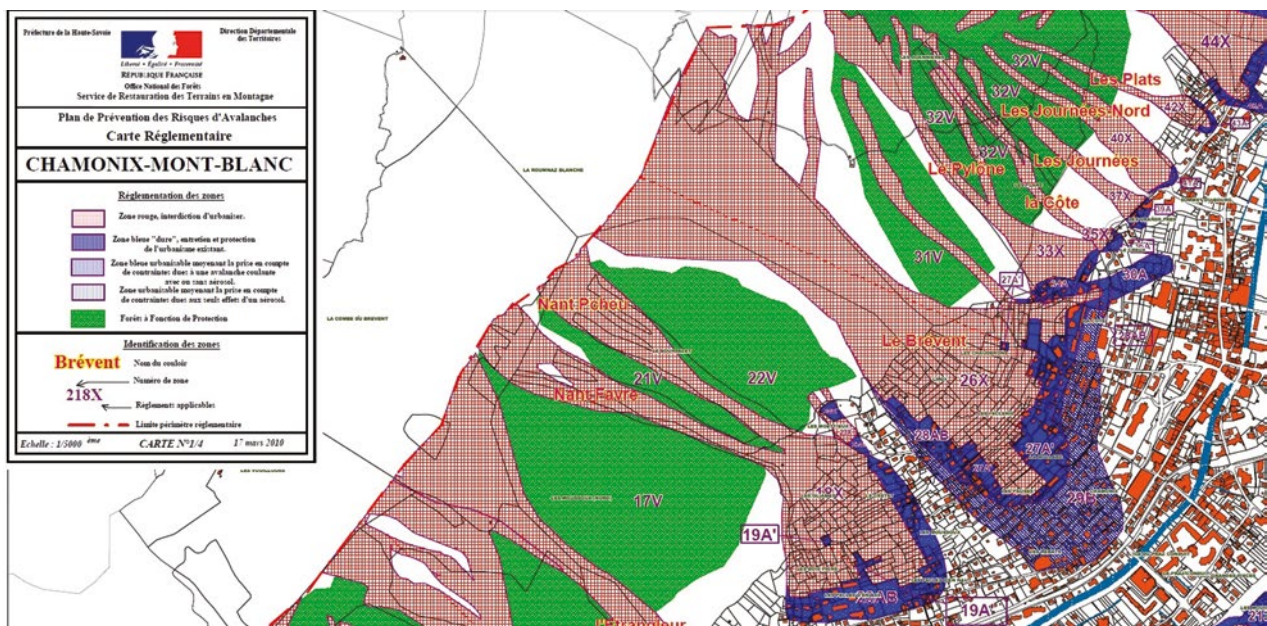
On traite plus particulièrement du cas des aléas « récurrents », c'est-à-dire se produisant de manière irrégulière mais relativement fréquente (période de retour de l'ordre de quelques décennies au plus) sur les mêmes sites avec une intensité variée : avalanches donc, mais aussi chutes de blocs, laves et crues torrentielles, certains mouvements de terrain, aléas d'origine glaciaire et périglaciaire, etc. À l'échelle d'un site à risque, la probabilité d'être affecté décroît de manière progressive dans l'espace. C'est cette

variation progressive qui fait la difficulté « conceptuelle » autant que pratique du découpage de l'espace en zones. Il faut bien, à un moment donné, choisir « où l'on met le trait », sans pouvoir pour autant dire que l'aléa est nul, ou même quasi nul au-delà du trait. Au contraire, il y est à peine plus faible qu'en-deçà du trait. Le caractère récurrent distingue ces aléas des phénomènes gravitaires rapides dont l'occurrence à l'échelle du site est si rare qu'ils peuvent être vus en première approximation comme des réalisations de variables aléatoires discrètes : ruptures en masse de versant rocheux ou écroulements glaciaires majeurs par exemple. Pour ces derniers, le chiffrage exact de la masse qui se décroche est secondaire car ils sont de toute façon si destructeurs que d'éventuels renforcements, voire même des dispositifs de protection plus importants (digue etc.), sont inopérants. Les seules questions pour le zonage sont donc « quelle est l'emprise du phénomène possible » et « quelle est sa probabilité ». Si cette dernière est jugée suffisamment élevée, la zone rouge s'impose à l'ensemble de l'emprise potentielle et les développements proposés dans cet article sont, sans doute, superflus.

I.1. Le modèle inondation et ses limites

À l'heure actuelle, le zonage réglementaire des risques en montagne est pensé comme une procédure normative issue de la transposition aux aléas de montagne d'un schéma conceptuel élaboré pour les inondations. Ces dernières sont le phénomène gravitaire dommageable le plus coûteux et dont la prise en charge institutionnelle est, de ce fait, ancienne et « complète ». Dans ce schéma, il est plus ou moins admis, sans que cela ne soit toutefois gravé dans le marbre, que le zonage s'effectue sur la base du dommage potentiel pour un individu dans un bâtiment type associé à une fréquence. Mathématiquement, ceci définit la notion de risque individuel (cf. III). Pourtant, l'approche française du zonage (partagée par de nombreux autres pays), reste « aléa-centrée ». En effet, le rôle central revient à un aléa choisi comme

1. Cette loi remplace, généralise, et étend les dispositions réglementaires prévues par les lois antérieures de 1935, 1982 et 1987.



Zonage réglementaire extrait du Plan de Prévention des Risques, volet Avalanches (PPRA), commune de Chamonix, France, version du 17 mars 2010. Risque fort (zone rouge), risque modéré (zone bleue) et forêts à rôle protecteur (surfaces vertes). Les trois nuances de bleu sont une tentative locale pour distinguer des zones plus ou moins exposées et gérer ainsi de façon différenciée le bâti existant et l'urbanisation future.

Figure 1 : Exemple de zonage PPR.

référence, presque toujours défini en terme probabiliste, et non au risque (individuel ou pas). Sur le modèle de la célèbre crue centennale, c'est en effet un phénomène de période de retour 100 ans qui est généralement déterminant pour fixer l'extension des zones dont nous traitons. L'intérêt d'utiliser la même référence centennale pour différents aléas est de pouvoir, en théorie, comparer des niveaux d'exposition à plusieurs aléas et, ainsi, hiérarchiser les actions de mitigation à engager. La communication en est facilitée dans la mesure où elle peut se baser sur l'affichage d'un même niveau d'exposition pour des populations soumises à différents aléas. La réglementation européenne, et notamment la traduction de la directive européenne inondation [Parlement Européen et Conseil Européen, 2007] via une circulaire dédiée [MEDDE 2012], vient renforcer cette volonté unificatrice. Néanmoins, consciente de la spécificité de chaque phénomène, la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère chargé de l'Environnement a publié un guide méthodologique pour chaque type d'aléa à destination des services impliqués dans l'instruction des PPRs (Directions Départementales des Territoires, services de Restauration des Terrains en Montagne, etc.) et des acteurs mandatés pour leur réalisation (bureaux d'études principalement). Ces guides (par ex., [Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement et Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1999a ; 1999b] : respectivement l'exemple « historique » des inondations et sa transposition aux mouvements de terrain) ne remettent pas en cause la primauté de la référence centennale. Cependant, ils adaptent le modèle général au cas par cas et fournissent des indications plus ou moins directives pour la réalisation du zonage.

De fait, les méthodes sur lesquelles se fonde la pratique du zonage des aléas de montagne sont largement inspirées de celles utilisées dans le domaine de l'hydrologie et de l'hydraulique : évaluation statistique des aléas de référence, modélisation des écoulements, etc. Cette proximité résulte de l'origine en partie hydrométéorologique des aléas de montagne, caractéristique qu'ils partagent avec les crues. Elle est également liée à une tradition d'ingénierie commune et au cadre institutionnel français historique de gestion des risques naturels par les corps techniques de l'État. De ce point de vue, la transposition des approches à partir du cas des inondations pris comme un modèle fait sens. Néanmoins, c'est aussi parce que l'objectif visé est similaire (déterminer l'aléa de référence, en particulier centennal) que la transposition des méthodes se justifie. Pourtant, au contraire des crues de plaine, les aléas gravitaires rapides sont caractérisés par leur soudaineté et leur brutalité. Leur durée ne permet pas, en général, l'évacuation des populations menacées après déclenchement du phénomène. De plus, tout impact sur une construction a des conséquences potentiellement désastreuses. Ainsi, l'affichage de mêmes niveaux d'aléas pour différents phénomènes ne correspond en rien à un même niveau d'exposition au risque, et le zonage « au mètre près » a bien une importance cruciale (qu'il a peut-être moins pour une inondation, par nature plus « diffuse » mais aussi, localement, moins destructrice). La localisation nette dans l'espace (souvent des sites précis, de taille relativement modeste) comme dans le temps (notamment suite à des conditions météorologiques exceptionnelles) des aléas gravitaires rapides permet en revanche d'envisager des mesures de gestion temporaire efficaces avant déclenchement (évacuation préventive de zones urbanisées réduites bien localisées ou fermeture de routes par exemple). La transposition directe du modèle inondation aux aléas dont nous traitons trouve donc rapidement ses limites.

1.2. La pratique du zonage : incompréhensions, incohérences et raccourcis discutables du fait d'un problème mal posé

Dans le détail, la pratique du zonage pour les risques en montagne récurrents est peu satisfaisante et la situation entre les acteurs est tendue. Le contexte scientifique est celui de méthodes d'évaluation des aléas à la technicité de plus en plus forte et en évolution rapide sur la base d'observations de terrain sur sites instrumentés et de développements théoriques (mécanique, modélisation numérique, statistique ou climatologie, etc.). Les acteurs techniques de terrain n'ont guère les moyens de suivre ce foisonnement, de sorte que le fossé se creuse avec le monde de la recherche. En effet, les services de l'État sont affaiblis par la réorganisation des politiques publiques tandis que les structures privées, de petite taille, doivent intervenir à bas coûts sur un marché réduit. Plutôt que de méthodes plus sophistiquées, ces derniers sont en demande d'approches pratiques (*i.e.* offrant un compromis précision/temps de mise en œuvre acceptable), de même que d'une doctrine plus opérationnelle à leurs yeux. Ils souhaiteraient notamment un « allègement » de la référence probabiliste (plutôt parler d'un scénario rare, sans lui associer une période de retour déterminée), car ils estiment que, la plupart du temps, une caractérisation probabiliste précise de l'aléa est impossible. De leur côté, les élus, tout en souhaitant que la responsabilité d'un sinistre ne leur incombe pas, militent pour une réglementation peu coercitive en matière de constructibilité de façon à préserver le potentiel de développement économique de leur territoire, et pour éviter qu'une image négative ne lui soit associée². Ils sont, en outre, peu favorables à la prescription d'évacuations préventives dont ils jugent la mise en œuvre irréaliste en situation de crise. Au contraire, les associations de familles des victimes des catastrophes passées³, très actives, cherchent à faire évoluer la réglementation dans le sens d'une plus forte sécurisation à caractère obligatoire des populations exposées.

Censés établir le lien entre ces différents acteurs, les guides méthodologiques par phénomène cristallisent les difficultés et illustrent la complexité du dialogue. Élaborés et publiés dans la difficulté (lorsqu'ils le sont, le guide « torrents de montagne » [Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, 2006] n'est toujours pas officiellement sorti), et sous les feux croisés de demandes difficiles à concilier, ils sont finalement compliqués à appliquer et apparaissent à bien des égards insatisfaisants à tout le monde. Le guide avalanche a ainsi été publié en août 2015, sous la forme d'une version à peine remaniée d'un guide élaboré en 2004 [MEDDE, 2015a]. Les avancées scientifiques et techniques sur la période 2004-2015 n'y ont pas été intégrées tandis que c'est le débat sur la prise en compte, ou non, et, dans l'affirmative, selon quelles modalités, d'un aléa exceptionnel dans le zonage qui a cristallisé les débats entre élus et associations de victimes [Le courrier des maires, 2015]. Quant aux recommandations pratiques, elles y sont, à contrecourant de la demande des services techniques, très peu directives, de façon à laisser place à l'interprétation et la négociation. Il n'est donc guère étonnant qu'une étude récente [Rapin, 2015] ait pu mettre en évidence une variabilité grandissante des zonages avalanche dans les PPR, aussi bien du point

2. Paradoxalement, la prise en charge du risque le rend plus concret et donc plus sensible. Au contraire, un risque non pris en charge n'est pas perçu, en tout cas tant qu'un événement dommageable ne s'est pas produit.

3. Notamment l'Association pour l'Information sur les Risques d'Avalanches urbaines et leur Prévention (<http://www.airap.asso.fr/>).

de vue des méthodes et des informations utilisées (historicité, modélisation, etc.) que du rendu (traçabilité des étapes intermédiaires à l'obtention du zonage, nature des prescriptions réglementaires, etc.). À cet état de fait s'ajoutent une variabilité territoriale et des incohérences dans les systèmes de gestion institutionnalisés⁴ [Giacona *et al.*, in press]. L'ensemble se conjugue pour malmener le principe supposé pourtant intangible d'égalité du citoyen face au risque.

Cette situation ne résulte pas, bien sûr, d'une quelconque « mauvaise volonté » des uns et des autres. Il est légitime que chaque acteur mette en avant ses contraintes et soit soucieux de ses prérogatives comme de son niveau de responsabilité. Le nœud principal réside dans le fait que le problème du zonage des risques en montagne (voire des risques tout court...) reste mal posé, sur la base de concepts insuffisamment définis. Ces derniers sont, de ce fait, compris différemment par les acteurs concernés et leur traduction technique et/ou réglementaire est donc, assez logiquement, quasi impossible. En effet, le zonage a été pensé comme étant une procédure technique normative découlant entièrement de la caractérisation de l'aléa. Le problème est généralement réduit à la transformation de la carte des aléas (obtenue selon des méthodes plus ou moins normatives) en zonage via ce qu'il est convenu d'appeler une « matrice de passage » (Figure 3). Ceci a deux inconvénients : d'abord dissimuler les choix sociétaux forts qui le sous-tendent, notamment le nécessaire compromis entre les pertes dues au phénomène dommageable que la société accepte et les restrictions à l'urbanisation que la société s'impose pour que les premières restent supportables. Ensuite, négliger le fait que le zonage inclut en réalité trois étapes distinctes pouvant chacune faire l'objet de développements spécifiques : l'obtention de la carte des aléas, sa transformation en une carte de risque pour des enjeux existants ou potentiels, et, enfin, le découpage de cette carte continue en zones assorties de prescriptions différentes (rouge, bleue et blanche), et au sein desquelles subsiste un risque résiduel après zonage, fonction des prescriptions associées à chaque zone. Ces 3 étapes ont bénéficié (et bénéficient toujours) d'efforts de recherche très différents. C'est particulièrement l'étape 1 qui a concentré les efforts des ingénieurs, géomorphologues, hydrauliciens, mécaniciens des fluides, etc., tandis que les étapes 2 et 3 sont restées des parents pauvres. Ces dernières sont de ce fait présentées dans les documents techniques et institutionnels comme des conséquences directes de l'étape 1 (par ex., [MEDDE, 2015]), alors qu'elles en sont quasi indépendantes.

Ce faisant, puisque l'on va en pratique quasi-directement des aléas au zonage réglementaire, le risque n'est pas réellement quantifié. La carte de risque individuel, pourtant support, en principe, du zonage reste non explicite et les valeurs de risque avant zonage et après zonage (risque résiduel) ne peuvent pas être affichées. Seules des valeurs

d'aléas nécessairement plus abstraites, voire relatives (aléa fort, moyen ou faible), sont accessibles aux intéressés, grand public comme gestionnaires locaux. La valeur du risque auquel les populations restent *in fine* exposées s'en trouve occultée. La question cruciale de son acceptabilité, et donc de la validité du compromis social que le zonage est censé constituer, n'est donc pas réellement traitée, ni même posée. Dans ce contexte, il n'est guère étonnant que les associations de défense des victimes et, plus généralement, les habitants des zones exposées, expriment leur mécontentement... En outre, ce schéma, en cherchant à plaquer une construction déterministe (la matrice de passage avec des niveaux d'intensité comme seuils) sur des concepts probabilistes (l'aléa centennal) se heurte à une difficulté irréductible : la non-unicité pourtant bien connue des niveaux de retour dans un cadre multivarié, rendant impossible le passage univoque au zonage (par ex., [Ancey *et al.*, 2004 ; Salvadori *et al.*, 2013]). Si la définition la plus naturelle de la période de retour d'une avalanche se fait au travers de la variable distance d'arrêt (la position atteinte), il reste bien « une infinité » de pressions d'impact (et aussi de vitesses maximales, de hauteurs maximales, etc.) possibles pour les avalanches dépassant une position donnée (cf. III). Les bureaux d'études peuvent donc légitimement s'arracher les cheveux en voulant appliquer les prérogatives méthodologiques.

I.3. Vers une révision de la doctrine ?

Trois rapports d'inspection générale récents abordent le problème : les retours d'expérience sur l'avalanche de Montroc (dernière avalanche catastrophique en France, ayant occasionné 12 morts dans des chalets, [Glass *et al.*, 2000]), sur la situation de crise majeure de décembre 2008 dans les Alpes du Sud (isolement de plusieurs villages du Queyras et du Mercantour, [Cassayre et Laurens, 2010]), et une réflexion plus générale sur la prise en compte institutionnelle des avalanches exceptionnelles [Le Gallou et Guignard, 2011]. La prise de conscience du caractère non satisfaisant de la situation actuelle est donc claire, de sorte que la doctrine officielle est vouée à évoluer. Ainsi, à l'initiative de la DGPR du ministère chargé de l'environnement, trois comités techniques (Cotechs) incluant une large représentation des acteurs du domaine ont travaillé en 2014-2015 à la révision des modalités de prise en compte dans les PPRs du risque à long terme dû aux aléas gravitaires en montagne. Le Cotech 1 avait pour mission de se focaliser sur la définition de l'aléa de référence. Le Cotech 2 était dédié à la prise en compte des ouvrages dans le zonage. Le Cotech 3 était consacré aux aspects réglementaires, au sens de ce qui a vocation à figurer ou non dans un règlement. Pour l'heure, il ne peut être préjugé de ce qu'il adviendra du rendu de ces comités techniques. Néanmoins, s'il est possible que des évolutions de la doctrine soient promulguées à court terme, les fondements du zonage ne seront vraisemblablement pas modifiés à cette échéance. En effet, le découpage des Cotechs, en isolant les aspects techniques liés à l'aléa de référence et les aspects réglementaires, montre bien que l'on reste pour l'instant sur une vision « aléa-centrée » du zonage dans laquelle le suivi d'une procédure normative basée sur l'aléa prime sur la définition d'un compromis social acceptable en termes de rapport risque-prescriptions. En outre, dans ce découpage en trois Cotechs, le passage de la carte des aléas au zonage reste bien une sorte de trou noir dans lequel les étapes intermédiaires ne sont pas clairement identifiées. Elles ne sont, de ce fait, pas traçables en pratique (*i.e.* il est impossible de reconstituer *a posteriori* toute la chaîne des étapes ayant

4. Il n'existe pas de règle nationale pour dire qu'une commune est soumise à un risque. La liste figurant sur la base institutionnelle de référence Gaspar (<http://macommune.prim.net/gaspar/>, consultation le 01/06/2016) résulte de la compilation de données départementales inhomogènes. À titre d'exemple, la carte des communes soumises au risque avalanche dans le guide méthodologique MEDDE [2015] résulte de la compilation des Dossiers Départementaux des Risques Majeurs (DDRM) autour de 2005. De ce fait, aucune commune n'apparaît par exemple comme soumise au risque dans le Massif vosgien, qui pourtant compte deux couloirs inscrits à l'inventaire des Sites Sensibles Avalanches (SSA, sites où des enjeux sont identifiés, [Rapin *et al.*, 2004]). Au contraire, le Puy de Dôme, qui compte un seul SSA, dénombre quatre communes soumises au risque avalanche selon la base Gaspar. Mais c'est une 5^{ème} commune du département, non listée comme soumise au risque dans Gaspar, qui a bénéficié d'un arrêté de catastrophe naturelle (CATNAT) pour avalanche en 2005...

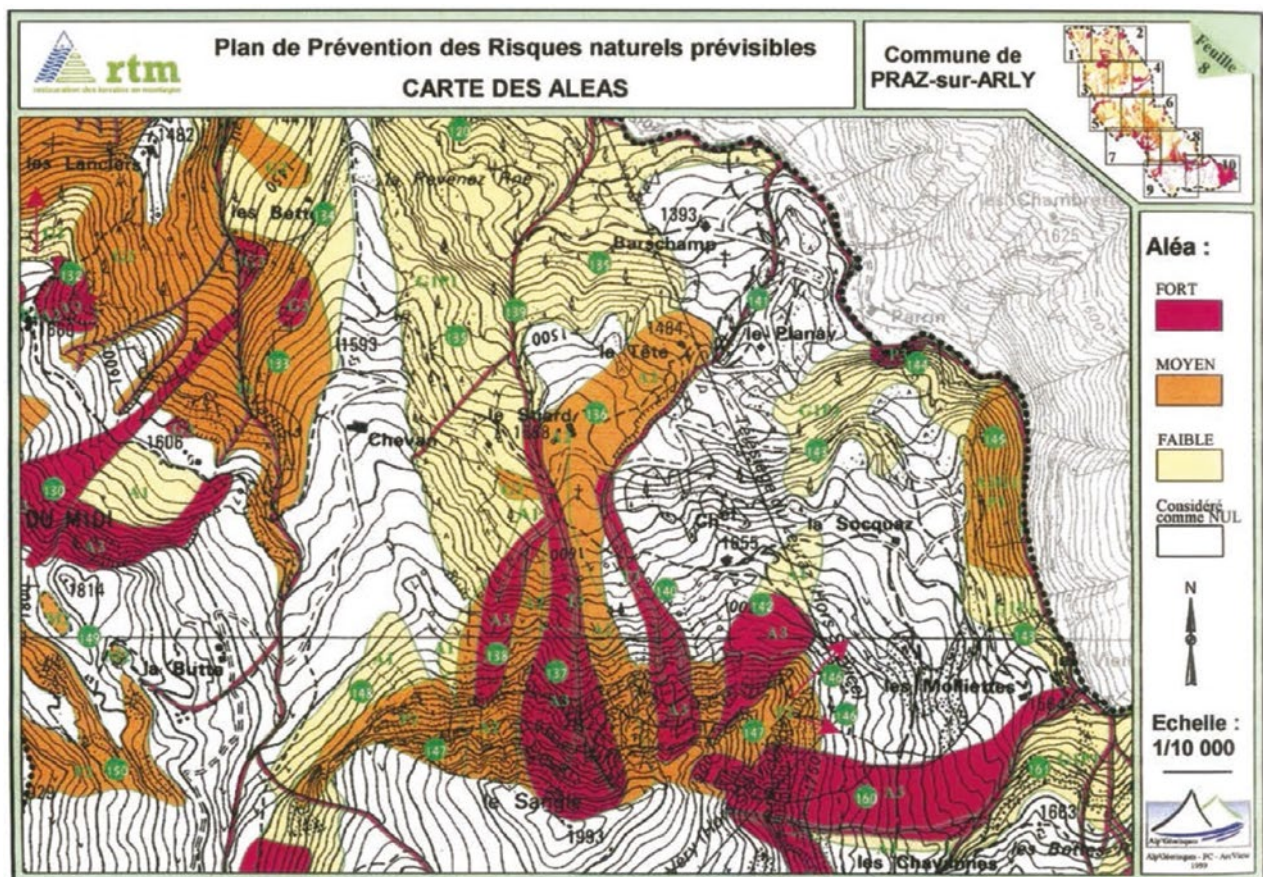
abouti au zonage). À ce titre, il est remarquable que la question de la définition de la règle de zonage, et, en particulier, de la correspondance entre niveaux de risque et limites de zones, n'ait pas fait partie du mandat des Cotechs, ou, tout au moins, que ces derniers n'aient pas souhaité s'en saisir.

En ce qui concerne spécifiquement les avalanches, le récent guide méthodologique [MEDDE, 2015] fait néanmoins apparaître une évolution importante. Jusqu'alors, le zonage se faisait sur la base d'un seul aléa de référence, l'événement centennal bien sûr, ou, éventuellement, l'événement historique le plus fort ayant été observé sur le site étudié. Grossièrement, la limite entre zones bleue et blanche était alors déterminée par l'extension de cet événement, et, à l'intérieur de cette dernière, la zone rouge était assimilée à l'extension à l'intérieur de laquelle l'événement avait exercé une pression maximale supérieure à 30 kPa (seuil au-delà duquel les renforcements sont supposés inopérants, ou, tout au moins, leur coût est supposé prohibitif). MEDDE [2015] indique que le zonage se fera dorénavant sur la base de deux scénarios dits « de référence » et « exceptionnel », en fait deux aléas correspondant à des périodes de retour respectivement centennale et très grande⁵. Même si les discussions

5. MEDDE [2015] précise que, « pour la résistance des bâtiments, la plus forte avalanche connue depuis le milieu du XIX^{ème} siècle - comprendre, depuis la fin du Petit Age Glaciaire - peut être assimilée à l'aléa de référence centennal ». Il rejoint en cela la doctrine antérieure. Pour ce qui est du scénario exceptionnel, aucune référence probabiliste précise n'est fournie, mais il pourrait s'agir, selon MEDDE (2015), d'un « événement historique extrême antérieur au milieu du XIX^{ème} siècle » ou d'un « événement très ancien dont l'existence et/ou l'extension paraissent douteuses ».

sur la prise en compte de l'aléa exceptionnel dans le zonage ont été longues et houleuses, il semble que ce choix ne sera plus remis en cause. Il a en effet le mérite de montrer clairement que, pour un phénomène récurrent comme l'avalanche, l'aléa de référence est susceptible d'être dépassé, et même que l'on est sûr qu'il le sera « suffisamment fréquemment » pour que le risque au-delà de l'emprise de l'aléa de référence doive être considéré dans les plans d'urbanisme. Pour ce qui est du passage au zonage réglementaire, MEDDE [2015] combine assez classiquement les emprises et les intensités (définies par des niveaux de pression) des deux scénarios pour la définition de niveaux d'aléa (Figure 2) puis de zones, via une matrice de passage (Figure 3). Pour ce qui est du scénario exceptionnel, seule son emprise compte, introduisant une nouvelle zone, dite « jaune ». Les prescriptions réglementaires qui l'accompagnent concernent en particulier les Établissements Recevant du Public (ERPs) et les éléments de la chaîne des secours (interdiction de nouvelles installations). L'éventuelle adjonction de mesures de gestion temporaire (évacuations préventives, fermetures de routes, confinement) en cas de situation de crise, en lien avec les Plans Communaux de Secours (PCS), reste encore discutée⁶. Pour le scénario de référence, la notion d'aléa fort, moyen et faible (Figure 2) renvoie à des niveaux de pressions exercées par l'aléa de référence centennal respectivement supérieurs à 30 kPa, entre 1 et 30 kPa et inférieur à 1 kPa. La

6. Il s'agit du point ayant cristallisé les plus fortes oppositions (crainte par les élus d'une plus grande menace d'être condamné pour défaut de sécurité) et ayant, de ce fait, conduit au délai de publication du guide MEDDE [2015].



Délimitation des zones d'aléa fort, moyen et faible, cartographie multi-aléas, commune de Praz sur Arly (Haute Savoie). Le numéro de chaque emprise permet de remonter au phénomène associé : avalanches, glissements de terrain, chutes de pierre, crues torrentielles. Reproduction d'après MEDDE [2015].

Figure 2 : Exemple de carte des aléas figurant dans un PPR.

Aléa	Espaces non urbanisés	Espaces urbanisés	
		non protégés	Protégés par des dispositifs entretenus
Fort A3	Interdiction de construire	Interdiction de construire + limitation des arbres	Interdiction ou exceptionnellement prescriptions strictes + limitation des arbres
Moyen A2	Interdiction de construire	Interdiction ou exceptionnellement prescriptions et mise en œuvre des mesures de protection + limitation des arbres	Prescription et mesures d'entretien des ouvrages de protection + limitation des arbres
Zone non exposée au risque source d'aléa menaçant des enjeux	Interdiction de construire + sylviculture pour une forêt à fonction de protection	Sans objet	
Faible A1	Sylviculture pour une forêt à fonction de protection Mesures individuelles de prévention	Mesures individuelles de prévention	Prescriptions et mesures d'entretien des ouvrages de protection
AE	Réglementation pour les ERP avec hébergement et les équipements nécessaires à l'organisation des secours		
Négligeable ou nul mais accès menacés			

La notion d'aléa fort, moyen et faible renvoie à des niveaux de pression respectivement supérieurs à 30 kPa, entre 1 et 30 kPa et inférieur à 1 kPa exercés par l'aléa de référence, de période de retour centennale. Outre les trois zones rouge, bleue et blanche qui en dérivent, la matrice introduit la zone jaune dont la correspondance probabiliste n'est pas spécifiée. Reproduction d'après MEDDE [2015].

Figure 3 : « Matrice de passage » entre la carte d'aléa et le zonage réglementaire PPR avalanche.

subdivision entre zones rouge et bleue implique des complexités additionnelles, en particulier une distinction entre zones urbanisées et urbanisables, de même que l'éventuelle présence de dispositifs de protection entretenus (Figure 3).

Ce nouveau schéma pose question, à la fois dans le détail et sur son principe même. En effet, il est clair, tout d'abord, que l'étape de la carte de risque individuel, support théorique du zonage, reste non explicite. Ensuite, l'existence de deux scénarios dimensionnant, plus la considération de multiples cas de figure, rend le passage univoque au zonage très complexe à définir. Et encore, la matrice de passage proposée ne prend-elle pas en compte les notions de quantité et de qualité d'information, donc d'incertitude (sauf, éventuellement, l'emprise d'un événement incertain pour la délimitation de la zone jaune) pourtant critiques pour le zonage, son efficacité comme sa traçabilité. Enfin, la distinction bleue-rouge sur la base de niveaux d'intensité est discutable du fait de résultats de recherche récents sur la dynamique des écoulements autant que du point de vue de la caractérisation probabiliste de l'aléa de référence. En effet, il semble maintenant clair qu'une avalanche, du fait de sa rhéologie, peut exercer des pressions encore très fortes à proximité immédiate de l'arrêt [Naaim *et al.*, 2008 ; Sovilla *et al.*, 2008]. Dans le cas d'un écoulement majeur de type centennal, l'emprise à l'intérieur de laquelle la pression maximale est inférieure à 30 kPa (voire à 1 kPa...) est donc très réduite. En outre, bien sûr, une extension centennale peut correspondre à une multitude de champs de pression différents.

I.4. Les objectifs de cet article

Sortir de la situation actuelle, non satisfaisante à bien des égards, exige donc de repenser en profondeur les concepts sous-jacents au zonage des risques en montagne récurrents, de même que les pratiques s'y rapportant. Cet article ne propose toutefois pas un schéma complet et abouti. En effet, l'état actuel des connaissances scientifiques ne le permet sans doute pas (l'article détaillera par exemple pourquoi il reste difficile de trancher entre différents modèles d'aléa concurrents). En outre, ce n'est pas le rôle de la sphère scientifico-technique de se substituer à la puissance publique pour définir une doctrine normative. Plus modestement, cet article cherche à démontrer que les impératifs des uns et des autres ne sont pas si inconciliables qu'il n'y paraît, et, sans rentrer excessivement dans les détails techniques, à réintroduire la cartographie du risque et le découpage de l'espace en zones comme des questions trop longtemps délaissées au profit de la seule évaluation des aléas. Il devrait ainsi contribuer à dissiper l'illusion de la technicité selon laquelle, dans chaque cas pratique (caractéristiques spécifiques de chaque couloir / étude), il est possible de décrire dans le détail ce qui doit être fait, et, pour ce faire, les méthodes qui sont « bonnes » et celles « qui ne le sont pas ». Cet article cherche également, en ouvrant le débat, à susciter à terme un certain nombre de clarifications visant à renforcer la sécurité des habitants des zones de montagne mais aussi à faciliter la tâche des chargés d'étude en leur fournissant un référentiel clair, non pas du point de vue de l'ensemble de la procédure technique, mais des concepts essentiels sur lesquels s'appuyer.

Le point central du paradigme proposé est d'évoluer vers une approche du zonage plus explicitement centrée sur le risque individuel qui distingue clairement carte d'aléa, carte de risque et découpage de l'espace en zones sur la base de seuils d'acceptabilité. Pour ce faire, il sera montré que le concept de risque individuel, déjà en usage opérationnel, par exemple en Islande [Arnalds *et al.*, 2004], présente de

nombreux avantages. Il résout le problème posé par le caractère multivarié de l'aléa. De même, il permet une prise en compte de la quantité et de la qualité de l'information disponible dans le zonage, et ainsi de l'incertitude sur les niveaux d'aléa et/ou la vulnérabilité des enjeux, sans pour autant nécessiter une matrice de passage complexe et de grande dimension. Enfin, il s'exprime grâce à une métrique claire et intelligible, permettant l'affichage du risque, et donc une discussion franche sur l'acceptabilité du risque, que soit au niveau des seuils fixant les limites de zones comme en termes de risque résiduel après zonage. La procédure de zonage s'en trouve clarifiée, objectivée et elle gagne en traçabilité dans la mesure où l'ensemble des étapes est ainsi explicite. En outre, un dialogue plus concret autour de la carte de zonage devient possible. En d'autres mots, il devient envisageable de vérifier si ce que la société juge acceptable par le choix d'un seuil de risque matérialisant une limite de zone est réellement accepté par les intéressés qui y vivent (ou pas...).

Dans ce qui suit, un rapide tour d'horizon de l'état de l'art en matière de cartographie de l'aléa, de référence ou exceptionnel (pour lesquels une définition probabiliste via un quantile sera conservée) sera tout d'abord effectué. Il ne s'agit pas d'une revue exhaustive, ni même de recommandations de type « bonnes pratiques »⁷, mais d'introduire la suite de la démonstration. Ce faisant, le vocabulaire sera défini précisément et quelques outils utilisables seront proposés aux praticiens, de même que leurs avantages et limites, aussi bien théoriques qu'opérationnels. L'article abordera ensuite le calcul de risque puis le zonage via le risque individuel. Il sera montré qu'il est possible, en se fondant sur un formalisme tout à fait rigoureux, de mettre en œuvre des solutions techniques de complexité variées tout en s'adaptant aux spécificités des aléas considérés (brutalité et probabilité de destruction/mort élevée après impact). Ceci conduira, dans le cadre du schéma actuel à deux aléas (de référence et exceptionnel) et quatre zones (rouge, bleue, blanche et jaune), à des propositions de seuils concrètes pour les limites de zones, et, plus largement, à la formulation d'une approche du zonage simple mais cohérente et suffisamment flexible pour s'adapter à de nombreuses évolutions réglementaires plus ou moins contraignantes envisageables dans le futur.

II. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS : UN ÉTAT DES LIEUX RAPIDE

II.1. Carte d'aléa et modèle

Les trois acceptions suivantes du concept de cartographie de l'aléa sont couramment rencontrées, avec tous les « intermédiaires » : une cartographie des zones où l'occurrence d'un phénomène est possible, un cadastre spatialisé d'événements observés et la loi de probabilité multivariée (extension, champs de vitesse, de hauteur, de pression, volume de dépôt, etc.) des phénomènes en tout point de l'espace. En toute rigueur, seule cette dernière inclut le lien intensité-fréquence complet, donnant ainsi accès à des aléas correspondant à des quantiles, puis à l'évaluation quantitative du risque et donc au zonage. Néanmoins les deux autres (carte de susceptibilité et cadastre spatialisé) peuvent être des étapes intermédiaires dans le processus d'obtention du zonage. En outre, le cadastre spatialisé reste parfois, dans la

7. Ce travail a déjà été effectué en plusieurs occasions, par exemple dans le cadre du projet européen Irasmos dont les livrables peuvent être consultés sur <http://irasmos.slf.ch/>

pratique, support du zonage dans le cas où celui-ci s'appuie uniquement sur le plus fort événement observé. La cartographie de susceptibilité consiste en la détermination des zones de départ potentielles sur la base de critères géomorphologiques (altitude, pente, nature du terrain, lithologie, etc.). Elle est particulièrement utile lorsque l'information historique fait complètement défaut et/ou lorsque l'identification des zones de départ potentielles est peu évidente. Elle est utilisée pour l'ensemble des aléas gravitaires en montagne – laves torrentielles [Bertrand *et al.*, 2013], avalanches [Maggioli et Gruber, 2003], etc. –, mais tout particulièrement dans le domaine des glissements de terrain [Fell *et al.*, 2008 ; IUG, 1997]. Elle peut bien sûr être complétée par une modélisation permettant de préciser l'extension des phénomènes potentiels [Gruber et Bartelt, 2007]. Des critères climatiques (seuils de précipitation, par exemple [Berti *et al.*, 2012]) sont également parfois inclus afin de rendre la cartographie dynamique dans une optique d'anticipation des situations de crise. Le cadastre spatialisé d'événements observés localise de façon certaine des sites soumis à l'aléa, puisque, sur chaque site localisé, au moins un événement a pu être décrit. Lorsque des observations répétées ont été faites, il offre même une vision empirique de la relation intensité/fréquence, tout au moins sur une variable observable (distance atteinte, extension, etc.). Par exemple, pour le cas des avalanches [Bourova *et al.*, 2016], l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) est une chronique d'événements sur des sites choisis des Alpes et des Pyrénées, remontant par endroits à la fin du XIX^{ème} siècle [Mougin, 1922]. La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA), plus exhaustive spatialement (elle répertorie les emprises maximales sur la majorité des Alpes et des Pyrénées), est quelque peu hybride dans la mesure où elle résulte de la combinaison de témoignages, de résultats de photo-interprétations et d'analyses de terrain [Bonnefoy *et al.*, 2010]. C'est donc à la fois un cadastre incomplet (puisque les répétitions sur un même couloir ne sont pas affichées sur la carte) et une carte de susceptibilité « avérée » (*i.e.* il est admis que les marques paysagères identifiées par photo-interprétation ou analyse de terrain résultent bien du passage d'avalanches). Pour l'EPA comme la CLPA, le passage à la loi de probabilité multivariée des phénomènes sur chaque couloir, et donc aux aléas probabilisés, nécessite ensuite le recours à un modèle, et donc à des hypothèses de modélisation.

À ce titre, une petite confusion règne autour de la notion de « modèles », ces derniers étant souvent compris au sens de « codes numériques déterministes », ce qui est restrictif. D'autres types de modèles sont également susceptibles de fournir un résultat utile, par exemple une « simple » loi de probabilité. Même un raisonnement expert permettant la définition d'un aléa de référence peut être vu, s'il est répétable au moins approximativement, comme un modèle dont les hypothèses ne sont cependant, en général, pas complètement formalisées. Par la suite, ce cas de figure est exclu, sans pour autant en condamner la pratique. L'article se focalise, en effet, sur l'utilisation de modèles à la formalisation mathématique explicite⁸. Au cours des dernières décennies, toute une gamme d'approches de ce type a été développée afin d'évaluer l'aléa sur la base ou non d'informations locales, en fonction de la disponibilité de ces dernières et de choix réglementaires plus ou moins normatifs variables d'un pays à l'autre. Bien que de nombreux aspects centraux dans la mise en œuvre de ces approches fassent encore l'objet de

recherches (rhéologie des écoulements par exemple, etc.), elles constituent d'ores et déjà une boîte à outils performante permettant de parvenir à des résultats raisonnables dans la majeure partie des situations rencontrées en pratique, à condition de rester conscient des avantages et limites inhérents à chacune d'entre elles.

Les modèles dits statistiques, en fait probabilistes sont d'usage facile et rapide. Ils quantifient directement la probabilité associée à une distance d'arrêt (éventuellement à un angle de propagation), soit n'importe quel aléa de référence défini comme un quantile, valeur centennale en particulier [McClung et Lied, 1987]. Ils bénéficient en outre, de manière plus ou moins explicite, de justifications liées à la théorie statistique des valeurs extrêmes qui précise le comportement des queues de distribution [Coles, 2001]. En contrepartie, ils ne donnent aucune information sur les variables quantitatives caractérisant l'écoulement conditionnellement à l'atteinte : vitesse, pression, etc., et ils ne fournissent des résultats réalistes que sur les couloirs à la topographie « régulière ». Les codes numériques déterministes d'écoulement, quel que soit le type de modélisation choisie (continue ou discrète, 1D à 3D) ou le type de schéma numérique de résolution des équations de la mécanique (Eulérien, Lagrangien) permettent quant à eux de « regarder à la loupe » un aléa bien défini [Bartelt *et al.*, 1999 ; Naaim *et al.*, 2004]. Ils fournissent, par exemple, les pressions dans l'emprise d'un écoulement, ou une étude de sensibilité autour d'un événement observé du passé. Par contre, le code numérique en lui-même ne donne pas seul accès à la probabilisation de l'aléa (*i.e.* dire s'il est centennal, par exemple). Le raccourci classique pour surmonter cette difficulté est d'alimenter le code numérique avec une variable d'entrée probabilisée, par exemple la hauteur de neige, ce qui peut être vu comme une approche numérique-probabiliste « réduite ». Des hypothèses additionnelles fortes concernant les dépendances entre variables d'entrées du code et la monotonie de la transformation par le code numérique sont alors indispensables pour que la probabilité associée à l'extension de l'aléa modélisé puisse être déduite de la probabilité associée à la variable d'entrée considérée. Finalement, si l'on veut réellement obtenir des aléas probabilisés, l'approche la plus rigoureuse est celle des méthodes numérique-probabilistes « complètes » [Barbolini et Keylock, 2002 ; Meunier et Ancey, 2004 ; Eckert *et al.*, 2008 ; 2010a]. Par opposition à l'approche « réduite », l'ensemble des distributions de probabilité des variables d'entrée du code numérique (y compris leurs éventuelles dépendances) y est modélisée. Les distributions des variables d'intérêt (distance atteinte, champs de pression, etc.) sont alors reconstruites par simulations, ce qui permet d'évaluer la probabilité associée à n'importe quel quantile de leurs lois marginales ou de leur loi jointe.

II.2. Cartographier l'aléa en pratique

L'utilisation de données conjointement à un modèle caractérise l'apprentissage statistique. Le caractère au moins partiellement empirique de l'ensemble des modèles disponibles, même les codes numériques, rend cette étape vivement conseillée, lorsqu'elle est possible, pour l'obtention de résultats crédibles. Sur un couloir bien documenté (pour fixer les idées, avec connaissance de 5 à 10 événements sur une période de 20-30 ans minimum), l'ensemble des modèles disponibles – numériques, probabilistes et numérique-probabilistes – peut être utilisé pour évaluer précisément, après apprentissage statistique, la relation intensité-fréquence, voire l'incertitude associée (cf. II.3), et ce, pour

8. Les différentes classes de modèles évoquées dans cet article sont introduites en Annexe.

l'ensemble des variables du modèle utilisé (extension ou distance d'arrêt, et, le cas échéant, champs de vitesse, hauteur, pression, etc.). Face à l'impossibilité de définir un quantile unique pour un aléa multivarié (cf. III.1), il est possible d'échafauder un « rafistolage » vers la notion de quantile univarié, d'un point de vue théorique [Salvadori *et al.*, 2013] ou pratique [Naaim *et al.*, 2010]. Le plus simple reste néanmoins d'évaluer la distance d'arrêt ou l'extension correspondant à la période de retour choisie, puis de considérer la distribution jointe des autres variables conditionnellement à son dépassement et de la caractériser plus ou moins finement en fonction des enjeux locaux. Sur un site à faibles enjeux, un modèle *Peak Over Threshold* (POT, cf. Annexe) bien calé localement sur les observations, puis, éventuellement, l'étude de quelques aléas via un modèle numérique pour avalanches denses de type centre de masse est sans doute suffisant. Au contraire, pour un site à forts enjeux, le recours à une approche numérique-probabiliste complète, incluant un modèle numérique d'écoulement moyenné sur l'épaisseur (cf. Annexe), complété par des simulations prenant en compte les étalements transverses et la formation éventuelle d'un aérosol est à préconiser. Idéalement, l'ensemble est associé à une analyse de sensibilité approfondie.

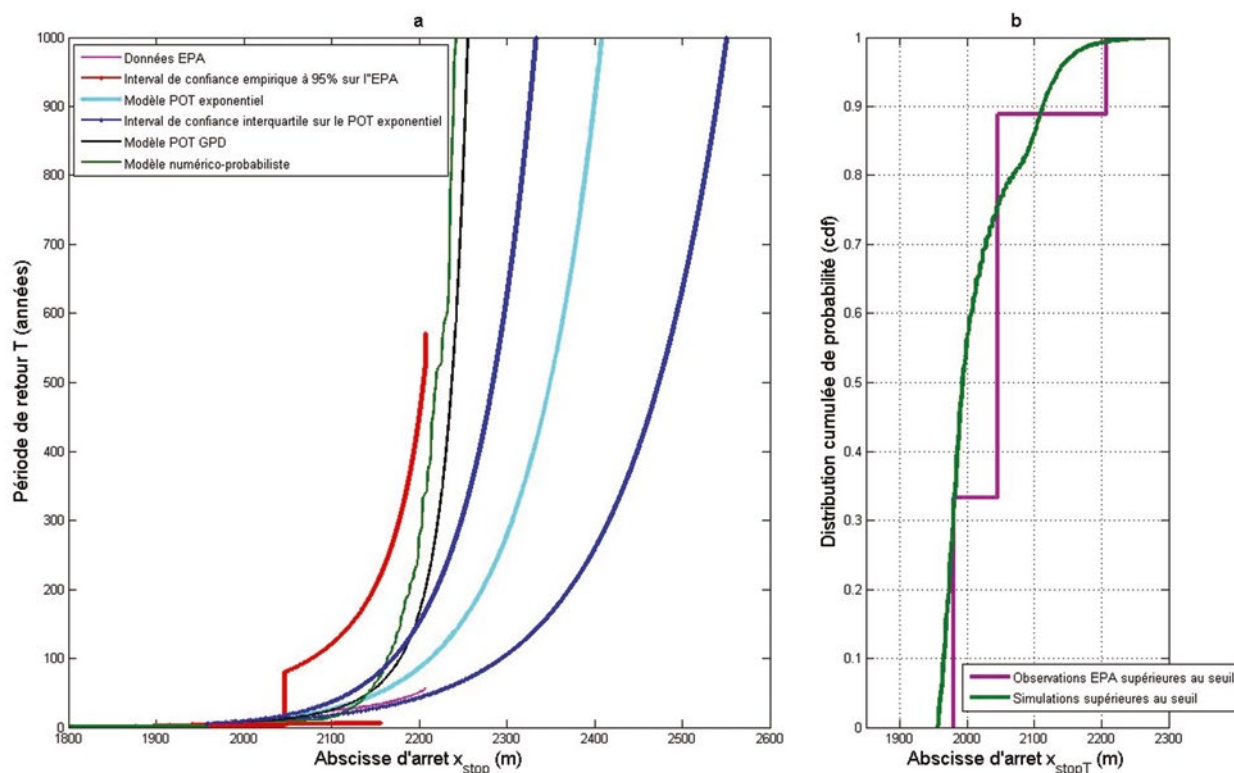
En guise d'illustration, prenons l'exemple du couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans (Savoie) pour lequel 28 avalanches dépassant le seuil d'observation⁹ ont été enregistrées sur la période 1973-2003. Il s'agit donc d'un cas favorable mais loin d'être exceptionnel dans le contexte

9. Ce dernier marque grossièrement le début de la zone d'arrêt. Il est choisi sur chaque couloir EPA pour être aisément identifiable visuellement (chemin forestier par exemple). Le protocole EPA prévoit l'enregistrement de toutes les avalanches qui le dépassent.

français. La zone d'arrêt est pour l'instant non urbanisée, mais, étant située à proximité du village, elle pourrait, à l'avenir, faire l'objet de projets de construction. La figure 4 confronte les distances d'arrêt de l'EPA à la cartographie de l'aléa¹⁰ résultant de l'utilisation des différents modèles précédemment introduits. La taille de l'échantillon permet une estimation empirique de la relation entre distance d'arrêt et période de retour jusqu'à une période de retour d'environ 30 ans (Tableau 1). L'intervalle de confiance empirique devient alors très large (Figure 4a). Différents modèles de distance d'arrêt permettent d'extrapoler au-delà. Ils se situent tous à l'intérieur de l'intervalle de confiance empirique à 95% de l'EPA, et sont donc « admissibles » sur la base de ce critère peu restrictif. Dans le détail, le modèle numérique-probabiliste complet s'appuyant sur un code déterministe d'écoulement de type Saint-Venant s'ajuste très bien sur la distribution cumulée des distances d'arrêt de l'EPA (Figure 4b). Le modèle POT-GPD (loi de Pareto généralisée pour les distances d'arrêt dépassant le seuil d'observation, cf. Annexe) propose une estimation des périodes de retour élevées très proche du modèle numérique-probabiliste, traduisant un comportement borné (type Weibull), avec une distance d'arrêt maximale de 2337m¹¹. Le modèle POT-exponentiel (loi exponentielle pour les distances d'arrêt dépassant le seuil d'observation, cf. Annexe) propose une estimation des niveaux de retour plus « pessimiste », et, qui plus est, non bornée (Tableau 2).

10. Pour des raisons de simplicité, les représentations cartographiques proposées par cet article (aléa et risque) apparaissent en deux dimensions, selon le profil longitudinal du couloir d'avalanche. Ainsi, une limite de zone se réduit à un scalaire : l'abscisse de la position correspondante le long du profil.

11. Cette borne se calcule explicitement très simplement à partir des estimateurs des paramètres d'échelle et de forme de la distribution.



Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie : a) lien univoque entre distance d'arrêt et période de retour, confrontation de l'estimation empirique fournie par l'EPA avec différents modèles introduits en Annexe ; b) fonction de répartition des distances d'arrêt supérieures au seuil d'observation EPA, données versus modèle numérique-probabiliste [Eckert *et al.*, 2010a].

Figure 4 : Cartographie probabilisée des distances d'arrêt.

Tableau 1 : Estimation de la distance d'arrêt correspondant à différentes périodes de retour T.

Distance d'arrêt (m)	T = 5 ans	T = 10 ans	T = 30 ans	T = 100 ans	T = 300 ans	T = 1000 ans
EPA	2041	2046	2138	/	/	/
POT-exponentiel	1958	2017	2112	2215	2309	2412
POT-expo. borne inf.	1958	2007	2085	2171	2249	2335
POT-expo. borne sup.	1958	2037	2162	2300	2425	2562
POT-GPD	1958	2027	2112	2178	2221	2255
Numérico-probabiliste	2004	2064	2125	2164	2204	2242

Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans. Confrontation de l'estimation empirique fournie par l'EPA avec différents modèles introduits en Annexe ; les bornes inférieure et supérieure évaluées pour le modèle POT-exponentiel correspondent à l'application de l'intervalle de confiance interquartile (estimation du paramètre d'échelle du modèle par maximum de vraisemblance).

Tableau 2 : Distribution de probabilité des pressions d'impact Pr pour différentes positions dans le couloir.

Pr (kPa)	Distribution conditionnelle à l'atteinte					Probabilité annuelle
	Moyenne	Ecart type	2,50 %	97,50 %	P(Pr > 30)	P(Pr > 30)
T = 10 ans	32,6	21,8	2,5	81,2	0,51	0,051
T = 30 ans	19,5	18,7	1	68,6	0,22	0,007
T = 100 ans	19,1	18,3	1,2	68,6	0,23	0,0023
T = 300 ans	31,4	26,4	0,9	79,4	0,46	0,0015

Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie : résumé statistique de la distribution conditionnelle au dépassement des positions correspondant à des périodes de retour de 10, 30, 100 et 300 ans, et probabilité annuelle P (inconditionnelle) de dépasser la valeur critique de 30 kPa. Modèle numérico-probabiliste d'après Eckert et al. [2010a]. Lien entre pression et dynamique de l'écoulement d'après Sovilla et al. [2008].

Malgré les efforts continus de collecte et d'archivage de l'information dans des dispositifs dont il est plus que jamais nécessaire de rappeler l'utilité et la nécessité de pérennité sur le long terme¹², le cas de figure du site où l'information locale est insuffisante (voire éventuellement totalement absente) pour permettre un apprentissage efficace reste courant. Comme, en pratique, il faut bien « faire quelque chose », deux options sont possibles : utiliser un « modèle sans données » ou interpoler l'information disponible dans l'esprit des méthodes de régionalisation utilisées en hydrologie pour la prédétermination sur les bassins versants non jaugés. Il convient toutefois de noter qu'utiliser un modèle sans données revient en fait à l'utiliser en mode prédictif conditionnellement à des relations empiriques apprises sur d'autres couloirs (explicitement – procédure statistique –, ou, plus implicitement – utilisation experte de modèle). Cette précision justifie le regroupement, dans la littérature, sous le vocable de méthodes « de transfert » [Sigurdsson et al., 1998], des approches sans données avec les méthodes d'interpolation.

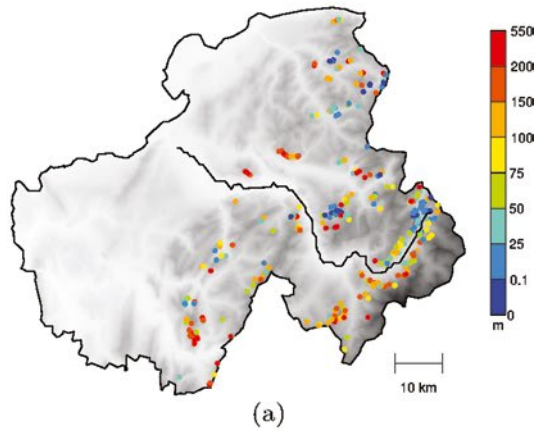
Du côté des méthodes utilisables sans données locales, la littérature propose des modèles probabilistes résultant de calages régionaux dans différentes chaînes de montagne [McClung et al., 1989 ; McClung, 2001]. De même, l'approche Suisse de la directive VSG [Salm et al., 1991], très utilisée, consiste à alimenter un modèle numérique d'écoulement avec des paramètres de frottement fixés par l'utilisateur. Pour pallier à la méconnaissance, au niveau de la physique élémentaire, de la loi de comportement de la neige, un lien supposé établi une fois pour toutes entre paramètres de frottement et caractéristiques du couloir (altitude, dénivelé

total, etc.) y est postulé¹³. Du côté des méthodes d'interpolation, à l'échelle française, des résultats spatialisés utilisant l'ensemble de l'information de l'EPA existent déjà pour deux grandeurs : les décomptes d'avalanches [Eckert et al., 2007b ; Lavigne et al., 2012] et les altitudes d'arrêt. Leur combinaison permet d'obtenir des niveaux de retour spatialisés [Lavigne et al., soumis] sur l'ensemble des couloirs EPA (Figure 5), puis, par kriegeage, en n'importe quel point de l'espace [Lavigne et al., 2017]. Encore non transposée à la pratique, cette approche (en fait un modèle probabiliste calé sur l'ensemble de l'information régionale) devrait déboucher d'ici quelques années sur une cartographie systématisée de l'aléa sur l'ensemble des Alpes et des Pyrénées françaises. Cette dernière restera à adapter / compléter ensuite, couloir par couloir, par d'éventuelles analyses plus approfondies (simulations numériques notamment) selon les contraintes locales (topographie plus ou moins complexe, enjeux plus ou moins importants). À plus long terme encore, le développement d'une approche similaire incluant la dynamique de la propagation sur chaque couloir constitue une piste prometteuse. De façon « intermédiaire » quelques résultats peuvent d'ores et déjà être utilisés pour la mise en œuvre d'une approche « pseudo-locale » : une cartographie spatialisée sur l'ensemble des Alpes Françaises des chutes de neige extrêmes et des hauteurs de déclenchement correspondantes [Gaume et al., 2012 ; 2013], et une évaluation à l'échelle de la haute vallée de l'Arve de la distribution des paramètres de frottement d'un modèle numérique de type Saint-Venant et de leurs liens avec les propriétés physiques du manteau neigeux [Naaïm et al., 2013]. Ces résultats peuvent être pris comme des entrées pour un code numérique, de façon à se

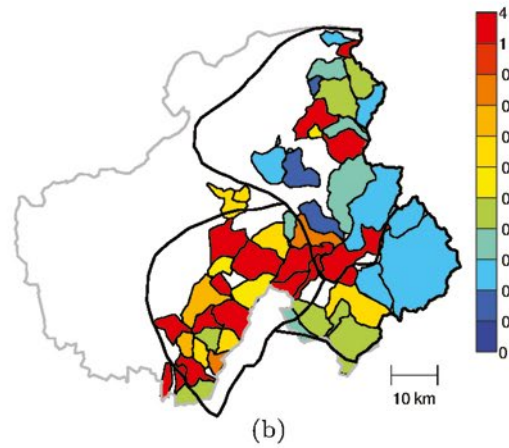
12. Voir par exemple : <http://www.avalanches.fr/pourquoi-maintenir-l-epa-dans-la-duree/>

13. Bien sûr, on utilise alors les caractéristiques locales du manteau neigeux autant que possible. L'aspect « sans données locales » se rapporte donc ici aux paramètres de frottement uniquement.

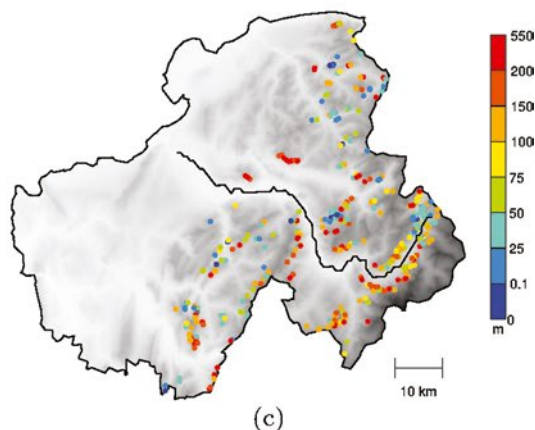
Alt. d'arrêt décennale – Alt. de la vallée



Fréquence d'occurrence relative



Alt. d'arrêt moyenne – Alt. de la vallée



Données EPA sur l'ensemble de la Haute Savoie et modèle statistique d'après Lavigne et al. [2015 ; 2017 ; soumis] : a) altitude d'arrêt décennale par couloir relative à l'altitude du « fond de vallée » ; b) fréquence d'occurrence relative par commune sur une période de 10 ans (i.e. inverse du nombre moyen d'avalanche par couloir sur 10 ans : plus elle est faible, plus les couloirs de la commune sont, en moyenne, actifs) ; c) altitude d'arrêt moyenne par couloir relative à l'altitude du « fond de vallée ».

Figure 5 : Cartographie probabilisée spatialisée de l'aléa.

ramener, sur le site d'intérêt, au cas « bien documenté » examiné précédemment. La limite (importante) est que l'« erreur de transfert » (i.e. dans quelle mesure le couloir étudié correspond réellement à l'échantillon d'apprentissage) reste difficile à quantifier.

II.3. La question de l'incertitude

Parmi les questions cristallisant les difficultés et les incompréhensions autour du zonage figure celle de l'incertitude, que ce soit du point de vue de sa quantification, de sa prise en compte (ou non) dans le zonage, de son affichage (ou non), ou encore des niveaux de responsabilité des uns et des autres suite à son affichage ou à son non-affichage. Le panorama « optimiste » des méthodes de cartographie de l'aléa qui a été effectué ne doit effectivement pas faire oublier la prudence qui doit rester de mise vis-à-vis de l'évaluation d'aléas correspondant à de « petites » probabilités (par nature un problème difficile), et ce pour un phénomène qui, reste, par bien des aspects, mal connu. Ainsi, en pratique, les incertitudes sur les scénarii dimensionnant retenus (extension, intensité, et probabilités associées) sont nécessairement (très) importantes. Cet état de fait est connu de l'ensemble des acteurs concernés. Pourtant, au niveau de la doctrine, un vrai paradoxe existe. En effet, les recommandations techniques pour l'établissement des PPRN exigent, avec raison, rigueur et soin pour le recueil d'information (recueil des témoignages, analyse des sites, etc.). Par contre, outre la latitude laissée pour l'obtention des aléas dimensionnant, le niveau de confiance qui leur est accordé n'intervient pas explicitement dans le zonage. C'est particulièrement visible dans la matrice de passage (Figure 3) où, à aucun moment, la quantité et la qualité de l'information n'interviennent dans la détermination des niveaux de risque, et donc des zones. Cette absence constitue une réelle rupture de la transparence et de la traçabilité de la procédure PPRN.

L'un des arguments qui revient le plus souvent pour expliquer cette absence de prise en compte explicite des incertitudes dans le zonage est qu'il s'agirait d'une tâche impossible. Des méthodes quantitatives (analyse de sensibilité et d'incertitude, propagation de l'erreur d'estimation, etc.) existent pourtant. À titre d'exemple, la figure 4 montre de quelle manière la prise en compte de l'incertitude résultant de la taille limitée de l'échantillon à disposition se répercute sur l'estimation de la relation distance d'arrêt – période de retour pour le cas d'étude. L'intervalle de confiance interquartile (25-75%) sur le paramètre d'échelle du modèle POT-exponentiel conduit à une incertitude de l'ordre de 120 m sur la distance d'arrêt centennale (Tableau 1). À noter qu'il ne s'agit ici que d'un seul type d'incertitude (quantité limitée de données à disposition) et dont la prise en compte est simple¹⁴. Certes, de telles méthodes de quantification de l'incertitude restent peu employables/employées en ingénierie pour des raisons de temps de calcul comme de complexité mathématique de mise en œuvre. En outre, elles ne permettent la manipulation que de certains types d'incertitude, et ne rendent ainsi pas parfaitement compte de toutes les situations susceptibles d'être rencontrées en contexte opérationnel (incertitude trop

14. En effet, comme la loi de probabilité exponentielle a un seul paramètre, l'incertitude prédictive se déduit directement des valeurs minimales et maximales du paramètre d'échelle correspondant au niveau de confiance choisi. Dans le cas d'un modèle plus complexe, avec plusieurs paramètres généralement liés et/ou pour combiner différents types d'incertitudes, une approche plus élaborée doit être conduite : propagation d'incertitude de type « delta », calcul de lois prédictives bayésiennes, etc.

difficilement probabilisable par exemple). De ce fait, les impératifs de traçabilité des étapes et, plus globalement, de transparence de l'ensemble de la procédure de zonage ne peuvent sans doute pas, à l'heure actuelle, être toujours pleinement satisfaits. Il ne s'agit néanmoins pas d'une raison suffisante pour occulter l'incertitude dans la procédure PPR, et, en particulier, laisser penser que l'aléa de référence peut être parfaitement prédéterminé. La dualité entre incertitude et risque, sur laquelle la section III reviendra, peut ainsi être mise à profit pour faire évoluer la doctrine vers la prise en compte de l'incertitude dans le zonage.

II.4. D'autres limites à garder en mémoire

II.4.1. (Non) stationnarité de l'activité avalancheuse

L'ensemble des méthodes permettant la cartographie des aléas, et, plus largement, l'ensemble des concepts et approches sous-jacents au zonage font - presque toujours implicitement - l'hypothèse de la stationnarité du phénomène, en considérant par exemple une chronique d'événements passés indépendamment de leurs dates d'occurrence¹⁵. Pour les phénomènes directement impactés par le changement climatique, et, en particulier, son trait le plus incontestable, le réchauffement, cela est tout à fait discutable aux échelles de temps pertinentes pour le zonage (quelques dizaines à quelques centaines d'années). Ainsi l'activité avalancheuse (nombre, altitudes atteintes et typologie des écoulements), directement contrôlée par les caractéristiques du manteau neigeux, a déjà subi des modifications importantes au cours des dernières décennies dans les Alpes françaises [Eckert *et al.*, 2010b ; 2010c ; Naaim *et al.*, 2016] du fait d'évolutions climatiques régionales [Castebrunet *et al.*, 2012 ; Lavigne *et al.*, 2015]. Ces changements sont sans doute amenés à se poursuivre au cours des prochaines décennies [Castebrunet *et al.*, 2014]. La construction d'ouvrages paravalanches et/ou l'évolution de l'occupation des sols qui perturbent la régularité du fonctionnement naturel sont d'autres sources de non-stationnarité dont il convient de tenir compte lors de l'analyse des séries historiques. D'un point de vue théorique, la période de retour ne peut plus, en toute rigueur, être interprétée comme un intervalle de récurrence moyen pour une série non stationnaire [Cooley, 2013 ; Salas et Obeysekera, 2014 ; Read et Vogel, 2015]. De façon plus pratique, même si le calcul de « niveaux de retour non stationnaires » est possible [par ex. Eckert *et al.*, 2013], ces derniers sont difficiles à interpréter et, plus encore, à utiliser. Ainsi, la prise en compte de la non-stationnarité de l'activité avalancheuse dans les méthodes de zonage reste un verrou autour duquel la réflexion doit rester ouverte.

II.4.2. Méthodes numériques et statistique des extrêmes

La dichotomie modèles statistique / modèle numérique n'est résolue qu'en apparence par les méthodes numérique-probabilistes. En effet, ces dernières conjuguent bien les avantages pratiques des deux autres classes de modèles en permettant à la fois la probabilisation des aléas et la modélisation dynamique de l'écoulement spécifique à chaque site. Néanmoins, leur positionnement par rapport au cadre théorique classique de l'étude des valeurs extrêmes reste un

15. La référence au milieu du XIX^{ème} siècle pour la détermination des scénarii de référence dans MEDDE [2015] constitue une première étape vers la contextualisation climatique des événements passés. Néanmoins, pour les événements postérieurs, la doctrine officielle reste celle de leur échangeabilité (i.e. leurs occurrences successives sont considérées comme indépendantes du temps).

problème largement ouvert. Ainsi, leurs fondements méthodologiques mériteraient d'être davantage creusés, de façon à accroître la confiance à accorder aux résultats en extrapolation au-delà des plus fortes observations. Le problème se pose pour les lois marginales (forme, universelle ou non, en fonction des caractéristiques du couloir) ainsi que pour les lois jointes (dépendance ou indépendance asymptotique). De même, des cadres alternatifs, théorie des records [Benestad, 2009] ou des valeurs aberrantes [Sornette, 2009], mériteraient sans doute d'être mis à profit pour tâcher de mieux comprendre dans quelles conditions les avalanches les plus rares sont susceptibles de survenir [Schweizer *et al.*, 2009 ; Ancey, 2012].

II.4.3. Hiérarchiser les méthodes, c'est impossible actuellement

Face à la multiplicité des méthodes existantes pour la caractérisation des aléas de référence, l'établissement d'une hiérarchisation, voire de critères de recevabilité, constitue une demande pressante des acteurs institutionnels autant qu'opérationnels en charge du zonage. Cependant, outre le fait que ces méthodes, aussi « parfaites » soient-elles, sont insuffisantes pour résoudre complètement le problème du zonage (cf. Sect. III), de tels critères sont pour l'instant impossibles à formuler sur des bases uniquement scientifico-techniques. Une légitimité institutionnelle pourrait compenser ce manque de connaissance en imposant une approche normative de type méthode suisse Voellmy-Salm-Gubler (VSG, [Salm *et al.*, 1990])¹⁶, voire législation Islandaise [Arnalds *et al.*, 2004]¹⁷. Il ne semble toutefois pas qu'une telle approche (la prise de responsabilité par le législateur du choix méthodologique) soit à l'ordre du jour en France.

Au niveau des aspects scientifiques et techniques, il convient de préciser que la question de critères de recevabilité renvoie en fait à celle de la validation des prédictions des aléas de référence fournis par les différentes approches. Historiquement, quelques études ont tenté d'inter-comparer des codes numériques, voire des codes numériques avec des modèles probabilistes [Barbolini *et al.*, 1998]. Néanmoins, comme les prédictions numériques sont rarement probabilisées, la comparaison est difficile. En outre, les données locales sont en général trop peu nombreuses pour valider (ou infirmer) les prédictions des modèles correspondant à des événements rares. En règle générale, il est donc impossible de conclure. Tout au plus peut-on dire, sur des cas d'étude, quelles sont les approches qui fournissent des résultats similaires. Cela donne *a minima* un argument de robustesse du résultat, tout en sachant qu'en science ce n'est pas forcément la majorité qui a raison ! Lorsque l'on a la chance de travailler avec une série locale assez bien fournie, des critères statistiques peuvent, néanmoins, justifier la préférence d'une approche par rapport à une autre. Ainsi pour le cas d'étude traité, un test de vraisemblance privilégie une queue de distribution des distances d'arrêt de type Weibull par rapport au type exponentiel, traduisant effectivement un comportement

16. Bien que la législation suisse laisse une certaine liberté en termes de choix méthodologique, lorsque la simulation numérique est utilisée, l'application du jeu de paramètres VSG (paramètres de frottement tabulés en fonction des caractéristiques du couloir et de la période de retour du scénario dimensionnant considérées) est vivement conseillée. Sa non-application peut être reprochée au chargé d'étude, y compris par un juge, en cas de sinistre.

17. En Islande, la législation impose non seulement que le zonage avalanche soit effectué sur la base du risque individuel, comme préconisé dans cet article, mais elle va jusqu'à spécifier le modèle (un modèle de dynamique combiné à un modèle probabiliste de distances d'arrêt calé régionalement) devant conduire à la cartographie de l'aléa puis du risque.

borné. Plus empiriquement encore, l'ajustement graphique des modèle POT-GPD et numérique-probabiliste sur les observations de l'EPA semble effectivement meilleur que celui du modèle POT-exponentiel (Figure 4a). Il ne s'agit toutefois pas d'une validation croisée puisque la comparaison est faite par rapport à l'échantillon d'apprentissage (la série d'observation, bien qu'intéressante, est trop courte pour permettre le découpage en sous échantillons de calage et validation). De plus, il ne s'agit que d'un seul exemple, ce qui ne permet en aucun cas de généraliser. Notons toutefois que de rares études ont effectué un travail de calage-validation sur des échantillons indépendants de données de différente nature [Schlappy *et al.* 2014], et que d'autres ont mis en évidence un caractère relativement générique des comportements bornés des queues de distribution des distances d'arrêt [Keylock *et al.*, 2005], mais que ces résultats restent, là aussi, largement à généraliser.

Ainsi, avoir une idée claire de l'efficacité respective des différentes approches de cartographie des avalanches de référence nécessiterait de larges jeux de données homogénéisées et leur utilisation pour la mise en œuvre de techniques d'inter-comparaison systématique en validation croisée. Un tel travail a été effectué, par exemple, pour les pluies et débits extrêmes conduisant à des recommandations précises et argumentées en matière de choix méthodologiques [Lang *et al.*, 2014]. Un travail similaire dans le domaine des avalanches, serait *a priori* possible sur la base de l'EPA. Il nécessiterait toutefois, avant toute inter-comparaison, la sélection et le « nettoyage » des séries les plus longues. Et même cela effectué, il n'est pas certain que des résultats aussi conclusifs que pour les pluies et les débits pourraient être atteints. En effet, l'information disponible est tout de même moins riche et le cadre théorique (statistique des valeurs extrêmes en particulier) moins immédiatement applicable qu'en hydrologie « classique »¹⁸. De façon plus pratique, il apparaît également que la caractérisation experte des aléas dimensionnant, encore très utilisée, est, par nature, peu formalisée, de sorte qu'elle est difficile à prendre en compte dans une procédure d'inter-comparaison de méthodes. Il en va de même des méthodes non publiées dans des revues scientifiques mais développées et utilisées par des structures techniques privées possédant une expertise avérée. Ainsi, il n'est même pas certain qu'une procédure d'inter-comparaison de méthodes puisse avoir à brève échéance un grand impact sur la pratique. Finalement, en l'état actuel des connaissances, il semble impossible de se prononcer sur des critères simples de recevabilité des approches d'évaluation des aléas de référence. Le débat concernant la possible homogénéisation des approches, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de codes numériques, a déjà suscité des controverses passionnées [ONF-RTM et Irstea, 2013 ; Ancy, 2013]. Il risque donc de se poursuivre, et, en tout état de cause, la clairvoyance du chargé d'étude restera longtemps indispensable pour choisir parmi l'arsenal disponible, la méthode la plus adaptée au cas par cas. Pour l'aider, cet article propose en IV.2, et en annexe, quelques conseils pratiques.

18. Caractère non indépendant et identiquement distribué des observations du fait de la non-stationnarité avérée de l'activité avalancheuse, difficulté de la définition d'un échantillon de maximas par blocs ou de dépassements de seuils avec des séries lacunaires, etc.

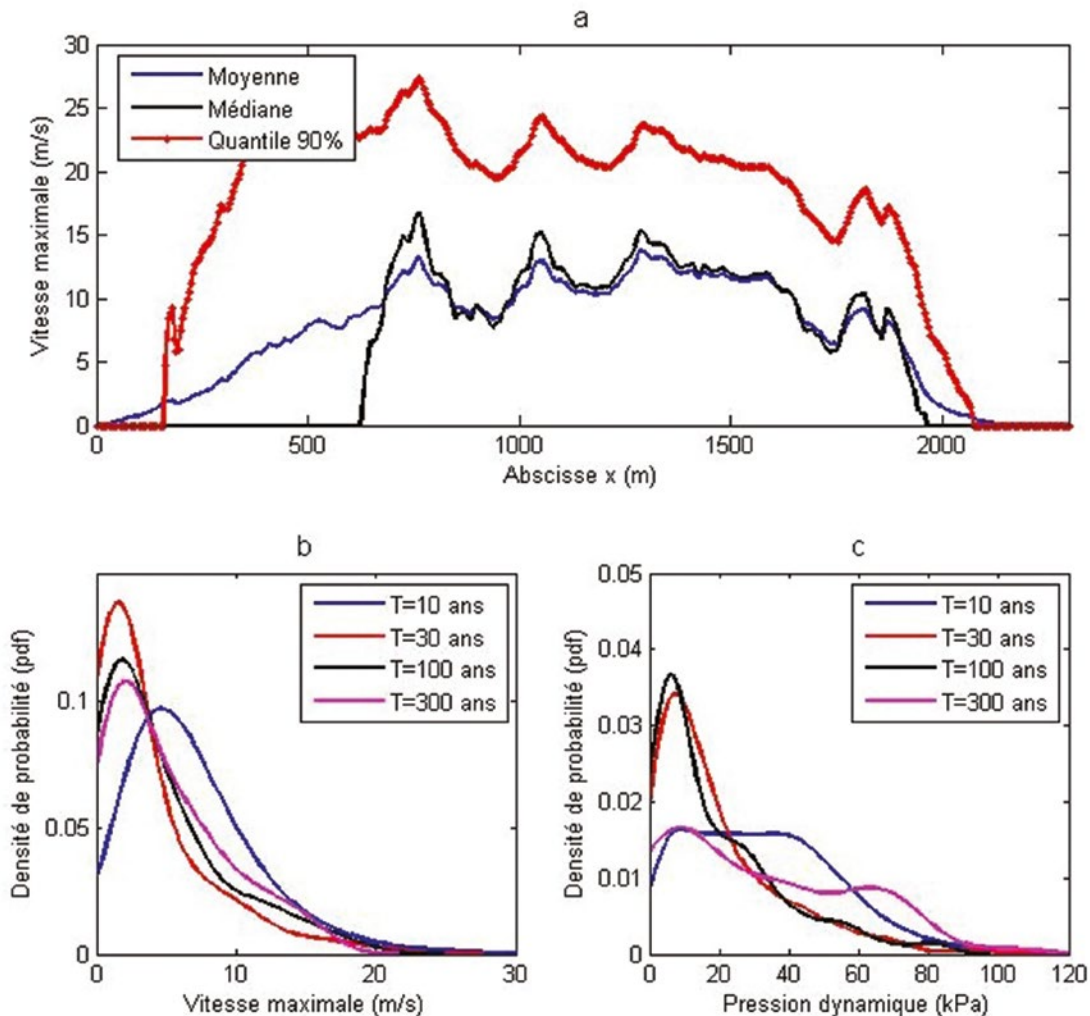
III. DE L'ALÉA AU RISQUE ET DU RISQUE AU ZONAGE RÉGLEMENTAIRE

III.1. Passer directement de l'aléa au zonage est théoriquement impossible

On considère à présent que la loi de probabilité multivariée complète d'un phénomène potentiellement dommageable a pu être obtenue en tout point de l'espace d'un site à risque. En particulier, on suppose que les niveaux de retour requis par la réglementation ont pu en être dérivés (étape 1 du zonage). L'objectif est à présent, en premier lieu, de montrer que, même si cette tâche difficile a pu être menée à bien, le zonage est encore loin d'être obtenu, du fait du caractère multivarié et imparfaitement connu de l'aléa et de la non-réductibilité du zonage à une procédure technique.

Pour le cas des chutes de blocs, Jaboyédoff *et al.* [2005] détaillent de quelle manière l'analyse trajectographique (à bien des égards, une approche numérique-probabiliste « sans données ») permet d'obtenir, en chaque position de la zone d'arrêt, une distribution complète des énergies d'impact. Pour passer ensuite au zonage sur la base d'aléas probabilisés, il est proposé de recourir à la notion de « profil de propagation », *i.e.* le niveau d'énergie non excédé en chaque abscisse par 90% des simulations de la campagne trajectographique. Néanmoins, un petit « bricolage » est requis si l'on veut imposer que le profil de propagation soit décroissant avec la position, ce qui n'est pas forcément le cas avec une topographie non régulière. Si, en plus, il est nécessaire de tenir compte de plusieurs zones de détachement potentielles des blocs, de passer d'une vision bidimensionnelle à une vision tridimensionnelle, et/ou de s'affranchir de l'hypothèse d'une information parfaite (*i.e.* prendre en compte dans le zonage les notions de quantité et de qualité d'information voire d'incertitude de modèle ayant conduit aux résultats considérés), le passage univoque au zonage devient un casse-tête quasiment impossible à résoudre. En effet, la « matrice de passage » des aléas aux zones est alors nécessairement de très grande dimension, et des guides techniques extrêmement longs sont nécessaires pour en expliciter tous les éléments. En France, c'est ce que contient la note MEZAP [Groupe de travail MEZAP du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2014] dont l'objectif est, *in fine*, de proposer une méthode de cartographie de l'aléa qui soit standardisée, et donc reproductible et indépendante de l'analyste. Outre le fait que les capacités de ce dernier (expérience, expertise) sont assez peu valorisées, et que la nécessaire réflexion sur le risque résiduel après zonage est « oubliée » (cf. III.6), il est clair que l'ensemble des recommandations définissant les éléments de la matrice, soit la règle de zonage, ne peut être justifié d'un strict point de vue scientifique.

Ces constats peuvent facilement se transposer au cas des avalanches. La figure 6 illustre la loi multivariée fournie par une approche numérique-probabiliste complète sur notre cas d'étude. Il apparaît que, jusque très bas dans le couloir, les quantiles de la distribution des vitesses évoluent de manière non-monotone avec l'abscisse (Figure 6a). Les distributions de vitesse et de pression conditionnelles au dépassement de différentes distances d'arrêt, en particulier de la valeur centennale, montrent, quant à elles, la variabilité, en fonction de la topographie locale, des pressions d'impact pouvant être considérées pour la délimitation des zones rouges et bleues (Figure 6 b-c). L'impossibilité de déterminer de façon déterministe une position à partir de laquelle un seuil de 30 kPa (voire de 1kPa) n'est plus dépassé est donc patente.



Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie : a) résumé statistique de la distribution du profil longitudinal de vitesse ; b) et c) distribution des vitesses et des pressions d'impact aux positions du couloir correspondant à des périodes de retour de 10, 30, 100 et 300 ans conditionnellement à leur dépassement. Modèle numérique-probabiliste d'après Eckert et al. [2010a]. Lien entre pression et dynamique de l'écoulement d'après Sovilla et al. [2008] indiquant que le coefficient de traînée est une fonction puissance du nombre de Froude.

Figure 6 : Exemple d'évaluation spatialisée de la loi de probabilité multivariée des avalanches sur un couloir des Alpes françaises.

En outre, les statistiques résumant les distributions des pressions d'impact évaluées en tenant compte de la dynamique de l'écoulement montrent bien que la moyenne de la distribution conditionnelle de la pression d'impact reste élevée quelle que soit la période de retour, et que cette moyenne n'est même pas décroissante avec la période de retour, conformément à l'allure des profils longitudinaux de vitesse. La décroissance de la probabilité de dépassement de la valeur 30 kPa avec la période de retour (inconditionnellement à l'atteinte, *i.e.* tenant compte du fait que plus la période de retour augmente, plus la probabilité d'atteinte est faible) est donc très lente (Tableau 2). Ceci confirme, en plus de la difficulté de la définition théorique de la zone bleue, le peu d'intérêt pratique de cette dernière, nécessairement très étroite sur la base d'un critère d'intensité. Ces éléments, auxquels se conjuguent l'état de l'art des méthodes de cartographie de l'aléa qui a été brossé et la connaissance locale nécessairement limitée en quantité comme en qualité, établissent l'impossibilité de définir une règle de zonage univoque à partir uniquement de la cartographie de l'aléa.

La non-réductibilité du zonage à une procédure technique découle en partie de cette complexité mais également, plus généralement, de la composante sociétale inhérente au

zonage. Labiouse et Abbruzzese [2013] parviennent ainsi à la conclusion qu'il est très difficile de comparer des procédures de zonage du risque rocheux en usage dans différents pays car, si les choix techniques peuvent l'être (méthodes de calcul, etc.), le zonage retenu dépend également de compromis sociétaux différents, propres à chaque pays. Notons au passage que, même si, dans le domaine des chutes de blocs, la réflexion sur le zonage est clairement plus avancée que dans celui des avalanches, la pratique n'y va tout de même pas au bout de la logique de la séparation entre critères scientifico-techniques et critères sociétaux. Outre MEZAP, la littérature propose en effet le concept assez impropre de « zonage de propagation » [Dimnet, 2015]. Un « guide pratique versants rocheux » institutionnel [MEDDE, 2015b] est également récemment paru. La vision selon laquelle une procédure technique complète basée sur une évaluation très fine de l'aléa règlera le problème reste donc encore prégnante là aussi. Cela ne constitue d'ailleurs pas une spécificité française. Abbruzzese *et al.* [2009] expliquent, en effet, que le concept de danger, central dans la législation suisse, n'est qu'un « pseudo risque » découlant directement de l'aléa, l'analyse de risque « complète » n'étant en réalité menée que très rarement.

III.2. Et même si passer de l'aléa au zonage était possible, ce ne serait pas satisfaisant

La problématique du zonage des risques récurrents est, *in fine*, la suivante : la détermination de la position des limites en deçà desquelles le risque individuel sans zonage est inacceptable, et le risque individuel résiduel après zonage (et application des prescriptions telles les renforcements que ce dernier induit) devient acceptable¹⁹. Il est très difficile de savoir si cette condition est remplie avec un zonage sur la base de seuil d'aléas. En effet, les petites probabilités sont, par essence, difficiles à appréhender, et des niveaux relatifs d'aléa encore davantage. Est-ce qu'un aléa fort est acceptable ? Certainement que non. Mais un aléa faible ? Peut-être. Et un aléa moyen ?

Plus grave encore, si une référence centennale peut sembler, de prime abord, sécuritaire, considérer le risque individuel induit par un phénomène destructeur et soudain change drastiquement la donne. En effet, les données disponibles dans la littérature suite aux retours d'expérience post-catastrophe rendent compte, grossièrement, de la probabilité moyenne de mort pour un individu dans une habitation impactée par une avalanche²⁰, notée \bar{V}_i . Leur compilation permet d'estimer que \bar{V}_i est de l'ordre de 0,1. Dans une habitation touchée par une avalanche, un individu a donc, grossièrement, 90 % de chances de survivre, avec bien-sûr des variations selon la typologie du bâti (technologie de construction) et les caractéristiques locales de l'aléa. De manière directe, une estimation grossière de la probabilité annuelle de décès p_d pour une personne dont la façade amont de l'habitation est située à l'abscisse x_T du couloir correspondant à la période de retour T est alors :

$$p_d = \lambda p(x_{stop} > x_T) \bar{V}_i = \bar{V}_i / T \quad (\text{eq. 1}),$$

avec $p(x_{stop} > x_T)$ la probabilité de dépassement de l'abscisse x_T et λ le nombre moyen d'avalanches par an sur le couloir étudié. Ainsi, pour une position centennale dans le couloir, une estimation grossière de la probabilité annuelle de décès dans une habitation, sous hypothèse de l'occupation permanente de cette dernière, est 0.001. Le seuil théorique à partir duquel un risque est généralement considéré comme acceptable est de 10^{-4} seulement²¹. On ne passe en dessous de ce seuil qu'à partir d'une position millénaire dans le couloir.

19. Le postulat de base de la réflexion est que la règle de zonage définie par la société matérialise le risque résiduel que cette dernière juge, dans son ensemble, acceptable. Bien-sûr, des acteurs spécifiques, habitants des zones exposées et gestionnaires locaux par exemple, peuvent avoir leur propre idée de ce que serait un risque résiduel acceptable, parfois bien différente.

20. Les données publiées concernent principalement les catastrophes les plus meurtrières de ces dernières décennies en Europe, survenues en Islande [Jonasson *et al.*, 1999] et en Autriche [Barbolini *et al.*, 2004]. La reconstruction des caractéristiques physiques des avalanches dommageables (champs de pression) et leur croisement avec l'état effectif du bâti impacté et de son occupation a permis d'estimer le lien statistique entre pression d'impact et taux de décès. Ce dernier (tout comme la valeur moyenne employée dans cette article) reste relatif à la typologie du bâti (technologie de construction) impacté lors de ces catastrophes, rendant l'extrapolation à des constructions très différentes sujette à caution.

21. Il n'existe pas de seuil universel définissant le risque acceptable. Il varie en fonction de la nature du phénomène dommageable, et des contextes économiques, sociaux, environnementaux, etc. et devrait donc être évalué au cas par cas. Pour ce faire, des études statistiques peuvent être menées pour le mesurer à l'échelle de populations. De même, des questionnaires de psychologie peuvent permettre de l'estimer au niveau de l'individu. Pour le risque avalanche dans les habitations, de telles études n'ont semble-t-il, pas été menées jusqu'ici. Une telle absence de données spécifique est fréquente, et, dans ce cas, il est d'usage de transposer les seuils d'un phénomène à l'autre en partant du principe qu'il est cohérent d'accepter un même niveau d'exposition

Un simple calcul de la probabilité de mort cumulée $p_d(T_{ref})$ sur la durée de référence T_{ref} rend la démonstration encore plus parlante. Pour la position dans le couloir correspondant à la période de retour T , elle s'exprime comme :

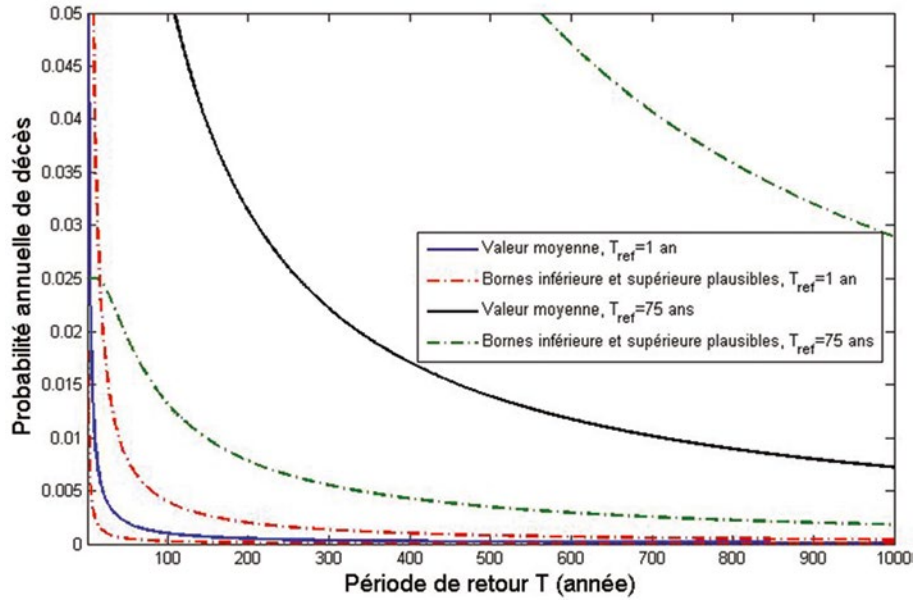
$$p_d(T_{ref}) = \bar{V}_i \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{T_{ref}} \right) \quad (\text{eq. 2}),$$

ce qui permet d'évaluer la probabilité de mort par avalanche en fonction de T et de T_{ref} (Figure 7). Les résultats pour des durées de référence de 30 ou 75 ans correspondant respectivement à une génération et à une vie entière sont édifiants (Tableau 3): sur 75 ans, la probabilité de mort par avalanche pour $T = 100$ ans est par exemple de l'ordre de 5%. Les idées de référence centennale sécuritaire et de risque correspondant accepté semblent bien loin... Pour une position dans le couloir correspondant à $T = 300$ ans (événement tricentennal), cela se discute sans doute davantage: la probabilité de mort par avalanche sur 30 ans est alors de 1%, et le taux de décès annuel de $3,3 \cdot 10^{-4}$, seuil théorique de risque acceptable parfois utilisée lorsqu'il est postulé que ce dernier est assez élevé. Effectuer le calcul plutôt avec $\bar{V}_i = 0,05$ et $\bar{V}_i = 0,2$ pour associer une incertitude liée à la connaissance très imparfaite de \bar{V}_i fait bouger un peu les positions dans le couloir au-delà desquelles les niveaux de risques individuels sont peut-être acceptables (Figure 7), mais ne change pas la donne quant au caractère bien trop optimiste de la référence centennale.

Dans ce cas, pourquoi les références (et particulièrement la valeur centennale) ayant abouti aux zonages actuellement existants ne font-elles pas davantage débat en conduisant à des catastrophes répétées²² ? Sans doute parce que les approches utilisées actuellement pour le zonage sont conservatives, *i.e.* biaisées dans le sens de la sécurité par rapport à une évaluation probabiliste stricte. Pour les approches « subjectives » résultant d'une évaluation experte, il est en effet probable que les ingénieurs en charge du zonage appliquent des coefficients de sécurité implicites plus ou moins consciemment. Il s'agit d'un biais « naturel » car une éventuelle catastrophe ne manquerait pas de les placer sur la sellette. Néanmoins, c'est également sans doute aussi une conséquence de biais inhérents aux méthodes plus « objectives » résultant de l'application d'une modélisation, que tout ingénieur en charge du zonage connaît plus ou moins même s'il ne les utilise pas directement. En effet, l'approche la plus diffusée pour déterminer une avalanche de période de retour donnée reste la méthode VSG et ses dérivés. Celle-ci

maximale pour des phénomènes proches. Ainsi, la valeur de 10^{-4} est souvent utilisée de façon normative pour caractériser un niveau d'exposition maximal à un phénomène dommageable auquel la société devrait accepter de soumettre ses membres. Cette valeur fait par exemple écho au dimensionnement décennal des grands ouvrages hydrauliques. Plus généralement, elle ne semble pas dénuée de sens puisqu'un taux annuel de décès de 10^{-4} constitue, par exemple, l'ordre de grandeur du risque routier pour les automobilistes, globalement assez bien accepté (plus ou moins consciemment sans doute) au niveau individuel comme de la société dans son ensemble.

22. Il y a plus de 25 000 couloirs inscrits à la CLPA en France. Sous l'hypothèse qu'ils fonctionnent indépendamment les uns des autres et qu'un bâtiment habité est situé dans chaque couloir à la position centennale, il y aurait en moyenne $25000 \cdot 0,01 \cdot 0,1 = 25$ catastrophes (bâtiment détruit avec au moins un décès) par an. Bien-sûr, les deux hypothèses sont fausses puisque de nombreux couloirs restent non urbanisés et que les grandes avalanches arrivent plutôt « par groupes » lorsque les conditions météorologiques sont (dé)favorables. Néanmoins, outre le fait que la CLPA ne couvre pas toutes les zones avalancheuses en France, le nombre moyen de catastrophes est (heureusement) tellement inférieur (plus aucun décès en habitation depuis 1999) que le caractère sécuritaire des zonages actuels ne fait guère de doute.



Probabilité de mort calculée selon l'eq. 2 en fonction de la position dans le couloir, exprimée en termes de période de retour T pour des périodes de référence de un et 75 ans. La valeur moyenne correspond à $\bar{V}_i = 0,1$. Les bornes inférieure et supérieure plausibles correspondent à $\bar{V}_i = 0,05$ et $0,2$, respectivement.

Figure 7 : Probabilités de décès et durée d'occupation des bâtiments.

Tableau 3 : Probabilité de mort « moyenne » en fonction de la position dans le couloir (exprimée en période de retour T) pour trois durées de référence T_{ref}

	T = 10 ans	T = 30 ans	T = 100 ans	T = 300 ans	T = 1000 ans
$T_{ref} = 1$ an	0,01	0,003	0,001	0,0003	0,0001
$T_{ref} = 30$ ans	0,096	0,064	0,026	0,010	0,003
$T_{ref} = 75$ ans	0,100	0,092	0,053	0,022	0,007

Probabilités calculées selon l'eq. 2 avec la valeur moyenne $\bar{V}_i = 0,1$.

fait, sans le dire, l'hypothèse de stationnarité de l'activité avalancheuse, mais, surtout, que l'activité moyenne du couloir étudié est d'une avalanche par an. Or l'EPA montre bien que l'activité moyenne (conditionnellement au dépassement du seuil d'observation) est plutôt de l'ordre de 0,3 avalanches par couloir et par an dans les Alpes Françaises. En outre, le contexte global est, en moyenne, au « recul » des grandes avalanches avec le réchauffement climatique. Ainsi, deux postulats erronés se conjuguent pour conduire à des résultats sécuritaires (surestimés) en matière d'extension des aléas de référence sous les conditions climatiques actuelles. Le choix d'une référence centennale trop faible au regard du potentiel destructeur du phénomène est ainsi compensé.

III.3. Cartographier le risque individuel, étape 2 du zonage

Aller plus loin nécessite de poser le formalisme *a minima*. La définition du risque individuel $R_i(x)$ pour l'enjeu i situé à la position x correspond à la moyenne mathématique des dommages subis au cours d'une année sous hypothèse d'une exposition permanente²³. Dans le domaine des avalanches,

la variable critique étant la pression d'impact, la distribution des aléas s'exprime par la loi locale de probabilité des pressions maximales $p(\Pr(x))$ ²⁴. Dans le risque, celle-ci est pondérée par la susceptibilité au dommage, ou vulnérabilité, propre à l'enjeu $V_i(\Pr)$ conduisant au risque individuel :

$$R_i(x) = \lambda \int_{\Pr(x)=0}^{\infty} p(\Pr(x)) V_i(\Pr) d\Pr \quad (\text{eq. 3}).$$

Le dommage étant nul si la position x n'est pas atteinte par l'avalanche, le conditionnement par la distance d'arrêt est utile, le risque individuel en x devenant simplement :

$$R_i(x) = \lambda p(x_{stop} > x) \int_{\Pr(x)=0}^{\infty} p(\Pr(x)|x_{stop} > x) V_i(\Pr) d\Pr \quad (\text{eq. 4}).$$

Prendre en compte davantage de variables dans le calcul (dommage en fonction de la hauteur atteinte par l'écoulement, volume ou durée de l'avalanche, etc.), ne change pas

23. C'est évident pour un bâtiment, moins pour une personne même si c'est l'hypothèse qui a été effectuée jusqu'ici conformément aux approches du zonage via le risque individuel déjà en usage [Keylock *et al.*, 1999 ; Arnalds *et al.*, 2004 ; Cappabianca *et al.*, 2008]. La prise en compte d'une exposition temporaire dans le calcul de risque ne pose aucun problème de formalisme, voir à ce sujet, par exemple [Eckert *et al.*, 2012].

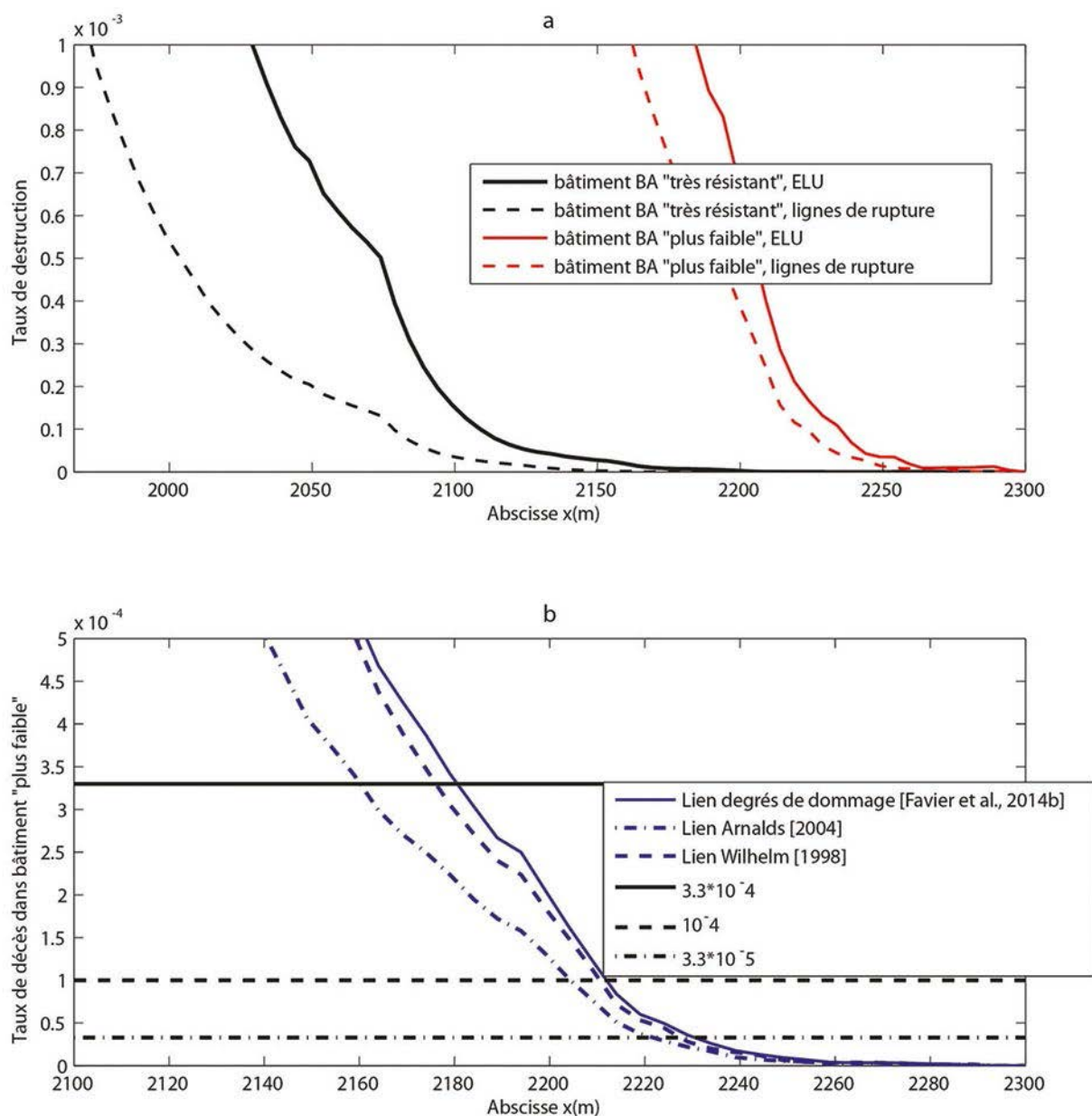
24. Dans le cas d'un chargement quasi-statique, hypothèse apparemment réaliste la plupart de temps pour des enjeux impactés par des avalanches dès lors que ces derniers sont suffisamment grands (mûr de façade par exemple), il s'agit de la seule variable déterminant l'étendue des dommages. Dans les cas, plus rares, où les conditions d'un chargement quasi-statique ne sont pas remplies (pylône de faible diamètre par exemple), le chemin de sollicitation (durée, vitesse de montée, spectre, etc.) peut également jouer un rôle [Ousset *et al.*, 2015]. Les calculs déterministes comme probabilistes sont alors nettement plus ardues même si le formalisme reste similaire.

la donne, le calcul du risque individuel permettant toujours de se ramener d'un aléa multivarié à une quantité scalaire par intégration sur la ou les variables d'intensité (réduit au cas bivarié « minimal » distance d'arrêt-pression maximale dans les équations 3-4). Son unité, un taux annuel de destruction pour un bâtiment ou de décès pour l'un de ses occupants, est compréhensible et interprétable.

L'évaluation du risque implique donc la connaissance de la vulnérabilité $V_i(Pr)$ en plus de la cartographie de l'aléa. Au contraire de cette dernière, $V_i(Pr)$ est indépendante du site. La connaissance de la littérature est donc directement utilisable. Les premiers résultats publiés résultent, outre les retours d'expérience post-catastrophes précédemment évoqués, de calculs mécaniques simples (atteinte d'un seuil de rupture [Wilhelm, 1997]) ou d'évaluations économiques

(coût de reconstruction [Fuchs *et al.*, 2007]). Grâce à des analyses numériques déterministes [Bertrand *et al.*, 2010] et fiabilistes [Favier *et al.*, 2014a], des courbes de vulnérabilité plus précises sont à présent disponibles pour une large gamme de constructions en béton armé. Ils s'appliquent également aux habitants de ces bâtiments via des fonctions de lien reliant la probabilité de décès à la destruction du bâtiment [Favier *et al.*, 2014b].

Un exemple de l'utilisation de ces courbes systématiques pour le cas d'étude est présenté en figure 8 combinant modélisation numérique-probabiliste complète de l'aléa, susceptibilité aux dommages pour deux types de bâtiments en béton armé (« très résistant », c'est-à-dire dont la façade amont est assimilée à une dalle en béton armé avec quatre côtés bloqués, et « plus faible » c'est-à-dire dont la façade amont



a) Taux annuel de destruction en fonction de la position pour deux bâtiments en béton armé (BA) et deux états limites : ELU et lignes de rupture (risque individuel pour la structure BA, [Favier et al., 2014a]) ; b) taux annuel de décès en fonction de la position pour les habitants de la structure BA la plus faible selon trois types de correspondance entre susceptibilité au dommage du bâti et probabilité de décès (risque individuel pour les personnes, [Favier et al., 2014b]). Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie. Modèle numérique-probabiliste d'après Eckert et al. [2010a]. Lien entre pression et dynamique de l'écoulement d'après Sovilla et al. [2008].

Figure 8 : Cartographie du risque individuel par mise en œuvre d'une approche « complète ».

est assimilée à une dalle en béton armé avec trois côtés simplement appuyés et un côté libre) et trois fonctions de lien différentes permettant de relier destruction du bâtiment et probabilité de décès de ses occupants. La destruction du bâtiment est définie « numériquement » par le dépassement d'un seuil mécanique. En figure 8a, les taux de destruction de chacun des deux types de bâtiments résultent de deux seuils distincts : l'état limite ultime (ELU) défini par les Eurocodes et les lignes de rupture, d'apparition plus tardives avec l'incrément de pression. Ces deux seuils, de même que deux autres seuils (atteinte de la limite élastique et de l'état limite accidentel), sont utilisés dans le calcul du lien permettant l'évaluation du taux de décès dans chaque type de bâtiment. Pour un bâtiment, le risque individuel varie fortement selon la technologie de construction, et, moins fortement, selon l'état limite considéré (Figure 8a). A position fixée dans le couloir, le risque est d'autant plus fort que le bâtiment est peu résistant et l'état limite considéré conservatif (*i.e.* atteint pour une pression plus faible). Ainsi, la position dans le couloir à partir de laquelle un bâtiment est « sûr », dépend fortement de sa technologie de construction, mais aussi du choix, plus ou moins drastique, du critère de sûreté. Pour une personne à l'intérieur du bâtiment, l'influence du lien entre dommage au bâtiment et probabilité de décès est moindre (Figure 8b).

De manière similaire, l'évaluation du risque facilite la prise en compte de l'incertitude. C'est particulièrement vrai si l'incertitude s'exprime formellement de manière probabilisée. Ainsi, si $p(\theta)$ est la loi de probabilité quantifiant l'incertitude sur la quantité θ (paramètre du modèle d'aléa ou de vulnérabilité, modèles en compétition dont les crédibilités respectives sont connues, etc.), le risque individuel « intégré » est simplement :

$$R_i(x) = \int R_i(x, \theta) p(\theta) d\theta \quad (\text{eq. 5}),$$

avec $R_i(x, \theta)$ le risque individuel fourni par l'eq. 4 évaluée avec la quantité θ . Un tel calcul, de philosophie bayésienne, conduit généralement, en théorie comme en pratique, à des évaluations du risque plus élevées que si θ est considéré comme parfaitement connu, ce qui débouche, *de facto*, sur des recommandations plus prudentes. Des exemples peuvent être trouvés dans la littérature en matière de cartographie du risque comme de choix de mesures de mitigation [Eckert *et al.*, 2009 ; 2012].

L'évaluation du risque intégré selon l'eq. 5 n'est pas toujours possible, suivant le type d'incertitude considérée et les contraintes opérationnelles (temps alloué à l'étude par exemple). La prise en compte de l'incertitude dans la démarche de zonage reste néanmoins hautement souhaitable. À ce stade de l'analyse, les aléas de référence et exceptionnel sont supposés définis. L'incertitude sur l'aléa et/ou la vulnérabilité ne modifie pas le meilleur pari concernant le risque qu'ils induisent. Toutefois, il est intuitif que, plus ce pari est incertain plus le risque individuel est potentiellement important. À partir du moment où le zonage est bien déduit de la carte de risque, rien n'empêche donc de faire entrer ce risque additionnel dans la règle de zonage, sous la forme d'une marge de sécurité conforme à celle qui résulterait du calcul du risque intégré. Ainsi, un éventail encore plus large de technologies de structures que celles envisagées en figure 8 conduit Favier *et al.* [2014b] à proposer des bornes (notamment une borne supérieure) pour le risque individuel lié à la variabilité des bâtiments en béton armé susceptibles d'être construits dans une zone urbanisable. Favier *et al.* [2016]

propose une méthodologie similaire pour borner le risque individuel par rapport à la connaissance partielle du modèle d'aléa local, en particulier du point de vue du comportement de la queue des distributions des distances d'arrêt et de la capacité d'éventuels ouvrages de protection à l'affecter.

In fine, le risque individuel constitue une mesure ponctuelle permettant de caractériser un niveau d'exposition théorique à un phénomène potentiellement dommageable. Cette mesure est suffisamment flexible pour permettre l'intégration de l'incertitude dans la démarche. En ce sens, le risque individuel doit permettre de garantir l'égalité en termes de risque (et non pas d'aléa) entre des citoyens de différents territoires soumis au même aléa, voire à des aléas différents. Une différence fondamentale avec le « simple » produit d'un scénario et de son coût est que l'évaluation du risque individuel prend en compte toute la variabilité de l'aléa, obligeant à envisager l'ensemble des événements susceptibles d'atteindre la position considérée, et pas seulement un (ou même deux) scénario(s). En fait, les deux approches coïncident dans le cas d'un aléa décrit par une loi de probabilité discrète. Ce cas est celui des aléas « non récurrents » précisément exclus de notre propos. Au contraire, dès lors que l'aléa est bien modélisé par une distribution continue, conformément au cas des aléas récurrents, les deux estimations vont diverger, et ce d'autant plus vite que la sensibilité du dommage à l'aléa est forte [Fuchs et Mc Alpin, 2005]. Ainsi, avec un bâtiment en béton armé, un raisonnement par scénario pourrait laisser croire à un risque nul si le bâtiment résiste au scénario considéré, alors qu'un risque résiduel non négligeable (et potentiellement important) existe, dû aux événements les plus rares de la distribution des aléas (tout seuil associé à une probabilité, aussi petite soit-elle, tant qu'elle n'est pas nulle, est destiné à être inévitablement dépassé un jour ou l'autre).

III.4. Zoner sur la base du risque individuel, étape 3 du zonage

Reste donc à proposer des critères pratiques explicites indiquant de quelle manière peut s'effectuer le zonage réglementaire à partir de la carte de risque, sur la base de seuils d'acceptabilité et de la connaissance plus ou moins précise des aléas dimensionnant définis (de référence et exceptionnel) et de la vulnérabilité des enjeux. Afin de ne pas rester purement théorique, nous détaillons ci-dessous une proposition pratique très simple, certainement largement amendable/discutable, mais qui possède, à nos yeux, le mérite de la clarté et de la cohérence.

En premier lieu, puisque les avalanches restent susceptibles de produire des dommages importants même très près de l'arrêt et que la définition univoque d'aléas multivariés est impossible (Figure 6 et Tableau 2), la caractérisation probabiliste des aléas de référence sur la base de limites d'extension uniquement semble s'imposer. Ainsi, c'est par le biais de cette variable que doit se faire la correspondance entre période de retour de l'aléa, risque individuel et limite de zone. La distribution de pression n'est pas négligée pour autant, puisqu'elle intervient explicitement dans le calcul de risque.

Il est proposé de définir les limites aval des zones rouge et jaune sur la base de deux valeurs de risque individuel. Ainsi est délimitée, à l'amont, la zone de risque fort, où toute protection est destinée à être insuffisante et/ou envisageable à des coûts prohibitifs seulement, et, à l'aval, la zone blanche, où le risque est si faible qu'aucune prescription n'est justifiable du point de vue d'un compromis social pragmatique. Il n'appartient pas à la communauté scientifico-technique

de fixer ces deux valeurs de risque. Néanmoins, les seuils de $3,3 \cdot 10^{-4}$ pour la limite rouge-bleue et de 10^{-4} pour la limite jaune-blanche semblent à ne pas dépasser sous peine qu'avec le zonage obtenu le risque individuel résiduel après zonage puisse dépasser les valeurs généralement considérées comme des maximums en matière de risque acceptable. Les éléments fournis en III.2 montrent que ces valeurs peuvent être assimilées, sur la base des retours d'expérience post-catastrophes disponibles, à des positions tricentennale et millénaire, respectivement. La correspondance entre aléa de référence, aléa exceptionnel et zonage via le risque est donc bien explicite. À titre de comparaison, Jonasson *et al.* [1999] précise les valeurs cibles dans la législation Islandaise : $5 \cdot 10^{-4}$, 10^{-4} et $3 \cdot 10^{-5}$ pour, respectivement, une résidence secondaire occupée en été uniquement, un lieu de travail et une maison d'habitation permanente²⁵. Cette norme est donc bien plus drastique que celle proposée.

Reste donc à positionner la limite entre zone bleue et zone jaune délimitant les zones constructibles moyennant des prescriptions plus ou moins fortes (permanentes ou, éventuellement, temporaires). Le plus naturel semble être de l'assimiler à la borne supérieure de la zone de risque définie avec le même seuil que pour la limite rouge-bleue (par exemple $3,3 \cdot 10^{-4}$), mais compte tenu des sources d'incertitude qui ont pu être identifiées. Dans le cas où les incertitudes prises en compte pèsent uniquement sur la délimitation de l'aléa de référence, la correspondance avec la borne supérieure de l'aléa de référence correspondant à la limite rouge-bleue est directe. Ainsi, du point de vue du calcul mené en III.2 il s'agirait de la borne supérieure envisageable pour l'extension de l'événement tricentennal. La période de retour « moyenne (au sens du meilleur pari prédictif) correspondant à cette limite bleue-jaune peut être évaluée, au cas par cas, via le modèle d'aléa. Au contraire, si l'événement de référence est supposé connu avec certitude mais que la vulnérabilité des enjeux humains est considérée comme mal connue (destruction du bâtiment et/ou lien avec le décès des habitants), la correspondance se fait directement via la période de retour. Ainsi, pour $V_i = 0,2$, la période de retour correspondant à la position à partir de laquelle le risque individuel devient inférieur à $3,3 \cdot 10^{-4}$ est simplement 600 ans (Eq. 1). Bien sûr, rien n'empêche les deux types d'incertitude d'être combinés. Le passage entre limite de zone et période de retour de l'aléa est alors plus implicite, mais toujours univoque via le modèle d'aléa. Mentionnons également que, dans certains cas, l'incertitude peut être suffisamment forte pour que la limite aval de zone bleue ainsi déterminée soit située « plus bas » dans le couloir que la limite entre zones jaune et blanche fournie par le seuil de risque acceptable choisi (par exemple 10^{-4}). Dans ce cas, il n'y a pas de zone jaune, le passage du bleu au blanc est sans intermédiaire.

L'approche proposée ne prend pas en compte l'incertitude sur l'extension de l'aléa exceptionnel. C'est sans doute une limite « conceptuelle » importante, d'autant que cette incertitude est nécessairement extrêmement élevée. Néanmoins, de façon pragmatique, elle est sans doute effectivement très difficile à caractériser et la négliger facilite l'expression de

la matrice de passage. Si ce raccourci semble trop « optimiste », une solution est de choisir un niveau de risque individuel seuil plus faible pour la limite aval de zone jaune. Ainsi, la valeur « islandaise » de $3 \cdot 10^{-5}$ pour une habitation occupée de façon permanente correspond via l'éq. 1 à une période de retour de 3333 ans...

On notera également que la zone d'incertitude qui a été introduite pour définir les étendues respectives des zones bleue et jaune n'est pas un « coefficient de sécurité réglementaire » permettant de laisser flou le choix d'un troisième niveau de risque seuil, « quelque part » entre celui correspondant au scénario rare et celui correspondant au scénario exceptionnel. Le seuil déterminant l'étendue de la zone bleue proposée est bien le même que celui déterminant l'étendue de la zone rouge, et nous pensons que c'est à la réglementation de le fixer et de l'assumer. L'incertitude que nous considérons porte alors sur la capacité pratique à déterminer la position dans le couloir à partir de laquelle il est sûr que ce seuil n'est plus dépassé.

Ainsi, on obtient une matrice de passage très simple faisant le lien explicite et univoque entre zones rouge – bleue – jaune – blanche et niveaux de risque individuel dans chaque zone. Via le risque, ce lien existe même entre aléas probabilisés (de référence et exceptionnel) et zones (Figure 9). Le concept de risque individuel permet donc bien de traiter de manière simple et cohérente les éléments menacés existants ou potentiels dans le zonage via un cadre reproductible et indépendant du choix méthodologique effectué pour l'obtention de la carte des aléas. Sont pris en compte : l'extension des deux aléas retenus, la susceptibilité aux dommages des enjeux – personnes dans les bâtiments en particulier – et l'incertitude relative à ces deux composantes du risque. L'approche montre clairement qu'un même niveau de risque peut résulter de différents niveaux d'aléa, de vulnérabilité ou de connaissance. Enfin, elle affiche explicitement le risque résiduel après zonage, sous la forme d'un maximum en zone bleue et d'un meilleur pari prédictif dans les autres zones.

Dans la situation actuelle, les objectifs de protection (la référence centennale en particulier) semblent trop faibles par rapport aux phénomènes considérés. Ils sont compensés par des coefficients de sécurité implicites lors du zonage dont l'application est permise par le faible cadrage méthodologique entourant l'étape de cartographie probabilisée de l'aléa. Via l'approche proposée, l'ensemble de la chaîne se trouve au contraire objectivée, tout au moins du point de vue de sa ligne directrice. Cela n'empêche pas que, dans le détail, certains éléments pourront rester plus subjectifs : choix de valeurs de paramètres de modèle ou types et/ou incertitudes à considérer, par exemple. L'approche proposée établit notamment que les niveaux de retour équivalents pour garantir l'acceptabilité sont bien supérieurs à la référence centennale actuelle. Les références suggérées à titre indicatif, à savoir des scénarii dimensionnant de type tricentennal et millénaire, sont sans doute d'ailleurs, plutôt que des valeurs « sécuritaires », des choix de société pragmatiques de compromis entre les contraintes d'urbanisation pesant sur les communes de montagne, notre capacité (limitée) à évaluer de petites probabilités, et le besoin de sécurité des populations. En effet, comme le suggèrent les calculs effectués en III.2 et les seuils rapportés par Jonasson [1999], l'acceptabilité « réelle »²⁶ correspond sans doute vraisemblablement à des scénarios dimensionnants encore plus rares...

25. Bien qu'il soit ici question de bâtiments, il s'agit toujours de taux de décès pour leurs habitants sous hypothèse d'une occupation permanente. Cela illustre le caractère conceptuel du risque individuel : une occupation permanente est postulée, y compris pour un type de bâtiment défini justement par son occupation saisonnière. Cette dernière caractéristique permet d'accepter un taux de décès théorique bien plus élevé que pour un bâtiment occupé à l'année, puisque, dans la pratique, le taux de décès par avalanche dans une résidence secondaire estival est nul si le principe de sa non-occupation hivernale est bien respecté.

26. À savoir des taux de décès maximums de 10^{-4} , voire de 10^{-5} , correspondant aux seuils d'acceptabilité estimé et ou postulés dans de nombreuses études traitant d'autres risques sociaux ou environnementaux.

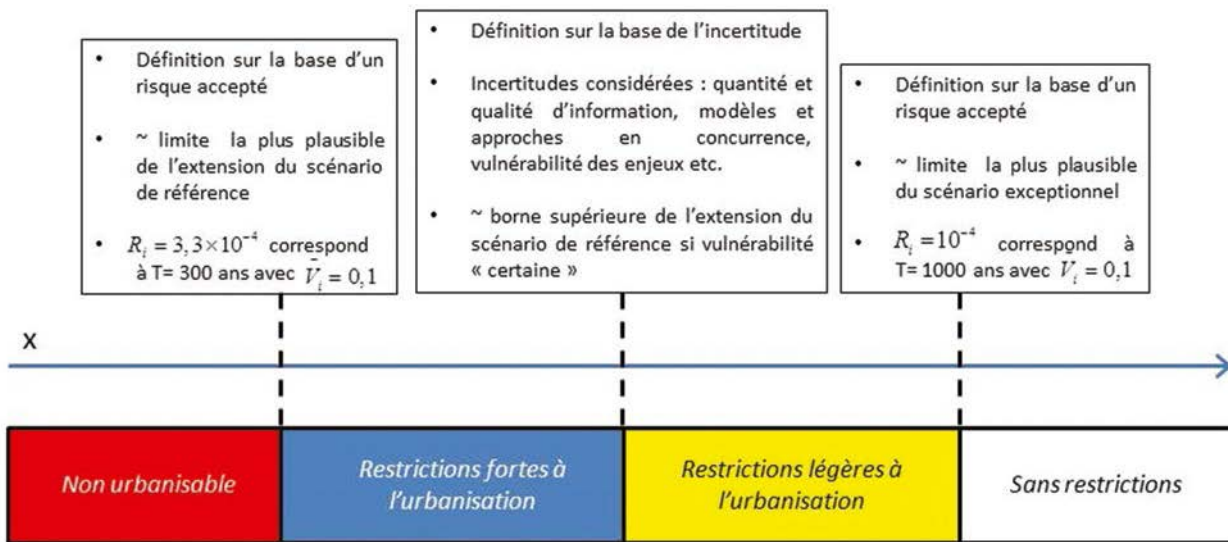


Figure 9 : Synthèse de l'approche proposée du zonage : matrice de passage univoque et quasi explicite entre limites de zones, risque individuel et période de retour de l'aléa.

Enfin, du point de vue des prescriptions réglementaires, le cadre proposé est tout à fait compatible avec un schéma du type restrictions fortes – restrictions faibles à l'urbanisation telle que recommandées par le MEDDE [2015]. La zone jaune ainsi définie peut en particulier inclure des dispositions particulières pour les ERPs et les éléments de la chaîne des secours, de même que d'éventuelles servitudes en matière de mesures de gestion temporaire. Quant à la zone bleue, même si elle ne découle pas, dans le schéma proposé, d'une efficacité des renforcements suffisante pour permettre la constructibilité, il est clair que ces renforcements ne « peuvent pas faire de mal », agissant comme des facteurs de sécurité supplémentaires permettant de diminuer le risque résiduel après zonage, voir ci-après.

III.5. Illustration et correspondance entre les approches

En guise d'illustration de l'implémentation d'une approche simple du zonage au sein du cadre proposé, la figure 10a propose, pour le cas d'étude, la cartographie du risque individuel résultant du couplage des deux modèles statistiques de distance d'arrêt de type POT utilisés précédemment (GPD et exponentiel) avec une probabilité de mort conditionnelle à l'atteinte constante. Conformément à la distribution des distances d'arrêt modélisée, le modèle exponentiel estime, pour une position donnée dans le couloir, le risque individuel comme étant bien plus élevé. Pour le modèle GPD, le risque est nul au-delà de la borne supérieure des distances d'arrêt (2 337 m).

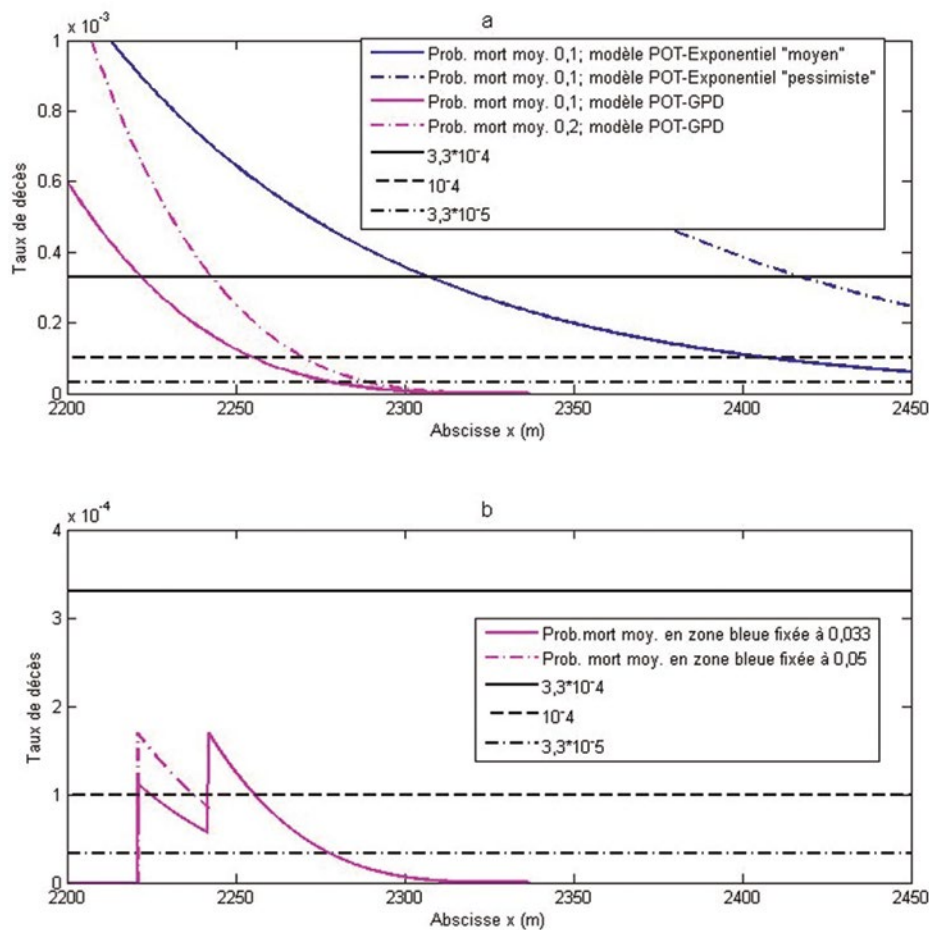
Sur la base de chacun de ces deux modèles, les tableaux 4-5 définissent un zonage. Dans les deux cas, les valeurs seuil $\hat{R}_i = 3,3 \cdot 10^{-4}$ et 10^{-4} sont utilisées pour définir les limites rouge-bleue et bleue-jaune, ce qui, avec $V_i = 0,1$ correspond, respectivement, à des avalanches de période de retour $\hat{T} = 300$ et 1000 ans²⁷. Pour la limite rouge-bleue, la différence entre les deux modèles est d'environ 90 m. Il est à noter que c'est le caractère univoque de la matrice

de passage au zonage qui rend une telle comparaison possible.

À titre d'exemple du caractère « plastique » de la définition de la zone bleue via l'incertitude, ces zonages sont complétés de deux manières différentes. Avec le modèle POT-GPD, l'incertitude sur V_i est prise en compte. Une valeur maximale plausible de 0.2 fait passer sous la valeur $R_i^{\max} = 3,3 \cdot 10^{-4}$ pour une limite bleue-jaune correspondant à $\hat{T} = 600$ ans. Avec le modèle POT-exponentiel, l'incertitude de modèle exprimée sous la forme de l'intervalle interquartile précédemment évoqué (Figure 4) est considérée. Cette dernière est suffisamment forte pour positionner la limite à partir de laquelle il est sûr que R_i^{\max} devient inférieur à $3,3 \cdot 10^{-4}$ à une position correspondant à une période de retour $\hat{T} = 1162$ ans seulement, rendant de facto l'emprise de la zone jaune nulle. Entre les deux zonages, les positions à partir desquelles plus aucune restriction à l'urbanisation n'est prévue sont séparées de 170 m. En outre, avec le zonage sur la base du POT-exponentiel, les restrictions sont fortes partout, tandis qu'elles sont fortes puis faibles sur la base du POT-GPD (existence de la zone jaune). Le zonage sur la base du modèle POT-exponentiel est donc très « pessimiste » du fait de l'incertitude de modèle (paramètre d'échelle de la loi exponentielle estimé de manière peu précise) et de la non prise en compte du caractère borné de la distribution des distances d'arrêt (modèle exponentiel plutôt que GPD – Weibull). Même si les données plaident plutôt pour un modèle GPD que pour un modèle exponentiel, il n'est toutefois pas certain que l'approche GPD soit à privilégier à coup sûr. Peut-être qu'une bonne option serait d'ailleurs de combiner les deux approches. L'objet étant ici essentiellement de démontrer la faisabilité du zonage sur la base du schéma générique proposé, la comparaison et la combinaison des modèles ne sera toutefois pas poussée davantage dans ce qui suit.

Le tableau 6 propose quant à lui un zonage sur la base de l'approche numérique-probabiliste complète de la figure 8 conditionnellement au bâtiment type en béton armé le plus faible. Les mêmes valeurs seuils de $3,3 \cdot 10^{-4}$ et 10^{-4} combinées au choix de l'estimation de la vulnérabilité humaine

27. La notation « chapeau » renvoie à la notion de meilleur pari statistique sur la base des données.



Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie : a) risque individuel avant zonage ; b) risque individuel résiduel après zonage selon l'approche du tableau 4. En zone rouge, le risque résiduel est nul. En zone jaune et blanche, \bar{V}_i reste égale à 0,1 et le risque résiduel théorique est égal au risque avant zonage, mais en zone jaune, le risque résiduel pratique peut être réduit par des mesures de gestion temporaire diminuant l'exposition. En zone bleue, \bar{V}_i est réduite (à 0,033 ou 0,05) du fait des renforcements imposés sur le bâti, de sorte que le risque résiduel après zonage est significativement plus faible (tiers ou moitié du risque avant zonage, suivant la valeur de \bar{V}_i considérée).

Figure 10 : Cartographie du risque individuel via une approche simplifiée : combinaison de la distribution des distances d'arrêt ajustée par une loi exponentielle ou GPD avec la probabilité de mort moyenne conditionnellement à l'atteinte et confrontation aux seuils d'acceptabilité.

Tableau 4 : Limites de zones pour le cas d'étude traité, approche « simple ».

	Limite rouge-bleu	Limite bleu-jaune	Limite jaune-blanche
x (m)	2221	2242	2255
\hat{R}_i (/an)	$3,3 \cdot 10^{-4}$	/	10^{-4}
R_i^{\max} (/an)	/	$3,3 \cdot 10^{-4}$	/
\hat{T} (année)	300	600	1000

Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie. Risque individuel (taux annuel de décès) évalué par combinaison de la distribution des distances d'arrêt ajustée par une loi POT-GPD avec une probabilité de mort constante. Limites rouge-bleu et jaune-blanche obtenues à partir des risques seuils choisis et de la valeur moyenne $\bar{V}_i = 0,1$. Limite bleu-jaune obtenue par considération de l'incertitude se rapportant à cette valeur (courbe avec $\bar{V}_i = 0,2$ en figure 9).

Tableau 5 : Limites de zones pour le cas d'étude traité, définition de la zone bleue sur la base de l'incertitude de modèle.

	Limite rouge-bleu	Limite bleu-blanche
x (m)	2309	2425
\hat{R}_i (/an)	$3,3 \cdot 10^{-4}$	/
R_i^{\max} (/an)	/	$3,3 \cdot 10^{-4}$
\hat{T} (année)	300	1162

Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie. Risque individuel (taux annuel de décès) évalué par combinaison de la distribution des distances d'arrêt ajustée par une loi POT-exponentielle avec une probabilité de mort constante $\bar{V}_i = 0,1$. Limite bleu-blanche obtenue par prise en compte de l'intervalle de confiance interquartile sur le modèle d'aléa (Figure 4a).

Tableau 6 : Limites de zones pour le cas d'étude traité, approche « complète ».

	Limite rouge-bleue	Limite bleu-jaune	Limite jaune-blanche
x (m)	2160	2181	2205
\hat{R}_i (/an)	$3,3*10^{-4}$	/	10^{-4}
R_i^{\max} (/an)	/	$3,3*10^{-4}$	/
\hat{T} (année)	88	161	330

Couloir EPA numéro 13 de la commune de Bessans, Savoie. Risque individuel (taux annuel de décès) évalué selon Favier et al. [2014b] pour un bâtiment en béton armé assimilé à une dalle à trois cotés simplement appuyés et un coté libre. Lien entre susceptibilité au dommage du bâti et probabilité de décès des habitants selon Arnalds et al. [2004]. Limite bleu-jaune obtenue par considération de l'incertitude se rapportant à ce lien (la marge d'incertitude est définie par les trois courbes de risque en figure 8b).

inspiré de Arnalds *et al.* [2004] conduisent aux limites rouge-bleue et jaune-blanche proposées. La zone bleue est délimitée en prenant en compte l'incertitude sur cette vulnérabilité uniquement, de sorte que la limite bleu-jaune correspond à la position dans le couloir où la courbe de risque individuel la plus pessimiste de la figure 8b (celle de l'approche par degrés de dommages de Favier *et al.* [2014b]) passe sous la valeur 10^{-4} . La relation univoque entre période de retour et position dans le couloir est fournie par le modèle numérique-probabiliste qui permet de remonter aux périodes de retour équivalentes aux trois limites de zones, respectivement $\hat{T} = 88, 161$ et 330 ans. Cette approche « complète » conduit donc à un zonage plus optimiste en termes de période de retour équivalente des scénarii de référence et exceptionnel à considérer, assez proche des références centennale et tricentennale plus usuelles que celles défendues dans cet article. À cela, deux arguments méritent d'être opposés. Tout d'abord, l'hypothèse sous-tendant ce zonage est que l'ensemble des bâtiments en zone d'arrêt, y compris au-delà des limites d'extension considérées comme dimensionnantes pour le zonage, sont construits en béton armé et selon une technologie de construction correspondant aux courbes de vulnérabilité utilisées. S'appuyer sur un tel zonage signifierait donc, pour être cohérent avec les niveaux de risque affichés, imposer des servitudes en matière de construction « loin » dans la zone d'arrêt, ce qui n'est pas l'usage actuel, et poserait certainement des problèmes pratiques. Ensuite, Favier [2014b] a montré que, même pour le béton armé, si l'ensemble de l'éventail des courbes de vulnérabilité actuellement disponibles dans la littérature est considéré, l'acceptabilité « réelle » (un risque résiduel maximum après zonage de $3*10^{-5}$ selon [Jonasson *et al.*, 1999]) n'est effectivement atteinte avec certitude qu'au-delà d'une position millénaire. Ainsi, pour un cas d'étude quelconque où la vulnérabilité du bâti est mal connue et/ou intrinsèquement variable d'une construction à l'autre, des références de l'ordre de 300 et 1000 ans semblent effectivement plus judicieuses. Elles devraient en particulier s'appliquer aux zones encore non urbanisées pour lesquelles le zonage doit envisager que différents choix constructifs sont susceptibles d'être effectués.

Plus généralement, ces exemples permettent de montrer le lien existant entre différentes approches du zonage, plus ou moins complexes du point de vue du calcul et de la définition de la zone d'incertitude, mais rentrant toutes dans le canevas générique de la figure 9. L'approche du tableau 6 est « complète » au sens où, au niveau du site étudié, une modélisation numérique-probabiliste détaillée de l'aléa est effectuée. Le calcul de l'intégrale de l'éq. 4 est conduit numériquement pour chaque abscisse du couloir et différentes lois de vulnérabilité reliant le dommage humain à la pression. Dans l'approche simplifiée des tableaux 4-5, la

distribution des distances d'arrêt calée localement est simplement pondérée par la valeur constante \bar{V}_i pour estimer le risque individuel en chaque point du couloir. Ainsi, les deux approches coïncident si, quelle que soit la position dans le couloir, la probabilité de dépassement $p(x_{stop} > x)$ est la même et que, en plus,

$$\int_{Pr(x)=0}^{\infty} p(Pr(x)|x_{stop} > x) V_i(Pr) dPr = \bar{V}_i \quad \forall x \text{ (eq. 6),}$$

c'est-à-dire que la probabilité de mort conditionnellement à l'atteinte est indépendante de la position. Pour le cas d'étude traité, ces deux hypothèses sont assez bien vérifiées, en tout cas pour ce qui est des modèles numérique-probabilistes et pot-GPD (Figure 4a), puisque tous deux prédisent des queues de distribution des distances d'arrêt similaires, bornée (GPD) ou « quasi bornée » (numérique-probabiliste) et que le modèle numérique-probabiliste suggère une distribution de la pression maximale conditionnellement à l'atteinte variant peu sur une gamme assez importante de positions du couloir (Figure 6c). Ainsi, la différence entre les deux zonages est bien due à la différence des enjeux postulés : pour l'approche simple, un mélange disparate de bâtiments conformes à ceux ayant été détruits par des avalanches dans le passé et répertoriés par la littérature (parmi lesquels des chalets et des bâtiments en bois typiques de l'architecture scandinave, et donc peu résistants), et un bâtiment à la façade amont en béton armé prévue pour réduire le risque pour l'approche « complète ».

III.6. Risque résiduel, risque collectif, acceptabilité et résilience du territoire

Le risque individuel résiduel après zonage est implicitement considéré comme accepté par la société. Par rapport à l'approche actuelle, où sa valeur est non explicite, l'approche proposée du zonage, a outre sa consistance le mérite de permettre de « d'afficher clairement la couleur », en le rendant plus objectivable et plus accessible pour les non-spécialistes. Ainsi, la question de l'acceptabilité du risque résiduel pourrait être abordée non seulement, au niveau sociétal, du point de vue du choix des seuils maximaux dans chaque zone, mais aussi, localement, au niveau de chaque site, avec le décideur, voire, directement, avec les populations exposées. En effet, sur un territoire plus ou moins grand de la zone d'arrêt, le risque résiduel est non nul. Ceci illustre l'obligation d'accepter un certain niveau de pertes résultant du phénomène pour ne pas pénaliser trop fortement le développement local. La mise en pratique de l'approche proposée pourrait donc permettre de mettre à l'épreuve le caractère raisonnable de ce compromis (discussion avec les intéressés), et ainsi, de l'affiner.

À l'intérieur de chaque zone, le risque résiduel après zonage décroît avec la position, conformément à l'aléa

auquel il se rattache. En revanche, à chaque limite de zone, il peut recroître brutalement suite au relâchement de certaines restrictions à l'urbanisation qui augmente la vulnérabilité théorique. En effet, le risque individuel après zonage s'évalue *de facto* comme la combinaison par morceaux de différents risques individuels évalués pour différents enjeux. À titre d'exemple, la figure 10b représente le risque individuel résiduel pour le cas d'étude après application du zonage défini par le tableau 4. En zone rouge, il est nul car la zone est inconstructible. En zone bleue, V_i est réduite du fait des renforcements imposés sur le bâti, de sorte que le risque résiduel après zonage est significativement plus faible que le risque avant zonage évalué avec $V_i = 0.1$. Du fait des valeurs prises en guise d'illustration (V_i réduite à 0,033 ou 0,05) et de la linéarité de l'équation 1, le risque individuel est ainsi divisé par 3 ou 2 par le zonage. Par exemple, une valeur résiduelle de $1.1 \cdot 10^{-4}$ ou de $1,67 \cdot 10^{-4}$ au niveau de la limite rouge-bleue correspond à $\hat{T} = 300$ ans et, avant zonage, à $\hat{R}_i = 3,3 \cdot 10^{-4}$. En zone jaune et blanche, V_i reste égale à 0.1, de sorte que le risque résiduel après zonage est égal au risque avant zonage. Toutefois, en zone jaune, le risque résiduel peut/devrait être, en pratique, réduit à une valeur réelle nettement inférieure à sa valeur théorique par des mesures de gestion temporaire contraignantes diminuant l'exposition.

Ce décalage entre risque individuel théorique et pratique en zone jaune illustre encore une fois le caractère théorique de la mesure de risque individuel. Il doit être gardé en mémoire, en particulier pour la gestion d'enjeux existants. Ces derniers peuvent en effet rendre un zonage inapproprié alors que le risque individuel théorique est en dessous du seuil d'acceptabilité choisi. Un cas typique est celui où l'espace situé immédiatement à l'aval d'une limite de zone contient des enjeux forts, de sorte qu'un événement de grande ampleur peut être réellement catastrophique (nombreuses victimes, destructions majeures, etc.). De ce fait, garantir qu'en n'importe quel point de l'espace le risque individuel pour un individu type soit inférieur à un seuil supposé acceptable est sans doute insuffisant, et des dispositions plus conservatives doivent être envisagées. Par ailleurs, le principe de l'approche proposée du zonage est que le compromis entre dommages dus au phénomène et restriction à l'urbanisation peut être défini à l'échelle nationale de manière normative sous la forme de deux seuils de risque résiduel acceptable. Cela a l'avantage de garantir une certaine égalité. En contrepartie, ne sont pris en compte ni des contraintes locales liées à un espace disponible plus ou moins grand au regard de la population et conduisant à une densité de population plus ou moins forte, ni (et les deux sont liés), à la présence déjà effective d'enjeux. Ces deux points suggèrent qu'il serait intéressant, à l'avenir, de pousser l'analyse jusqu'à l'évaluation du risque total, réel (enjeux existants, éventuellement pondérés par des taux d'exposition) ou théorique (risque individuel intégré conditionnellement à une densité d'enjeux), à une échelle spatiale pertinente (au minimum un couloir entier, voire une échelle plus large, la commune par exemple). Il deviendrait ainsi possible de définir les limites de zones comme les solutions d'un problème de minimisation des pertes, ce qui pourrait constituer une piste prometteuse pour étendre la réflexion socio-économique ébauchée ici. En effet, cela permettrait de mieux raisonner sur l'existant, et également de prendre en compte plus facilement les spécificités locales, ce qui, en retour devrait faciliter l'acceptation du zonage obtenu par les habitants des zones à risques et les gestionnaires territoriaux locaux. Plus globalement, cela devrait également contribuer

à une meilleure appropriation de la problématique par l'ensemble des acteurs concernés.

Terminons par une remarque importante sur l'acceptabilité et son lien avec l'échelle à laquelle elle est envisagée. Même lorsque la notion d'acceptabilité est appliquée au risque individuel, sa signification est supra-individuelle. La personne décédée n'accepte pas son sort, c'est une communauté plus large qui juge qu'un certain « taux de perte », *a priori* très faible, est supportable. Pour ce faire, dans un zonage efficace, les pertes dues au phénomène équilibrent celles liées aux restrictions à l'urbanisation. Néanmoins, un autre critère intervient également : le zonage doit être suffisamment protecteur pour que la communauté puisse survivre à une catastrophe majeure. Cette capacité de résilience économique et sociale du territoire est étroitement liée à la taille de la communauté impactée. En effet, les aléas gravitaires auxquels cet article s'intéresse n'ont pas un impact suffisamment large pour affecter durablement des communautés montagnardes suffisamment solides. Par exemple, la catastrophe majeure survenue à Val d'Isère en 1970 (destruction d'un chalet de l'UCPA, 39 morts et 37 blessés, [Saulnier, 1970]) n'empêche pas cette commune d'être aujourd'hui très prospère. En revanche, ils sont suffisants pour mettre en danger la survie de communautés plus petites : Montroc/Le Tour continue par exemple de souffrir des stigmates de l'avalanche de 1999. Avec des bâtiments non reconstruits et une bonne partie de sa superficie désormais inconstructible, il n'est pas sûr qu'elle s'en remette réellement un jour. Ainsi, et même si les contextes différents dans lesquels ce sont produites ces deux catastrophes rendent la comparaison difficile, ce qui était peut-être acceptable pour l'une (en tout cas sur le long terme), ne l'était pas sans doute pas pour l'autre. Les notions d'acceptabilité, comme de résilience apparaissent donc relatives à la taille de la communauté considérée. Cela indique que la réflexion sur l'échelle la plus pertinente pour évaluer le risque puis passer au zonage via des considérations d'acceptabilité et / ou de minimisation des pertes ne fait sans doute qu'être initiée. Néanmoins, « pour boucler la boucle » il paraît clair qu'il restera toujours à définir, du point de vue de la puissance publique, des seuils de risque individuel au-dessus desquelles il ne faut pas aller indépendamment de toute considération locale. Il est à espérer, en tout cas, que cet article ait apporté suffisamment d'éléments pour défendre cette idée.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour la plupart des aléas naturels, le zonage reste pensé comme une procédure normative issue de la transposition du « modèle inondation » à des aléas très différents. Au cœur de ce schéma figure le phénomène centennal, à la fois peu interprétable pour les populations et d'une définition rigoureuse problématique. En outre, il correspond à une référence probabiliste inadaptée à des phénomènes brutaux et destructeurs. Afin de pallier ces insuffisances, cet article propose un changement de paradigme. Par la redéfinition des concepts sous-jacents au zonage, il est proposé de traiter ce dernier comme ce qu'il devrait être, à savoir un compromis équilibré entre deux types de pertes rendant socialement acceptable le risque résiduel après zonage. Pour ce faire, le point central réside dans le passage explicite par la quantification et la cartographie du risque individuel. Celle-ci permet la prise en compte du caractère multivarié de l'aléa et des incertitudes, de même que la traçabilité de l'ensemble de la procédure de décision. De même, le risque résiduel après

zonage matérialise, de manière bien plus concrète et objectivable que dans la doctrine actuelle, ce que la société définit comme le risque acceptable. Le schéma générique proposé, fondé sur un formalisme solide, est indépendant du degré de complexité de l'approche choisie pour l'évaluation de l'aléa (de la définition experte de scénarios à une analyse numérique-probabiliste complète) ou de la vulnérabilité, comme cela a été illustré sur notre cas d'étude. Il pourrait donc, dans le futur, être mis en œuvre par une variété d'acteurs disposant de moyens de calcul différents. De même, sa flexibilité le rend capable de s'accommoder de nombreuses évolutions potentielles de la réglementation, en particulier de directives techniques éventuelles bien plus contraignantes qu'elles ne le sont actuellement en matière de cartographie de l'aléa. Dans cette optique, il n'est effectivement pas nécessaire d'attendre que celles-ci aient été précisées pour avancer vers plus de cohérence et de consistance.

Plus largement, il semble que la définition d'une méthode standardisée complètement justifiée sur des bases scientifiques ne soit pas d'actualité. Pour le zonage dans son ensemble, cela ne le sera sans doute jamais car il impliquera toujours une part de choix sociétal non réductible à une question scientifico-technique. Pour l'étape de cartographie de l'aléa, c'est envisageable mais encore loin d'être atteint du fait de nombreuses incertitudes résiduelles sur les aléas eux-mêmes ainsi que du manque de travaux traitant de la validation systématique des approches existantes. Dans l'attente, il est néanmoins tout à fait possible d'avancer sensiblement dans la définition de concepts rigoureux garants d'une forme d'unicité de l'approche du zonage à défaut d'assurer sa reproductibilité totale d'un site et d'un analyste à l'autre. Cette unicité de l'approche (en particulier du risque résiduel maximal affiché dans chaque zone), sans doute loin d'exister dans l'état actuel de la pratique constituerait une première étape dans le sens d'une plus grande égalité des citoyens face au risque. Il n'est d'ailleurs pas dit qu'il serait souhaitable, ultérieurement, d'aller plus loin dans l'uniformisation puisque laisser place à la subjectivité contrôlée de l'analyste pour certains choix (de modèle, etc.) est sans doute préférable pour prendre en compte au mieux les contraintes physiques et sociales locales, valoriser son expérience, de même que pour garantir une meilleure appropriation de la problématique par les différents acteurs concernés.

Cette question du caractère plus ou moins contraignant des approches du zonage, et, plus largement, de la teneur de la doctrine, a des conséquences directes sur la responsabilité juridique. Il s'agit d'un point non abordé dans cet article, et qui mériterait certainement des investigations plus poussées de la part de spécialistes du droit. Il semble néanmoins d'ores et déjà que la situation pose là aussi question. Le caractère éminemment complexe des problèmes techniques (prévisibilité ou non d'un phénomène dans un cadre aléatoire, non stationnaire et/ou incertain) combiné aux flous doctrinaires qui ont été pointés rend en effet difficile le travail du juge chargé de statuer sur une éventuelle responsabilité après une catastrophe. Définir des directives très précises clarifierait les choses puisque la responsabilité découlerait de leur respect ou non. Il a cependant été largement développé pourquoi une telle option ne paraissait ni possible sur des bases purement scientifiques, ni souhaitable. Bien que laissant plus de place à l'appréciation, l'approche préconisée ici (un cadre général édicté par le législateur sous la forme de seuils explicites en matière de risque individuel maximum pour les personnes, doublé de solutions techniques adaptées et traçables dont le choix relève du technicien) devrait, elle aussi, permettre une nécessaire simplification.

In fine, l'approche proposée vise à permettre à la question du zonage de sortir de la sphère scientifico-technique et réglementaire dans laquelle elle est longtemps restée confinée. Il semble que la gestion des risques (naturels, entre autres) ne puisse plus, à présent, faire abstraction d'une telle évolution vers plus de justification et de transparence des règles de décision. En effet, le choix nécessaire de seuils de risque individuel maximum nécessite que la société définisse collectivement ce qu'est le risque acceptable dans le cadre du zonage. Une telle réflexion aurait le mérite de ne pas « laisser la justice trancher un problème de société » [Ancy, 2013]. En outre, en explicitant le risque individuel résiduel après zonage et en ouvrant la porte à l'évaluation d'un risque collectif à l'échelle d'une communauté menacée, l'approche proposée matérialise le compromis social sous-tendant le zonage. Elle devrait ainsi donner aux acteurs sociaux les éléments leur permettant de comprendre leur sort, mettant de ce fait ce compromis à l'épreuve du terrain, et ce depuis l'individu jusqu'aux échelles territoriales de décision.

IV.1. Quelques conseils pour la pratique

Certains des éléments qui ont été soulevés et/ou proposés sont peu conclusifs et encore moins directifs. Si l'on ajoute à ce tableau le caractère peu clair de la situation actuelle, il est certain que les bureaux et services techniques en charge du zonage n'ont pas la tâche facile. Dans l'attente de clarifications qui devront nécessairement arriver tôt ou tard, sont formulées ci-dessous quelques recommandations à mettre en œuvre pour l'élaboration du zonage autant que pour la vérification du travail effectué. Ce cahier des charges minimal constitue, en plus du tour d'horizon effectué des méthodes et concepts et de l'approche générique simple de la problématique du zonage proposée, la contribution de cet article à la pratique :

- *Conformité doctrinaire*. Evidemment, il convient en premier lieu que le zonage retenu soit conforme à la législation présidant à son élaboration. *A priori*, pour ce qui est des avalanches, il doit reposer à présent sur quatre zones définies sur la base de deux aléas, dits « de référence » et « exceptionnel » ;
- *Caractérisation probabiliste via la distance d'arrêt*. Il est recommandé de privilégier une caractérisation probabiliste de ces derniers sur la base de la distance d'arrêt (éventuellement l'extension), ce qui implique de remettre en cause certaines habitudes/pratiques, en particulier de ne plus raisonner « à l'envers » en partant d'un scénario « grave » quelconque auquel une probabilité est affectée *ex nihilo*, mais, au contraire, d'estimer l'événement correspondant à la probabilité ciblée (calcul de quantile). Cette approche est effectivement celle des méthodes de type statistique des valeurs extrêmes ou numérique-probabilistes, mais, aussi, implicitement, des méthodes expertes qui définissent l'événement cible à partir du recoupement de différentes sources. Ce schéma ne correspond pas, par contre, à une pratique du type « plus fort événement historique observé » pris en tant que tel comme scénario dimensionnant, approche encore très prégnante dans la pratique et mal distinguée de la précédente (y compris dans le guide MEDDE [2015]) alors qu'elle est conceptuellement très différente ;
- *Prise en compte des spécificités physiques*. Le caractère non Newtonien de la plupart des écoulements gravitaires rapides doit être pris en compte pour évaluer leur dynamique (en particulier, les pressions d'impact) à l'intérieur des extensions retenues. L'occurrence potentielle de

différents types d'écoulements (par exemple, pour les avalanches, phase dense et/ou aérosol, neige sèche ou humide, présence dans l'écoulement de roches, glace ou troncs d'arbre susceptibles de modifier la rhéologie ou les dommages, etc.) ainsi que d'événements rapprochés dans le temps induisant une modification de la topographie et/ou une suraccumulation en zone d'arrêt, doit être, *a minima*, envisagée et, si nécessaire, traitée, par exemple (mais pas nécessairement) avec les outils de calcul et de simulation à présent disponibles ;

- Conformité à l'état de l'art. Plus généralement, les méthodes employées pour l'évaluation des aléas et des dommages potentiels doivent être conformes à l'état de l'art. Cela n'induit pas forcément que les approches les plus sophistiquées soient systématiquement employées, mais que celles bien établies et validées par la communauté internationale scientifique et technique soient privilégiées. Plus précisément, la « riposte graduée » est à encourager, *i.e.* réserver les méthodes les plus complètes mais coûteuses aux sites à forts enjeux et se contenter d'approches (bien) plus simples sur les sites présentant peu ou aucun enjeu ;

- Prise en compte de l'ensemble des informations et traçabilité de leur combinaison via le risque individuel jusqu'au zonage. Il est capital que les aléas puis les zones retenus résultent d'une démarche reproductible assurant l'intégration rigoureuse des connaissances et informations disponibles. Ceci implique une description précise des informations, méthodes et hypothèses utilisées à chaque étape du processus. À ce titre, l'explicitation de la carte de risque individuel avant zonage, pour laquelle cet article milite, constitue un passage essentiel ;

- Robustesse du zonage. La robustesse aux hypothèses les plus critiques (il est toujours nécessaire d'en faire) doit être, *a minima*, réfléchi et, si nécessaire, prise en compte. La définition proposée de la zone bleue comme zone d'incertitude pourrait, à l'avenir, le permettre plus facilement que la doctrine actuelle ;

- Acceptabilité du risque résiduel. Le risque résiduel après zonage doit être évalué, au moins qualitativement, afin de s'assurer que les pertes attendues sur le long terme ne sont pas déraisonnables. Pour ce faire, sa cartographie explicite est, elle aussi, encouragée. Parallèlement, il est sans doute souhaitable de vérifier qu'un événement réellement extraordinaire, du type de celui définissant la zone jaune voire au-delà, n'a pas de conséquences telles que la survie même de la communauté impactée soit mise en jeu.

IV.2. Du travail pour la communauté scientifique

En parallèle, la communauté scientifique a encore devant elle un vaste chantier pour faciliter une mise en œuvre de ce schéma aussi efficace que possible, aussi bien au niveau des briques élémentaires de l'approche que de leur assemblage, et ce via un spectre large de disciplines allant des géosciences aux sciences sociales via l'économie, la modélisation numérique et probabiliste, la psychologie, etc. Le cas des inondations peut rester un modèle où des idées sont à puiser, notamment pour le développement de méthodes spatiales (régionales) d'évaluation des aléas, de même que pour la quantification des différents types de vulnérabilité (sociale, organisationnelle, etc.). Néanmoins, la prise en compte des spécificités des risques en montagne reste indispensable. Pour ce faire, les efforts d'amélioration de l'évaluation du risque individuel au sens d'un taux de destruction ou de décès doivent être poursuivis, de même que l'étude et la comparaison, sur des cas réels, des niveaux d'exposition et

de perception du risque par les personnes exposées. Plus en amont, outre de nombreux développements fondamentaux (codes numériques prenant mieux en compte les rhéologies complexes, modèles probabilistes intégrant les non-stationnarités liées aux changements climatiques, cohérence des développements numérique-probabilistes du point de vue des valeurs extrêmes, etc.) la mise au point d'approches permettant une meilleure incorporation d'informations imparfaites et la propagation des différents types d'incertitudes jusqu'au zonage, et ce, à des coûts de calculs supportables dans la pratique de l'ingénierie, reste nécessaire. De même, la mise en œuvre de travaux approfondis d'inter-comparaison systématique des méthodes d'évaluation de l'aléa, et pourquoi pas, du risque est urgente. À ce titre, la prise en compte de données composites (observations systématiques couplées aux archives historiques et/ou aux données paléoenvironnementales) mérite d'être mise en avant de façon à pallier les insuffisances, notamment en termes de richesse des séries instrumentales disponibles (type EPA). Enfin, pour le zonage lui-même, l'inter-comparaison reste également à mener, non pas du point de vue d'une éventuelle « vérité » mais de celui du compromis social qu'il sous-tend (ce que la société est prête à payer pour une vie sauvée par exemple). Une telle analyse, et notamment le relevé d'inévitables incohérences d'un site et/ou d'un phénomène dommageable à l'autre, constituerait un argument de poids pour accélérer l'évolution nécessaire de la doctrine.

Finalement, il convient de noter que cet article s'est focalisé quasi exclusivement sur le zonage réglementaire de l'espace dans les zones urbanisées ou urbanisables, et que la réflexion mériterait d'être étendue à un cadre plus large. En premier lieu, pour la gestion de l'existant diagnostiqué comme surexposé comme pour l'extension des aires urbaines au-delà des espaces « raisonnablement sûrs », la question des ouvrages est critique, que ce soit du point de vue de leur dimensionnement fonctionnel et structural, de leur maintenance ou de leur impact possible sur le zonage. Vis-à-vis de ce dernier, la doctrine française actuelle est celle de leur « transparence » mais des évolutions sont envisagées sous la forme d'exceptions aux règles d'inconstructibilité, de façon à s'aligner sur la pratique internationale et à mieux faire face à la pression foncière. Un autre point « chaud » est celui de la place des ouvrages dans le compromis social sous la forme de l'analyse coût-bénéfice de leur construction. À ces deux questions, l'approche du zonage présentée dans cet article est susceptible d'apporter dans l'avenir des éléments de réponse pertinents et unifiés, notamment via le passage au risque collectif évalué aux échelles de décision introduit en III.6. En second lieu, il est notable que c'est la question de la gestion temporaire des réseaux de communication, de transport et autres infrastructures critiques qui fait en ce moment actualité et concentre ainsi les difficultés de gestion : crues avalancheuses du Queyras en 2008 et des Pyrénées en 2012 et 2013, accidents ferroviaires et routiers multiples au cours des dernières années liés à des chutes de blocs dans le Vercors, les Alpes de Haute-Provence, etc. Cette question est étroitement liée au problème posé par la gestion temporaire des zones urbanisées, notamment via les PCSs et plus particulièrement pour les zones jaunes nouvellement créées. Une expansion de la réflexion et de l'approche aux enjeux linéaires et/ou aux situations de crise serait donc certainement nécessaire, à partir d'un état actuel en termes de concepts, méthodes, doctrine institutionnelle, etc., à bien des égards encore nettement plus faible que pour l'habitat permanent en zone urbanisée.

V. REMERCIEMENTS

Les méthodes de calcul utilisées dans cet article sont largement issues du projet MOPERA (Modélisation probabiliste pour l'Étude du Risque d'Avalanche - www.avalanches.fr/mopera-projet/) financé par l'ANR sur la période 2009-2014. Le questionnement spécifique de la problématique du zonage s'effectue à présent dans le cadre du projet ZORRINO financé par Irstea et du projet national C2ROP (<http://www.c2rop.fr/>). Les idées développées ont émergé en partie grâce aux discussions menées dans les Cotechs réunis à l'initiative de la DGPR du ministère chargé de l'Environnement. Les auteurs tiennent donc à en remercier l'ensemble des participants. Néanmoins, bien évidemment, le contenu de cet article n'engage que ses auteurs.

VI. RÉFÉRENCES

- ANCEY C., GERVASONI C., MEUNIER M. (2004) — Computing extreme avalanches. *Cold. Reg. Sci. Technol.*, **39**, 161-184.
- ANCEY C. (2013) — Zonage avalanche et outil numérique : point sur un état de l'art. *Laboratoire d'Hydraulique Environnementale*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- ABRUZZESE J. M., SAUTHIER C., LABIOUSE V. (2009) — Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modelling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **9**, 1095-1109.
- ANCEY C. (2012) — Are there dragon-kings events (i.e. genuine outliers) among extreme avalanches? *Eur. Phys. J.* **205(1)**, 117-129.
- ARNALDS P., JONASSON K., SIGURDSON S. T. (2004) — Avalanche hazard zoning in Iceland based on individual risk. *Ann. Glaciol.* **38**, 285-290.
- BARBOLINI M., KEYLOCK C.J. (2002) — A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2**, 239-245.
- BARBOLINI M., CAPPABIANCA F., SAILER R. (2004) — Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. *Atti del convegno Risk Analysis 2004, 27-29 Settembre, Rodi, Grecia*, 533-542.
- BARTELT P., SALM B., GRUBER U. (1999) — Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. *J. Glaciol.* **45**, 242-254.
- BENESTAD R. E. (2004) — Record-values, nonstationarity tests and extreme value distributions. *Global Planet. Change*, **44**, 11-26.
- BERTI M., MARTINA M. L. V., FRANCESCHINI S., PIGNONE S., SIMONI A., PIZZIOLLO M. (2012) — Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *J. Geophys. Res.* **117**: F04006.
- BERTRAND D., NAAIM M., BRUN M. (2010) — Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **10(7)**, 1531-1545.
- BERTRAND M., LIÉBAULT F., PIÉGAY H. (2013) — Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Nat. Haz.* **67(2)**, 497-511.
- BONNEFOY M., BORREL G., RICHARD D., BÉLANGER L., NAAIM M. (2010) — La carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) : enjeux et perspectives. *Sciences Eaux Territoires*, **2**, 6-14.
- BOUROVA E., MALDONADO E., LEROY J. B., ALOUANI R., ECKERT N., BONNEFOY-DEMONGEOT M., DESCHATRES M. (2016) — New web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in France. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **16**, 1205-1216.
- CASSAYRE Y., LAURENS D. (2010) — *Retour d'expérience sur les avalanches de l'hiver 2008-2009*. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, France.
- CAPPABIANCA F., BARBOLINI M., NATALE L. (2008) — Snow avalanche risk assessment and mapping: A new method based on a combination of statistical analysis, avalanche dynamics simulation and empirically-based vulnerability relations integrated in a GIS platform. *Cold Reg. Sci. Technol.* **54**, 193-205.
- CASTEBRUNET H., ECKERT N., GIRAUD G. (2012) — Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps. *Clim. Past.* **8**, 855-875.
- CASTEBRUNET H., ECKERT N., GIRAUD G., DURAND Y., MORIN S. (2014) — Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. *Cryosphere*, **8**, 1673-1697.
- COOLEY D. (2013) — Return periods and return levels under climate change. *Extremes in a changing climate*, 97-114, Springer.
- COLES S. (2001) — *An introduction to statistical modelling of extreme values*. Springer.
- DIMNET E. (2015) — Adaptation d'outils de simulation aux besoins spécifiques de la quantification de l'aléa de chutes de blocs et d'éboulements pour les études fines. *Fiche action A 4.2. Projet National C2ROP – Chutes de blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection*.
- ECKERT N., PARENT E., RICHARD D. (2007a) — Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution. *Cold Reg. Sci. Technol.* **49**, 88-107.
- ECKERT N., PARENT E., BELANGER L., GARCIA S. (2007b) — Hierarchical modelling for spatial analysis of the number of avalanche occurrences at the scale of the township. *Cold Reg. Sci. Technol.* **50**, 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. *Stoch. Env. Res. Risk. A.* **22**, 185-206.
- ECKERT N., PARENT E., FAUG T., NAAIM M. (2009) — Bayesian optimal design of an avalanche dam using a multivariate numerical avalanche model. *Stoch. Env. Res. Risk. A.* **23**, 1123-1141.
- ECKERT N., NAAIM M., PARENT E. (2010a) — Long-term avalanche hazard assessment with a Bayesian depth-averaged propagation model. *J. Glaciol.* **56(198)**, 563-586.
- ECKERT N., PARENT E., KIES R., BAYA H. (2010b) — 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*, **101(3-4)**, 515-553.
- ECKERT N., BAYA H., DESCHÂTRES M. (2010c) — Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France. *J. Climate* **23**, 3157-3180.
- 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. *Cold Reg. Sci. Technol.* **79-80**, 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. *J. Glaciol.* **59(213)**, 93-114
- FAVIER P., BERTRAND D., ECKERT N., NAAIM M. (2014a) — A reliability assessment of physical vulnerability of reinforced concrete walls loaded by snow avalanches. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **14**, 689-704.
- FAVIER P., ECKERT N., BERTRAND D., NAAIM M. (2014b) — Sensitivity of avalanche risk evaluation to vulnerability relations. *Cold Reg. Sci. Technol.* **108**, 163-177.

- FAVIER P., ECKERT N., FAUG T., BERTRAND D., NAAIM M. (2016) — Avalanche risk evaluation and protective dam optimal design using extreme value statistics. *J. Glaciol.* **62(234)**, 725-749.
- FELL R., COROMINAS J., BONNARD C., CASCINI L., LEROI E., SAVAGE W.Z. ON BEHALF OF THE JTC-1 JOINT TECHNICAL COMMITTEE ON LANDSLIDES AND ENGINEERED SLOPES (2008) — Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.* **102(3-4)**, 85-98.
- FUCHS S., MCALPIN M. C. (2005) — The net benefit of public expenditures on avalanche defense structures in the municipality of Davos, Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **5**, 319-330.
- FUCHS S., THÖNI M., MCALPIN M. C., GRUBER U., BRÜNDL M. (2007) — Avalanche hazard mitigation strategies assessed by cost effectiveness analyses and cost benefit analyses—evidence from Davos, Switzerland. *Nat. Haz.* **41(1)**, 113-129.
- GAUME J., CHAMBON G., ECKERT N., NAAIM M. (2012) — Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distribution. *Geophys. Res. Lett.*
- GAUME J., ECKERT N., CHAMBON G., ECKERT N., NAAIM M., BEL, L. (2013) — Mapping extreme snowfalls in the French Alps using Max-Stable processes. *Water Resour. Res.* **49(2)**, 1079-1098.
- GIACONA F., ECKERT N., MARTIN B. (2017) — La construction du risque au prisme territorial : dans l'ombre de l'archétype alpin, les avalanches oubliées de moyenne montagne. *Natures Sciences Sociétés*.
- GLASS B. HUET P., RAT M., TORDJEMAN R. (2000) — *Retour d'expérience sur l'avalanche du 9 février 1999 à Montrroc, commune de Chamonix*. Inspection Générale de l'Environnement, France.
- GROUPE DE TRAVAIL MEZAP DU MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (2014) — *Proposition d'une note technique à l'attention des services déconcentrés de l'Etat en charge des procédures PPRn. Méthodologie de l'élaboration du volet « aléa rocheux » d'un PPRn*. Version du 21/01/2014.
- GRUBER U., BARTELT P. (2007) — Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. *Environ. Modell. Softw.* **22(10)**, 1472-1481.
- IUGS (1997) — Quantitative risk assessment for slopes and landslides — the state of the art. In *Landslide Risk Assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, 19-21 Feb. 1997, Honolulu, Hawaii*, 3-12
- JABOYEDOFF M., DUDT J. P., LABIOUSE V. (2005) — An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **5**, 621-632.
- JONASSON K., SIGURDSON S. T., ARNALDS P. (1999) — *Estimation of Avalanche Risk. Vedurstofu Islands. Reykjavik: VI-R99001-UR01*.
- KEYLOCK C. J. (2005) — An alternative form for the statistical distribution of extreme avalanche runout distances. *Cold Reg. Sci. Technol.* **42**, 185-193.
- KEYLOCK C. J., MCCLUNG, D., MAGNUSSON M. (1999) — Avalanche risk mapping by simulation. *J. Glaciol.* **45 (150)**, 303-314.
- LABIOUSE V., ABBRUZZESE J. M. (2013) — Rockfall Hazard Zoning for Land Use Planning. *Rockfall Engineering*, 211-253.
- LANG M., ARNAUD P., CARREAU J., DEAX N., DEZILEAU L., GARAVAGLIA F., ... & SOUBEYROUX J. M. (2014) — Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes. *Houille Blanche*, **2**, 5-13.
- LAVIGNE A., BEL L., PARENT E., ECKERT N. (2012) — A model for spatio-temporal clustering using multinomial probit regression: application to avalanche counts in the French Alps. *Environmetrics*, **23**, 522-534.
- LAVIGNE A., ECKERT N., BEL L., PARENT E. (2015) — Adding expert contribution to the spatio-temporal modeling of avalanche activity under different climatic influences. *J. Roy. Stat. Soc. C.* **64**, 651-671.
- LAVIGNE A., ECKERT N., BEL L., DESCHÂTRES M., PARENT E. (2017) — Modelling the spatio-temporal repartition of right-truncated data : application to avalanche runout altitudes in Haute-Savoie. *Stoch. Env. Res. Risk. A.* **31(3)**, 629-644.
- LAVIGNE A., ECKERT N., BEL L., PARENT E. (soumis) — Bayesian spatio-temporal evaluation of snow avalanche return periods. *J. Glaciol.*
- LE COURRIER DES MAIRES (2015) — Risque d'avalanche : des outils pour élaborer le PPRN et mieux maîtriser l'aléa. *Le courrier des maires et des élus locaux*. Edition du 23 octobre 2015.
- LE GALLOU J. Y., GUIGNARD P. (2011) — *Modalités de prise en compte des avalanches exceptionnelles pour améliorer la prévention des risques et renforcer la sécurité des personnes*. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable et Inspection Générale de l'Administration, France.
- MAGGIONI M., GRUBER U. (2003) — The influence of topographic parameters on avalanche release and frequency. *Cold Reg. Sci. Technol.* **37**, 407-419.
- MCCLUNG D., LIED K. (1987) — Statistical and geometrical definition of snow-avalanche runout. *Cold Reg. Sci. Technol.* **13**, 107-119.
- MCCLUNG D., MEARS A. I., SCHEARER, P. (1989) — Extreme avalanche run-out: Data from four mountain ranges. *Ann. Glaciol.* **13**, 180-185.
- MCCLUNG D. (2001) — Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models. *Can. Geotech. J.* **38**, 1254-1265.
- MEDDE (2015a) — *Plans de Prévention des Risques Naturels, risques d'avalanches. Guide Méthodologique*. Version aout 2015.
- MEDDE (2015b) — *Guide pratique Versants rocheux : Phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion*.
- MEUNIER M., ANCEY C. (2004) — Towards a conceptual approach to predetermining high-return-period avalanche run-out distances. *J. Glaciol.* **50(169)**, 268-278.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT (1997) — *Guide général. Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR)*. La Documentation française.
- MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (1999a) — *Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques d'inondation. Guide méthodologique*. La Documentation française.
- MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT, MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (1999b) — *Plans de prévention des risques naturels (PPR). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique*. La Documentation française.
- MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DU TOURISME ET DE LA MER, MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (2005) — *Information des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur les risques naturels et technologiques*. Circulaire du 27 mai 2005.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'AMÉNAGEMENT DURABLES (2006) — *Le PPR : un outil pour une stratégie globale de prévention Direction de la Préventions des Pollutions et des Risques*.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE (2006) — *Plans de Prévention des Risques Naturels. Les crues et torrents de montagne*. Version provisoire du 6 octobre 2008.
- MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT (2011) — *Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel*.

- Direction Générale de la Prévention des Risques – DGPR
Direction Générale de l’Aménagement, du Logement et de la Nature – DGALN.
- MINISTÈRE DE L’ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L’ÉNERGIE (2012) — *Circulaire du 16 juillet 2012 relative à la mise en œuvre de la phase « cartographie » de la directive européenne relative à l’évaluation et à la gestion des risques d’inondation*. MEDDE – METL, **2012/14**, 101-140.
- MOUGIN P. (1922) — *Les avalanches en Savoie*. Ministère de l’Agriculture, Direction Générale des Eaux et Forêts, Service des Grandes Forces Hydrauliques, Paris, 175–317.
- NAAIM M., NAAIM-BOUVET F., FAUG T., BOUCHET A. (2004) — Dense snow avalanche modelling: flow, erosion, deposition and obstacle effects. *Cold Reg. Sci. Technol.* **39**, 193-204.
- NAAIM M., FAUG T., THIBERT E., ECKERT N., CHAMBON G., NAAIM F. (2008) — Snow avalanche pressure on obstacles. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Whistler. Canada. September 21st-28th 2008*.
- NAAIM M., FAUG T., NAAIM F., ECKERT N. (2010) — Return period calculation and passive structure design at Tacconnaz avalanche path, France. *Ann. Glaciol.* **51(54)**, 89-97.
- NAAIM M., DURAND Y., ECKERT N., CHAMBON G. (2013) — Dense avalanche friction coefficients : influence of physical properties of snow. *J. Glaciol.* **59(216)**, 771-782.
- NAAIM M., ECKERT N., GIRAUD G., FAUG T., CHAMBON G., NAAIM-BOUVET F., RICHARD D. (2016) — Impact du réchauffement climatique sur l’activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises. *La Houille Blanche*, **6**, 12-20.
- ONF-RTM, IRSTEA (2013) — *L’apport de la modélisation numérique pour la cartographie des aléas d’avalanche à visée réglementaire*. Note pour la DGPR. Version mars 2013.
- OUSSET I., BERTRAND D., BRUN M., THIBERT E., LIMAM A., NAAIM M. (2015) — Static and dynamic FE analysis of an RC protective structure dedicated to snow avalanche mitigation. *Cold Reg. Sci. Technol.* **112**, 95-111.
- PARLEMENT EUROPÉEN, CONSEIL EUROPÉEN (2007) — Directive n° 2007/60/CE du 23/10/07 relative à l’évaluation et à la gestion des risques d’inondation. *Journal officiel de l’Union Européenne*, **L288**, 27-34.
- RAPIN F., MEUNIER M., BOLOGNESI R. (2004) — Une nouvelle méthode d’identification des sites à haut risque d’avalanche. *Ingénieries-EAT*, **39**, 43-53.
- RAPIN F. (2015) — Utilisation des SSAH Sites Sensibles aux Avalanches, Habités. Appui méthodologique. *Convention MEDDE – DGPR / SRNH 2014. Action n° 5.4 – risques naturels terrestres : avalanches*.
- READ L. K., VOGEL R. M. (2015) — Reliability, return periods, and risk under nonstationarity. *Water Resour. Res.* **51**, 6381–6398.
- SALAS J., OBEYSEKERA J. (2014) — Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Nonstationary Hydrologic Extreme Events. *J. Hydrol. Eng.* **19(3)**, 554-568.
- SALM B., BURKARD A., GUBLER H.U. (1990) — *Calcul des avalanches : une méthode pour le praticien avec des exemples*. Communication de l’institut fédéral suisse pour l’étude de la neige et des avalanches, C. Ancey traducteur.
- SALVADORI G., DE MICHELE C., DURANTE F. (2011) — On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**, 3293-3305.
- SALVADORI G., DURANTE F., DE MICHELE C. (2013) — Multivariate return period calculation via survival functions. *Water Resour. Res.* **49(4)**, 2308–2311.
- SAUNIER J. (1970) — *Rapport de la commission interministérielle d’enquête sur la catastrophe de Val d’Isère le 10 février 1970*. Secrétariat général du comité interministériel pour l’information.
- SCHLÄPPY R., ECKERT N., JOMELLI V., STOFFEL M., GRANCHER D., BRUNSTEIN D., NAAIM M., DESCHATRES M. (2014) — Validation of extreme snow avalanches and related return periods derived from a statistical-dynamical model using tree-ring based techniques. *Cold Reg. Sci. Technol.* **99**, 12-26.
- SCHWEIZER J., STOFFEL L., MITTERER C. (2009) — On forecasting large and infrequent snow avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.* **59(2-3)**, 234-241.
- SIGURDSSON S., JONASSON K., ARNALDS K. (1998) — Transferring avalanches between paths. Proceedings of the anniversary conference 25 years of snow avalanche research, Voss, 12-16 May. Norwegian Geotechnical Institute publication, **203**, 259-263.
- SORNETTE D. (2009) — Dragon-Kings, Black Swans and the prediction of Crises. *Int. J. Terraspace Sci. Eng.* **1(3)**, 1-17.
- SOVILLA B., SCHAER M., KERN M., BARTELT P. (2008) — Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallée de la Sionne test site. *J. Geophys. Res.* **113**, F01010.
- WILHELM C. (1998) — Quantitative risk analysis for evaluation of avalanche protection projects. Proc. of 25 Years of Snow Avalanche Research, Voss, Norway, 12–16 May. Norwegian Geotechnical Institute Publications, **203**, 288-293.

VII. ANNEXE : MODÈLES UTILES À LA CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA PROBABILISÉ

Cet appendice décrit brièvement les grandes classes de modèles évoqués dans l'article. L'unité de recherche Erosion Torrentielle Neige et Avalanche (ETNA) d'Irstea diffuse librement les outils permettant de les implémenter, notamment via des sessions de formation occasionnelles. Ces derniers ont été utilisés pour l'obtention des résultats présentés pour le cas d'étude.

VII.1. Modèles probabilistes

Les distances d'arrêt élevées des avalanches se modélisent avec les lois de probabilité dont l'usage est justifié par la statistique des valeurs extrêmes : loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV) pour un échantillon de maxima, et loi de Pareto généralisée (GPD) associée à un processus Poissonien d'occurrence pour les dépassements de seuil (modèle Peak Over Threshold - POT, [Pickands, 1975]). Le modèle POT est particulièrement bien adapté à l'EPA puisque les observations y sont, par nature, des dépassements de seuil (d'observation). En pratique, bien que ce type de modèle soit effectivement destiné à permettre l'extrapolation au-delà des plus fortes valeurs observées, il conviendra tout de même de manier les résultats fournis avec prudence dans la mesure où ces derniers ne tiennent pas explicitement compte de la morphologie de la zone d'arrêt. Par exemple, une extrapolation « régulière » n'a aucun sens si un couloir vient buter brutalement sur une falaise.

Le modèle POT a trois paramètres (forme et échelle pour la loi GPD, intensité du processus de Poisson), en plus du seuil. Il recouvre en fait trois types de comportements des queues de distribution déterminés par les valeurs du paramètre de forme de la loi GPD : explosif (domaine de Fréchet, paramètre de forme positif), régulier (domaine de Gumbel, correspond au cas limite du paramètre de forme nul pour lequel la loi GPD est simplement la loi exponentielle), et borné (domaine de Weibull). Le modèle POT (GPD ou Exponentiel) est inversible, donnant accès directement au niveau de retour (quantile) correspondant à n'importe quelle période de retour. L'estimation des paramètres de la loi GPD sur des données doit être fait numériquement dans le cas général (maximisation de la vraisemblance, calcul bayésien, etc.), tandis qu'une solution analytique existe dans le cas exponentiel. La répercussion de l'erreur d'estimation sur les niveaux de retour se fait via des méthodes de propagation d'incertitude de type « delta », ou par le calcul de lois prédictives bayésiennes [Coles, 2001].

On notera également que ce type de modèle est souvent regroupé, dans la littérature du domaine, avec les relations empiriques de type « α/β » [Lied et Bakkehoi, 1980] ou « de ligne d'énergie » sous le vocable « modèles statistiques ». Ces derniers prédisent une distance (ou un angle) d'arrêt en fonction des caractéristiques topographiques du site. Ils sont donc radicalement différents d'un modèle probabiliste : il s'agit en effet de relations, certes résultant d'un calage sur des données, mais entièrement déterministes, sur lesquelles on répercute éventuellement une erreur d'estimation. Ainsi, comme les modèles de dynamique décrits ci-dessous (et dont ils représentent en quelque sorte une version ultra simplifiée), ils ne fournissent pas, à eux seuls, d'aléas probabilisés (ce qui n'exclut pas, cependant, qu'ils puissent se révéler utile, notamment pour se faire une première idée du fonctionnement d'un site).

VII.2. Modèles de dynamique des avalanches

La plupart des modèles numériques de dynamique des avalanches sont construits sur des équations déclinant les deux principes fondamentaux de la mécanique, que sont la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ces principes sont appliqués en considérant des grandeurs intégrées sur l'épaisseur de l'écoulement ou sur tout le volume de l'avalanche et sont complétés par des lois de frottement rendant compte du comportement mécanique de la neige en écoulement. En fonction du niveau d'intégration, du type d'avalanches (dense, aérosol ou mixte), des modèles de comportement et des méthodes de résolution adoptés, on trouve de nombreux modèles utilisés en expertise et, plus encore, dans le domaine de la recherche (voir [Harbitz, 1999] pour une revue exhaustive, hélas non tenue à jour). Ci-dessous sont décrites rapidement les deux classes de modèles les plus facilement utilisables en pratique.

VII.2.1. Modèles « centre de masse »

Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont appliquées au volume de l'avalanche considérée comme un bloc. Les interactions avec le sol et l'air environnant sont modélisées en termes de forces et d'échanges de masse. Dans ces modèles, les grandeurs considérées sont le volume et la vitesse du centre de gravité de l'avalanche. Ce type de modèle permet de simuler la trajectoire et les évolutions en fonction de la distance parcourue, du volume et de la vitesse sur l'ensemble du parcours.

Pour les avalanches denses, les versions les plus utilisées considèrent l'avalanche comme un bloc rigide de volume constant. Dans ce cas, le volume initial doit être défini et devient un des paramètres du modèle. L'influence de l'air est négligée et le coefficient de frottement avec le substrat est, dans la formulation de Voellmy [1953], la somme d'une valeur constante et d'une fonction proportionnelle au carré de la vitesse et inversement proportionnelle au produit de l'épaisseur moyenne par un coefficient de frottement dynamique.

Pour les avalanches aérosols, considérées comme des écoulements d'une suspension turbulente, le frottement avec l'air et avec le substratum ainsi que le taux d'incorporation de l'air sont proportionnels au carré de la vitesse. Les modèles existants sont calibrés sur des données issues d'expérimentation en laboratoire sur les courants de turbidité [Beghin *et al.*, 1981].

Dans les deux cas, trois paramètres sont à spécifier et les modèles existants peuvent être utilisés sur un profil topographique unidimensionnel ou sur un modèle numérique du terrain. Des versions plus complexes existent, prenant en compte l'érosion ou le dépôt de la neige, mais leur utilisation dans la pratique est beaucoup moins répandue.

VII.2.2. Modèles moyennés sur l'épaisseur (formalisme de Saint-Venant)

La seconde classe de modèles dynamiques considère l'avalanche comme un fluide en écoulement. L'hypothèse selon laquelle la longueur de l'écoulement est beaucoup plus grande que son épaisseur est adoptée. Elle permet d'écrire les principes de conservation en utilisant comme inconnue du problème l'épaisseur et la vitesse moyenne sur l'épaisseur de l'écoulement. Ces deux grandeurs varient dans le temps et dans l'espace. Certains modèles prennent en compte l'érosion et le dépôt, et d'autres considèrent le volume de l'avalanche comme constant tout le long de l'écoulement (*e.g.*, [Naaim *et al.*, 2004]).

Les lois de frottement dans ces modèles ont presque toujours la même forme que celles utilisées dans les modèles centre de masse mais, pour une même avalanche, les valeurs de paramètres sont en général différentes entre les deux classes de modèles. En complément, la répartition verticale de la vitesse et le mode de transfert de la contrainte verticale en contrainte horizontale introduisent deux paramètres supplémentaires qui sont la plupart du temps supposés constants et égaux à 1.

Ces modèles peuvent, comme les modèles « centre de masse », s'appliquer sur un profil unidimensionnel ou sur un modèle numérique du terrain. Les données d'entrée nécessaires sont la répartition de la neige dans la zone de départ, et dans le reste du couloir si l'érosion est prise en compte. Les valeurs des paramètres de frottement plus, éventuellement, les paramètres de répartition verticale de vitesse et de transfert des contraintes, sont à spécifier.

VII.3. Modèles numérique-probabilistes et analyse de sensibilité/incertitude

VII.3.1. Modèle numérique-probabiliste (ou statistique - dynamique)

Un modèle numérique-probabiliste n'est rien de plus qu'un modèle de propagation déterministe alimenté avec des données d'entrées tirées dans des distributions aléatoires supposées parfaitement identifiées, par exemple des lois gaussiennes pour les paramètres de frottement et des lois des Gamma ou des extrêmes pour les hauteurs de départ. Par simulation, ils permettent de reconstituer la distribution des distances d'arrêt et des autres variables de sortie. Outre l'obtention aisée d'avalanches de période de retour élevée, et ainsi la caractérisation « complète » des scénarii « de référence » et « rare », les applications de tels modèles sont très nombreuses : calcul de risque, dimensionnement d'ouvrages, quantification du risque résiduel. En contrepartie, les résultats obtenus sont étroitement dépendants des hypothèses probabilistes effectuées, notamment le choix des distributions des données d'entrée et de leurs éventuelles corrélations.

Comme pour les modèles plus simples, ces modèles requièrent une calibration sur le site d'étude pour être performants. Pour ce faire, les méthodes bayésiennes semblent à l'heure actuelle les plus appropriées, tout en autorisant la prise en compte d'information « experte » extérieure aux données et la mise en œuvre de simulations prédictives donnant accès à l'incertitude sur les niveaux de retour [Eckert *et al.*, 2008]. En contrepartie, leur mise en œuvre reste complexe et très coûteuse en temps calcul.

VII.3.2. Analyse de sensibilité / d'incertitude

Le cadre formel de la modélisation numérique-probabiliste est, d'un point de vue mathématique, exactement celui de l'analyse de sensibilité ou d'incertitude : un code numérique

(centre de masse, équations de Saint Venant, etc.) alimenté par des entrées aléatoires. Ainsi les outils techniques (schémas numériques) et les contraintes (nombre d'itérations pour atteindre la convergence, etc.) sont identiques. La différence majeure se situe au niveau de ce qui est modélisé de façon aléatoire : une variabilité potentielle complète sur le site d'étude pour une modélisation numérique-probabiliste versus une évaluation de l'aléa rendant plus objectivement compte de la connaissance disponible qu'avec une valeur unique dans une analyse de sensibilité/incertitude. Une analyse de sensibilité classique consiste par exemple à assortir la valeur la plus probable pour un scénario de référence d'une incertitude de type gaussienne centrée sur la valeur de référence. À l'analyse de sensibilité sont généralement associés des outils de type indices de Sobol permettant, par décomposition de la variance, l'estimation de l'importance relative des différentes variables d'entrées (*e.g.*, [Saltelli *et al.*, 2010]). Notons toutefois que cette définition correspond au sens strict de l'analyse de sensibilité, et que l'on utilise également ce vocable pour toute investigation de l'évolution des résultats avec les hypothèses de travail (modélisation, méthode de résolution, données disponibles, etc.).

Références

- BEGHIN P., HOPFINGER E. J., BRITTER R. E. (1981) — Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries. *J. Fluid. Mech.*, **107**, 407-422.
- ECKERT N., PARENT E., NAAIM M., RICHARD D. (2008) — Bayesian stochastic modelling for avalanche predetermination: from a general system framework to return period computations. *Stoch. Env. Res. Risk. A*, **22**, 185-206.
- COLES S. (2001) — *An introduction to statistical modelling of extreme values*. Springer.
- HARBITZ K. (1999) — *A survey of computational models for snow avalanche motion*. Fourth European Framework. Programme (ENV4-CT96-0258) Avalanche Modelling, Mapping and Warning In Europe.
- LIED K., BAKKEHOI S. (1980) — Empirical calculations of snow-avalanche run-out distances based on topographic parameters. *J. Glaciol.*, **26(94)**, 165-176.
- NAAIM M., NAAIM-BOUVET F., FAUG T., BOUCHET A. (2004) — Dense snow avalanche modelling: flow, erosion, deposition and obstacle effects. *Cold. Reg. Sci. Technol.*, **39**, 193-204.
- PICKANDS J. (1975) — Statistical inference using extreme order statistics. *Ann. Stat.*, **3**, 11-130.
- SALTELLI A., ANNONI P., AZZINI I., CAMPOLONGO F., RAITO M., TARANTOLA S. (2010) — Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Phys. Commun.*, **181**, 259-270.
- VOELLMY A. (1955) — Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, **73(12)**, 159-162, 212-217, 246-249, 280-285.