



HAL
open science

Les réseaux de transport routiers face aux laves torrentielles : contribution à l'évaluation du risque : l'exemple des Alpes françaises

Marina Utasse

► To cite this version:

Marina Utasse. Les réseaux de transport routiers face aux laves torrentielles : contribution à l'évaluation du risque : l'exemple des Alpes françaises. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2015. Français. NNT : 2015PA010702 . tel-02495742

HAL Id: tel-02495742

<https://theses.hal.science/tel-02495742v1>

Submitted on 2 Mar 2020

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.



UNIVERSITÉ PARIS 1 – PANTHÉON SORBONNE

ÉCOLE DOCTORALE DE GÉOGRAPHIE
Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591 CNRS

Doctorat de Géographie

UTASSE Marina

Les réseaux de transport routiers face aux laves torrentielles,
contribution à l'évaluation du risque :
l'exemple des Alpes françaises

Thèse dirigée par : DR. Vincent JOMELLI et Pr. Frédéric LÉONE

Soutenue publiquement le 10 novembre 2015

Devant le Jury constitué de :

M. Vincent Jomelli, Directeur de Recherche, LGP-CNRS

M. Frédéric Léone, Professeur, Université Montpellier III Paul Valéry

M. Pierre Pech, Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Mme. Céline Lutoff, Maître de Conférence, Université Grenoble Joseph Fourier

M. Laurent Chapelon, Professeur, Université Montpellier III Paul Valéry

M. Frédéric Liébault, Chargé de Recherches, IRSTEA Grenoble

Directeur de thèse

Co-Directeur de thèse

Président du Jury

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

A mes trois parents qui m'ont transmis la passion des Sciences...



La route départementale D1091 en mai 2008 lors d'un évènement torrentiel sur le Rif Blanc (Hautes-Alpes, France)

« L'importance des réseaux explique en grande partie que nos sociétés se considèrent comme particulièrement vulnérables » (Roncayolo, 1990)

Sommaire	2
Résumé/Abstract.....	3
Remerciements	4
Introduction Générale.....	7
Chapitre 1 – La vulnérabilité des réseaux de transport routier : Aspects généraux.....	10
Chapitre 2 – Laves torrentielles et réseau routier alpin : Une situation représentative du Risque-Réseau	44
Chapitre 3 – Occurrence des précipitations et évènements torrentiels dommageables	110
Chapitre 4 – La modélisation des écoulements torrentiels comme indicateur d’impact réseau	141
Chapitre 5 – Les acteurs institutionnels du risque-réseau : Décryptage des protocoles de gestion de crise	185
Chapitre - 6 : Les pertes d’accessibilité territoriale comme outils de mesure de la vulnérabilité indirecte du réseau.....	224
Conclusion Générale.....	255
Références bibliographiques	261
Glossaire et abréviations	289
Table des Matières	292
Table des Figures.....	297
Table des Tableaux	303
Table des Annexes.....	305
Annexes	306

Résumé

Les Alpes sont très impactées par les laves torrentielles déclenchées par de fortes pluies et la fonte des neiges. Certains événements dommageables au réseau de transport ont entraîné d'importantes répercussions socio-économiques. En raison de l'enclavement de nombreuses vallées dans les Alpes, la perturbation des réseaux routiers n'affecte pas seulement la zone endommagée, mais s'étend à tous les domaines et les activités qui en dépendent.

L'objectif de cette thèse était de mener une analyse systémique du risque-réseau articulée autour de toutes les étapes du risque. Nous avons retenu trois bassins-versants situés sur des axes routiers à fort enjeux territoriaux dans les Alpes françaises. La méthode combinait plusieurs approches : 1) une analyse statistique des pluies associée aux événements dommageables, 2) la modélisation des écoulements torrentiels liée à l'endommagement physique, 3) la comparaison des protocoles de gestion de crise routière théorique avec la réalité du terrain à la suite d'un événement dommageable, 4) la modélisation des perturbations fonctionnelles au-delà de la zone impactée.

Cette thèse a mis en évidence les facteurs aggravants de vulnérabilité structurelle du réseau ; elle explique la planification des actions mise en place lors de l'évènement dommageable sur le Rif Blanc le 4 juin 2012. Enfin, elle a permis d'estimer les pertes d'accessibilité territoriale à différentes échelles spatiales.

Abstract

The Alps are highly impacted by debris-flows triggered by heavy rainfall and snowmelt. Such damaging events to transportation networks caused important socio-economic impacts. Owing to many landlocked valleys in the Alps, the disturbance of road networks does not just affect the damaged area, but extends to all reliant areas and activities.

The objective of this thesis was to conduct a systemic analysis of the risk-network structured around every steps of the risk. We selected three catchments located on roads with high territorial issues in the French Alps. The method combined several approaches: 1) a statistical rainfall analysis associated with damaging events, 2) a torrential flows modeling related to physical damage, 3) a comparison of theoretical road crisis management protocols with real crisis management following a damaging event, 4) functional disturbances beyond the impacted area.

This thesis has highlighted the factors aggravating structural vulnerability of the network; it explains the action planning establishing during the damaging event on the Rif Blanc June 4, 2012. Finally, it was estimated the territorial losses of accessibility at various spatial scales.

Remerciements

C'est au moment d'écrire les dernières lignes de cette thèse que je m'apprête à faire le bilan de ces quatre années passées au Laboratoire de Géographie Physique – CNRS UMR 8591 de Meudon-Bellevue. J'étais loin d'imaginer que ce Doctorat s'apparenterait à une épreuve quasi marathonnienne, quelle expérience !

Il est temps de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail :

Je tiens à remercier en tout premier lieu Vincent Jomelli, tour à tour Directeur de Mémoire de Master II puis Directeur de Thèse, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche à deux reprises et pour m'avoir fait confiance pendant ces quatre années de Doctorat. Je le remercie pour sa rigueur scientifique et pour son accompagnement sur le terrain en toute circonstance, j'ai particulièrement adoré les cours de Géomorphologie Glaciaire en live, domaine où j'étais totalement néophyte. Je le remercie pour les orientations méthodologiques et pour son appui sur les choix stratégiques auxquels j'ai été confrontée au cours de ce travail. Je le remercie également pour sa patience souvent mise à rude épreuve et pour la relecture attentive de ce manuscrit : *Gracias*.

Je tiens également à remercier Frédéric Léone, Co-Directeur de cette thèse, pour m'avoir accordé sa confiance dans l'accomplissement de ce travail. Je le remercie pour les réponses éclairées à mes nombreuses interrogations et pour ses précieux conseils. Je le remercie également pour la mise à disposition du support méthodologique en début de thèse, me permettant de mettre le pied à l'étrier et de mieux cerner mon sujet.

Un grand merci aux membres du Jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail : M. Le Professeur Pierre Pech, M. Le Professeur Laurent Chapelon, Mme. Céline Lutoff, Maître de Conférence et M. Frédéric Liébault, Chargé de Recherches.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Delphine Grancher qui m'a beaucoup aidée pour mes travaux. Je la remercie pour ses remarques toujours pertinentes qui m'ont fait rendre compte d'évidences là où je ne voyais que du brouillard et pour son suivi sans faille tout au long de ce travail. Je la remercie également pour la relecture attentive de ce manuscrit.

Je tiens à remercier chaleureusement Daniel Brunstein pour son aide précieuse sur les SIG, pour ses conseils avisés et son calme. Je le remercie pour m'avoir soutenu lorsque je faisais face à un obstacle, la leçon est désormais retenue : « *ne pas se construire de murs en briques en cas de stress et de difficultés (...) à chaque problème existe une solution* », prendre du recul et relativiser.

Je remercie Irina Pavlova, pour son appui scientifique, technique et méthodologique indispensable à ce travail. Mais je la remercie surtout pour son soutien, sa motivation et sa bonne humeur tout au long de ces quatre années.

Je remercie vivement Clément Virmoux, pour son aide et sa disponibilité sur la compréhension de *VisualSFM*. Mais aussi pour m'avoir sauvé dans ma quête éperdue d'un MNT à haute résolution.

Je remercie très chaleureusement l'ensemble des membres du Laboratoire de Géographie Physique. Je pense à Franck Lavigne et à Catherine Kuzucuoglu pour leur accueil et leurs conseils avisés. Un grand merci à Michelle Pennec pour son aide logistique indispensable, je remercie également Claude Legentil pour m'avoir sorti de galères informatiques un nombre incalculable de fois. Je remercie Marie Chenet pour la réalisation d'un petit film pédagogique sur le sujet. Enfin, je remercie Patrick Wassmer sans qui toute cette aventure au LGP n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier toutes les instances administratives qui ont largement contribué à cette thèse, pour leur accueil et leur disponibilité. En premier lieu je remercie le service RTM pour la mise à disposition de la base de données *Évènement*, si précieuse. Je remercie le Conseil Général des Hautes-Alpes et l'Agence Territoriale Nord pour la mise à disposition des bases de données sur les réseaux, pour leurs explications et leur convivialité. Je remercie le

BGHM, le PGHM et le SDIS 05 pour leurs renseignements clairs et concis. Je remercie également les agents communaux, les archives départementales, la CIM et l'IGN pour la mise à disposition d'informations sur ce « *drôle de sujet* ».

Je tiens à remercier les équipes Italienne et Suisse du projet ARNICA pour leur contribution à ce travail. Merci à Marco Borga pour m'avoir accueilli quelques jours au sein de son équipe de recherche. Je remercie particulièrement Paolo Tarolli pour ses conseils, son humour et ses idées brillantes sur l'analyse de l'aléa.

Je tiens à remercier tous les doctorants avec qui j'ai partagé la salle info au sous-sol, véritable sanctuaire des thésards. Merci à Édouard de Bélizal pour les longues discussions sur le chemin de la fac et pour m'avoir aidé à endosser le rôle de prof le temps de quelques vacances. Merci à Salomé Granai pour son écoute ainsi que pour les débats enflammés. Je remercie également Estu Mei pour m'avoir consacré du temps lors de la modélisation des réseaux. Mes remerciements vont également à : Romain, Valentina, Marion, Thomas, Anne-Kiria, Antoine et tous les autres qui ont largement contribué à cette ambiance conviviale.

Je remercie Alexandre Mathieu pour son aide bienvenue lors de l'utilisation du langage *PCRaster* et pour son soutien moral en pleine tempête. Je remercie également Jessica Veyron et Laurine Perche pour leur contribution à ce travail et pour leur accompagnement durant quelques mois.

Je remercie le *LARAM School* d'avoir retenu ma candidature, cette expérience fut riche d'enseignements mais aussi en rencontres amicales : Siobhan, Jack, Ehsan, Tina, Marcelo, Timo... Je pense à vous « *swag* ».

Je tiens à remercier Fédé.adrien pour son aide précieuse dans les derniers instants de la thèse, pour son soutien et ses encouragements.

Enfin, je remercie mes trois parents et mon petit frère pour avoir cru en moi, pour leur motivation, leur soutien indéfectible et leurs encouragements. Bon maintenant, c'est à vous de la lire cette thèse...

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le projet européen CIRCLE-2 MONTAGNE : ARNICA (*Assessment of Risks on transportation Networks resulting from slope Instability and Climate change in the Alps, 2011-2013*) dans lequel a participé le Laboratoire de Géographie Physique de Meudon-Bellevue – UMR 8591 CNRS. Ce projet impliquait trois autres partenaires, à savoir : l'Université de Padoue (UNIPAD) en Italie, le laboratoire de dendrogéomorphologie (DENDROLAB) de Berne en Suisse et le laboratoire Wegener Center-Université (WEGCENTER) de Graz en Autriche. L'objectif principal de ce projet pluridisciplinaire était de déterminer les impacts potentiels du changement climatique futur sur l'activité des laves torrentielles/glissements de terrain dans les Alpes et leurs effets sur les réseaux de transport, composante essentielle de l'activité économique de ces régions.

La contribution d'UNIPAD a porté sur l'analyse des conditions de stabilité des versants soumis aux glissements superficiels selon des scénarii de précipitations portant sur la période actuelle et future. Ils ont également intégré la réactivité des glissements de terrain dans l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux de transport. Le laboratoire DENDROLAB a construit une base de données dans la vallée de Zermatt en Suisse, à partir d'une analyse des impacts laissés sur les arbres par le passage des laves torrentielles. Le laboratoire WEGCENTER s'est concentré sur les variables climatiques potentielles intervenant dans le déclenchement des événements. Enfin, l'équipe du LGP coordinatrice du projet s'est surtout intéressée à la caractérisation des impacts du changement climatique sur les laves torrentielles dans les Alpes françaises et plus particulièrement sur les conséquences sur le réseau routier.

Les Alpes sont très impactées par les laves torrentielles déclenchées par de fortes pluies et la fonte des neiges. Certains événements dommageables au réseau de transport ont entraîné d'importantes répercussions socio-économiques. En raison de l'enclavement de nombreuses vallées dans les Alpes, la perturbation des réseaux routiers n'affecte pas seulement la zone endommagée, mais s'étend à tous les domaines et les activités qui en dépendent. Si les méthodes d'évaluation des aléas sont bien standardisées, celles s'appliquant aux vulnérabilités manquent encore de lisibilité (Léone, 2008). Cette situation est particulièrement valable pour l'étude des réseaux de transport (Winter et al., 2013).

Aussi, nous proposons à travers ce travail de thèse d'associer les différentes étapes du risque dans une problématique commune appliquée à un réseau. Cette étude s'appuie sur une approche intégrée du risque afin de rendre compte de la vulnérabilité des réseaux de transports routiers alpins vis-à-vis des événements lave torrentielle. Cette recherche est motivée par :

- i. Un territoire naturellement contraint par le relief, où l'activité économique est fortement dépendante de la viabilité des réseaux de transports terrestres.
- ii. Un réseau routier peu connexe et très exposé à l'aléa lave torrentielle, où les pics de fréquentation coïncident avec la période d'activité des torrents.
- iii. L'évènement dommageable du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc survenu au cours de cette recherche, nous a permis de fournir une étude de cas pour comprendre et pour analyser une gestion de crise routière.
- iv. Cette recherche s'inscrit dans un cadre scientifique plus large et novateur, où émerge des programmes de recherche internationaux sur les Alpes, davantage orientés sur l'aspect vulnérabilité humaine et/ou des infrastructures plutôt que sur l'aspect aléa (ARNICA, ChangingRISKS, CHANGES Project, PARAMount, etc.).

La thèse se structure de la manière suivante :

L'introduction générale présente le projet de recherche dans lequel s'insère ce travail, le contexte général de l'étude, ses objectifs et le plan de la thèse.

Le **chapitre 1** intitulé « **La vulnérabilité des réseaux de transport routier : aspects généraux** » s'attache à rappeler succinctement la notion de risque. Sur cette base, nous définissons le concept de vulnérabilité spécifique au réseau de transport. Ensuite nous détaillons les processus de dysfonctionnement du réseau et ses modes d'endommagement. Enfin, nous réalisons un état de l'art des études croisant la vulnérabilité des réseaux de transport avec les différents aléas naturels pour conclure sur les laves torrentielles.

Le **chapitre 2** intitulé « **Laves torrentielles et réseau routier alpin : une situation représentative du Risque-Réseau** » expose les cadres conceptuels et terminologiques de l'aléa lave torrentielle. Puis cette étude s'intéresse à l'interaction entre la dynamique torrentielle et les enjeux réseaux situés dans les Alpes françaises. Enfin nous présentons les sites retenus pour ce travail.

Le **chapitre 3** intitulé « **Occurrence des précipitations et évènements torrentiels dommageables** » se consacre à la relation étroite entre l'intensité/durée des précipitations et le déclenchement des évènements. Il cherche à confirmer ou à infirmer le lien entre l'activité torrentielle et l'intensité des dommages au réseau routier.

Le **chapitre 4** intitulé « **La modélisation des écoulements torrentiels comme indicateur d'impact réseau** » utilise la modélisation numérique 2D pour simuler les évènements torrentiels dommageables, afin de fournir des éléments de réponse à la vulnérabilité structurelle du réseau routier. Les simulations permettent également d'estimer les seuils volumiques nécessaires pour qu'une lave torrentielle soit en mesure d'impacter le dit réseau.

Le **chapitre 5** intitulé « **Les acteurs institutionnels du risque-réseau : décryptage des protocoles de gestion de crise** » s'applique à mieux comprendre les processus décisionnels et opérationnels qui régissent une gestion de crise routière. L'analyse repose sur la comparaison entre la gestion de crise théorique telle qu'elle est présentée par les sources gouvernementales avec la reconstitution de l'évènement dommageable du 4 juin 2012 (torrent du Rif Blanc - Hautes-Alpes) en se basant sur une enquête de terrain auprès des acteurs-clés.

Le **chapitre 6** intitulé « **Les pertes d'accessibilité territoriale comme outils de mesure de la vulnérabilité indirecte du réseau** » vise à représenter les conséquences fonctionnelles et territoriales d'une rupture de réseau provoquée par un évènement torrentiel. La modélisation numérique de la dégradation de l'accessibilité routière permet ici de mesurer l'étendue spatiale et temporelle des perturbations mais aussi d'estimer les préjudices induits sur les enjeux territoriaux.

Cette thèse constitue un outil de réflexion sur les façons de minimiser la vulnérabilité des réseaux de transport routiers vis à vis de l'aléa lave torrentielle dans les Alpes françaises. Ces travaux de recherche pourraient représenter un appui supplémentaire pour l'aide à la décision des pouvoirs publics en matière de gestion du risque-réseau.

Chapitre 1 – La vulnérabilité des réseaux de transport routier : Aspects généraux

1. La notion de risque

« La plupart des disciplines scientifiques s'accordent sur le fait que les risques naturels résultent du croisement entre la probabilité qu'un phénomène naturel destructeur se réalise et les dommages possibles que ce phénomène pourrait entraîner sur des biens ou des personnes dans une zone donnée. » (Léone et al., 2010).

L'étymologie latine du mot risque « *resecum* : ce qui coupe » renvoie à l'idée d'une rupture dans le cours des choses.

De manière générale, un risque naturel se définit comme étant le résultat d'une combinaison entre l'aléa qui correspond au phénomène naturel et la vulnérabilité des éléments exposés à ce phénomène, liés à une présence anthropique (Alexander, 2005). Le risque implique donc l'exposition des populations et de leurs infrastructures à un événement naturel potentiellement dommageable. Sous cette définition usuelle s'exprime l'équation suivante :

$$\text{RISQUE} = \text{ALEA} \times (\text{ENJEUX} \times \text{VULNERABILITE})$$

En détail, la notion d'aléa dans le cadre des risques naturels renvoie à la probabilité de survenue d'un événement naturel sur un espace donné (Lefèvre et Schneider, 2003). Le processus naturel est défini en termes de : fréquence ou probabilité d'occurrence, d'intensité c'est-à-dire l'importance du phénomène (Dauphiné, 2001), de durée d'action et d'étendue spatiale. Evidemment, il existe toujours une incertitude quant à la réalisation dudit phénomène naturel (Gleyze et Reghezza, 2007). Le risque fait donc référence aux dangers associés à des processus aux résultats incertains (Reid, 1992 ; Chaline et al., 1994). Synthétiquement, le phénomène naturel s'exprime par un champ d'action (espace), une magnitude (volume), une intensité ou un débit, une violence (impact) et une récurrence (fréquence) (Thouret et D'Ercole, 1994).

Les enjeux quant à eux sont constitués par : les biens matériels tels que les équipements et infrastructures ou les activités économiques (les moyens de production, d'acheminement, etc.), les personnes, voire l'environnement directement ou indirectement exposés à l'aléa et susceptibles d'en subir les conséquences. En cela, la vulnérabilité exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur ces enjeux, c'est-à-dire le degré de dommages potentiels subis par ces enjeux (Van Westen et al., 2006).

Dans la mesure où le risque est d'autant plus élevé que la probabilité de survenue de du phénomène naturel et les conséquences induites sur les éléments exposés le sont aussi, le risque peut s'exprimer avec la formule :

$$\text{RISQUE} = \text{PROBABILITE} \times \text{CONSEQUENCES}$$

La *courbe de Farmer* (Figure 1) illustre ce concept via l'utilisation d'une courbe empirique qui permet de différencier le risque acceptable du risque inacceptable selon sa fréquence d'apparition et sa gravité. Un risque est alors défini comme acceptable lorsque l'on consent à vivre avec s'il est contrôlé. Cette relation étant dépendante des procédés de réduction du risque, en particulier les méthodes de diminution de ses conséquences grâce à des mesures préventives.

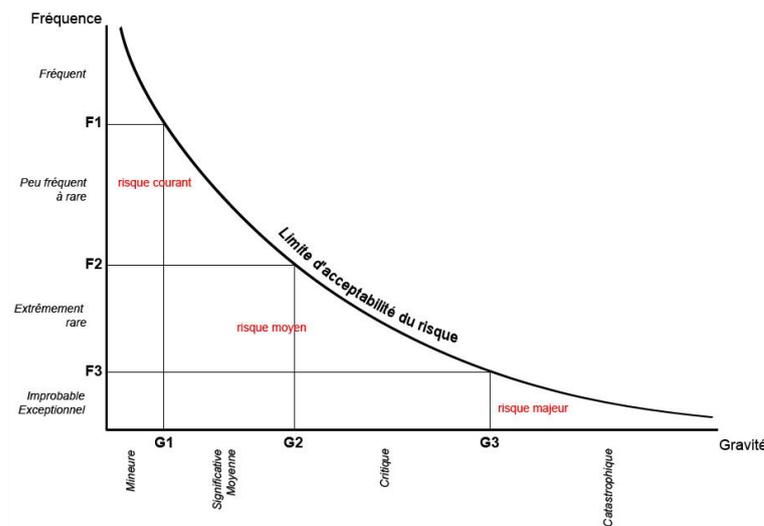


Figure 1. Courbe des risques selon Farmer

Pour diminuer l'exposition au risque et ses conséquences, il est donc nécessaire d'en étudier les composantes. Mais contrairement à la description classique et linéaire d'un risque

qui veut que l'on commence par les causes pour en venir aux conséquences, nous choisissons ici de commencer par la phase vulnérabilité appliquée l'enjeu complexe que sont les réseaux de transports routiers. Cette étape est nécessaire afin de mieux resituer dans son contexte notre intérêt pour un aléa en particulier : les laves torrentielles.

2. La vulnérabilité des réseaux de transport : cadre conceptuel et terminologie

2.1. Du risque à la vulnérabilité des réseaux

2.1.1. La notion de vulnérabilité

La plupart des études menées sur les risques se sont massivement développées autour de la compréhension de l'aléa et de la réduction de ses impacts, conduisant à des solutions techniques telles que des mesures correctives. A l'inverse, la vulnérabilité est un concept relativement récent, dont les méthodes d'analyse ne sont pas encore complètement standardisées. Selon Veyret et Reghezza (2006), cet état de fait est lié d'une part à l'histoire des recherches sur le risque et d'autre part au concept de vulnérabilité malaisé à cerner, les acteurs l'utilisent dans des sens différents, voire contradictoires. Son application réelle opérationnelle est également délicate à mettre en place (Wisner et Henry, 1993) et représente donc un frein supplémentaire à son étude. Le concept de vulnérabilité est donc complexe à définir et à interpréter en raison de son contenu pluridisciplinaire (Pigeon, 2002 ; Birkmann, 2005).

Toutefois depuis 1994, Thouret et D'Ercole ont permis de poser les bases de cette notion en évoquant l'effet pervers des mesures de protection contre l'aléa, qui encouragent la croissance urbaine et engendrent une augmentation de l'exposition des sociétés face au risque, en raison d'un sentiment de fausse sécurité. Selon eux, la ville et les activités humaines ne multiplient pas les menaces naturelles mais leurs conséquences. Ils définissent alors la vulnérabilité comme étant « *la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel* ». Ils ajoutent que la vulnérabilité peut-être définie comme « *l'endommagement que subit un enjeu, soit comme la propension de l'enjeu à subir cet endommagement* ».

A leur suite Léone et al. (1996a.b) tentent de donner un cadre plus formel à la notion de vulnérabilité. Ils apportent des méthodes d'évaluation quantitative de celle-ci, adaptées à plusieurs types de risque, en particulier les mouvements de terrain. Dans cette démarche, la vulnérabilité est alors définie comme « *une grandeur, pouvant être évaluée par un niveau d'endommagement potentiel d'un élément exposé, soumis à l'action d'un phénomène*

pressenti et d'intensité donnée ». A rappeler que les dommages constituent les dégâts, les perturbations et les préjudices constatés à la suite de l'accident. La notion de vulnérabilité est donc directement liée à la notion de dommages. Dans MATE (2000), la vulnérabilité exprime « *le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux, la propension de cet enjeu à être endommagé par le phénomène* ».

$$\text{PROPENSION A ÊTRE ENDOMMAGÉ} = \frac{\text{DOMMAGE POTENTIEL}}{\text{VALEUR DE L'ENJEU}}$$

Nous retiendrons enfin la définition synthétique de la vulnérabilité fournie par Léone et Vinet en 2006 où « *la vulnérabilité est la propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés constitutifs d'un territoire et d'une société donnés* ».

Dai et al. (2002) ; Uzielli et al. (2008) ; Alexander (2005) ont également tenté de définir le concept de vulnérabilité tout en dégagant des méthodes d'évaluation plus quantitatives, permettant ainsi d'élargir cette notion à l'ensemble des modalités d'atteinte et de réaction d'une société face à l'aléa naturel. L'intensité des dommages et ses conséquences ne dépendent plus seulement de l'aléa et de la valeur des biens considérés, mais ils dépendent aussi des mesures de protection et de prévention mises en œuvre. Cette notion implique la capacité de réponse de la société face à cet aléa. Ainsi, la vulnérabilité n'est plus seulement déterminée par les paramètres physiques des risques naturels eux-mêmes, mais elle dépend principalement des conditions économiques et sociales de la région concernée (Petrova, 2006). Cette dernière détermine alors cinq facteurs de vulnérabilité :

- i. Le type d'aléa potentiellement dommageable
- ii. L'exposition au risque (humains et infrastructures)
- iii. L'état de préparation (mesures de précaution, planification de la gestion de crise)
- iv. Le degré de protection mis en place
- v. La capacité de réponse de la société à l'évènement dommageable

D'autres approches plus récentes mettent en évidence un nouveau paramètre au sein de la vulnérabilité : la notion de susceptibilité. Celle-ci reflète la capacité d'individus ou de systèmes socio-économiques à résister en cas de survenue d'un aléa. Si cette capacité est faible, même un léger impact peut mener à la défaillance du système (Taubenböch et al., 2008 ; Guzzetti et al., 2009). Le défi principal dans la réduction de la vulnérabilité est désormais de changer la perception des individus.

Plus largement les facteurs de vulnérabilité peuvent donc s'articuler selon :

- i. Les facteurs physiques, techniques et fonctionnels
- ii. Les facteurs géographiques et territoriaux
- iii. Les facteurs institutionnels, administratifs voir politiques
- iv. Les facteurs socio-culturels et de sensibilisation
- v. Les facteurs conjoncturels ou temporaires

Leur analyse est essentielle puisqu'elle rend possible l'estimation de l'amplitude des préjudices potentiels, en fournissant une mesure quantitative de l'exposition des éléments et une mesure qualitative de la capacité de réponse du système exposé (Thouret et D'Ercole, 1996), dans le cas présent : le réseau routier.

2.1.2. Les réseaux routiers : définition et usage

Par réseau de transport, on entend au sens large l'ensemble des techniques, moyens et processus permettant l'acheminement des personnes et des marchandises d'un lieu à un autre de l'espace géographique (Bavoux et al., 2005). Les réseaux de transport permettent donc la mise en relation de différents lieux d'un territoire et des entités qui les occupent. Suivant une organisation géographique spécifique, ils structurent et viabilisent un espace en un maillage constitué d'axes de circulation. Pour cette raison, les réseaux représentent une entrée majeure dans la compréhension d'un territoire, de son fonctionnement et de son évolution (Lévy et Lussault, 2003).

Un réseau de transport tel que le réseau routier est en premier lieu un support technique constitué d'objets linéaires immobiles sur lesquels circulent des véhicules en mouvement. Schématiquement il se caractérise par des nœuds de communication reliés par

des lignes dites d'axes de communication. Le réseau est donc constitué d'infrastructures techniques ponctuelles fixes (ouvrage de franchissement, carrefour, information de circulation, etc.) ou linéaires fixes (chaussée, voie, marquage au sol, etc.). Mais ces infrastructures ne suffisent pas à assurer seules le service de transport. Par définition les réseaux existent dans le but de répondre à un besoin de mobilité et d'échanges, ce besoin s'exerce selon un service d'offre de la part de l'infrastructure de transport et de demande en déplacement dans le but de véhiculer des personnes ou des marchandises d'un lieu à un autre via l'usage d'un moyen de transport (Figure 2). Cette relation induit un bénéfice pour chacune des parties calculé selon le temps passé à se déplacer, son coût monétaire, la vitesse de déplacement ou encore la distance parcourue.

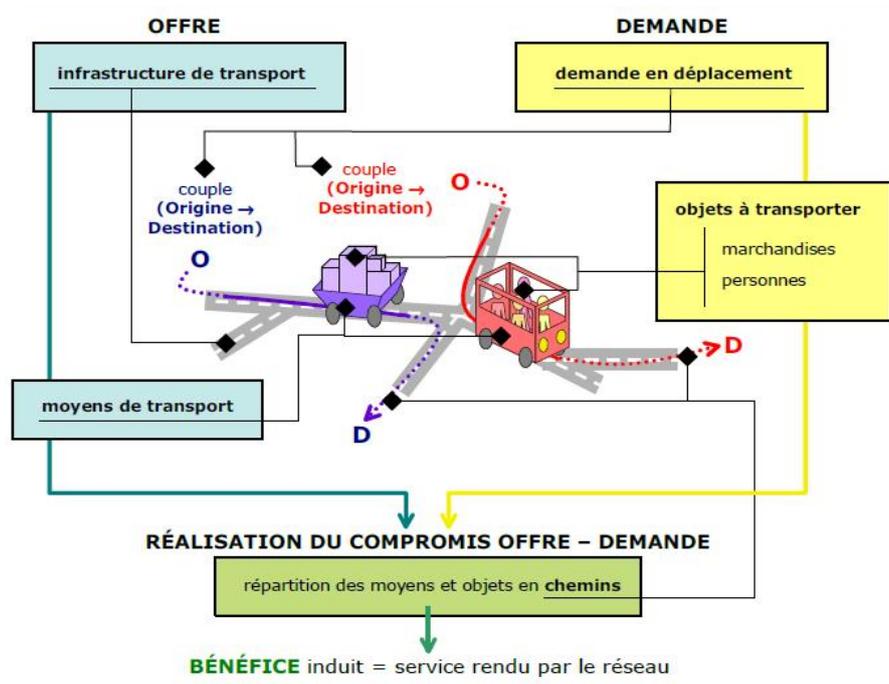


Figure 2. La relation offre-demande du réseau de transport routier (Gleyze et Reghezza, 2007)

Cette organisation suit généralement une logique économique via la concentration des flux sur les axes les plus importants afin de réaliser des économies d'échelle, ou bien selon les logiques politiques locales d'aménagement du territoire (Baud et al., 2013). Les axes de circulation sont alors conçus pour désenclaver ou intensifier l'accès au territoire selon un emboîtement d'échelles spatiales. Ils présentent donc un fort pouvoir de polarisation et d'organisation du territoire. A titre d'exemple, pour les vallées en montagne on parle bien de

couloir de circulation pour qualifier un axe de circulation linéaire reliant des nœuds importants.

Classiquement, les propriétés d'un réseau de transport permettant d'évaluer la qualité de son offre de service en tant que support technique sur l'espace territorial peuvent s'articuler autour de six composantes fondamentales :

- i. L'isotropie : dans le cas d'un réseau théorique équilibré dit isotrope, toutes les directions seraient équivalentes. Or en réalité, le réseau routier s'organise selon un degré d'isotropie entre les liaisons régit par un système de polarisation du maillage routier.
- ii. La connexité : elle traduit la capacité physique d'un nœud à rejoindre les autres nœuds, c'est-à-dire la capacité à établir une liaison entre les lieux. Elle est étroitement liée à la densité physique des intersections et de la quantité d'axes dont dispose le réseau.
- iii. La connectivité : elle représente la qualité et la multiplicité des liaisons du réseau, qu'elles soient directes ou indirectes. Elle traduit les conditions pour atteindre les nœuds du réseau en termes de distance et de temps sur les différentes liaisons possibles, donc la vitesse et les alternatives offertes par le réseau.
- iv. L'homogénéité : elle traduit l'interdépendance des liaisons du réseau entre elles sur un territoire en termes de corrélation spatio-temporelle.
- v. La nodalité : elle représente la capacité relationnelle non pas des liaisons mais des nœuds au sein du réseau, l'ensemble de leurs propriétés morphologiques et fonctionnelles.
- vi. L'accessibilité : en géographie, il s'agit du degré de facilité avec laquelle un lieu peut être atteint. Elle mesure le potentiel d'opportunité de contact et de déplacement sur le territoire. L'accessibilité implique également la pénibilité du déplacement, elle est indissociable du rôle fonctionnel du réseau sur le territoire. Mais cette propriété sera davantage détaillée en *Partie 4* de la thèse, associée à un état de l'art spécifique.

Cette définition succincte des réseaux de transport routier, de ses propriétés et du service proposé posent bien évidemment la question de la performance de ce réseau,

particulièrement dans le cadre d'un espace géographique à risque. Les impératifs de mobilité rendent cruciale l'existence de réseaux de communication performants et fiables à l'échelle des territoires, d'autant que les mobilités sont particulièrement sujettes aux perturbations (Demoraes, 2009). Il est donc essentiel d'identifier les enjeux et les facteurs vulnérables du réseau routier afin de pouvoir décrire les effets de coupure en cas d'endommagement de ce dernier.

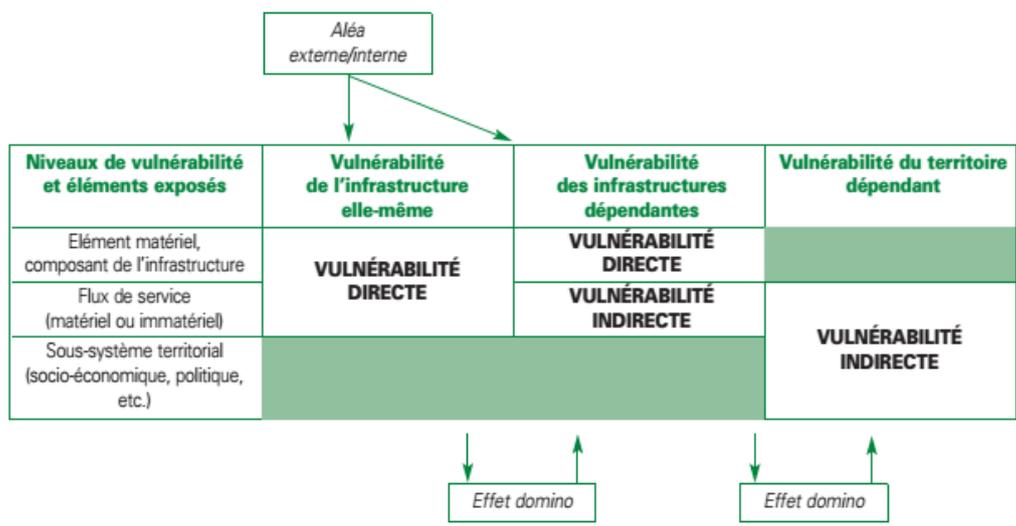
2.2. Typologie des vulnérabilités et modes d'endommagement du réseau

Initialement, l'analyse de la vulnérabilité des réseaux routiers a été développée par les spécialistes des transports dans le but de mener des études techniques de faisabilité et de fiabilité du réseau (Taylor et Susilawati, 2012). Ces études ont examiné en priorité les performances du réseau de transport du point de vue de l'ingénierie telle que la connectivité du réseau (Dalvi et Martin, 1978 ; Bazöz et Kiremidjian, 1995 ; Bell, 2000), ou bien la fluidité de la circulation routière (Wakabayashi et Kameda, 1992). Ces recherches sur la performance du réseau ont surtout eu pour but de trouver des solutions aux problèmes de congestion en zone urbaine, la vulnérabilité des réseaux consistait ici à identifier et à localiser les infrastructures critiques comme le confirme l'étude de Murray et Grubestic en 2007.

A contrario, Berdica propose en 2002 que la vulnérabilité du réseau soit davantage considérée comme une susceptibilité à des incidents traduits par une détérioration du service de transport. La vulnérabilité des réseaux implique un endommagement potentiel en cas de coupure avec deux composantes : une probabilité et des conséquences. La notion est donc rattachée directement à celle d'un risque comme en témoignent les études de Nicholson et Dalziell ; D'Este et Taylor en 2003. Pour autant, les auteurs ne s'appuient pas forcément sur l'origine de la perturbation routière pour en déterminer ses conséquences (Jenelius et al., 2006; Jenelius, 2010). La vulnérabilité du réseau routier peut être alors définie comme l'étude des dégradations potentielles du système de transport routier et leurs impacts sur la société (Jenelius et Mattsson, 2014). A travers ces définitions il apparaît évident que les impacts ne concernent pas seulement les dommages aux infrastructures, mais touchent également la fonction d'usage assurée par ce réseau (Gleyze, 2005) et ce quelle que soit l'origine. En conséquence, les modes d'endommagement du réseau peuvent être hiérarchisés sous la

forme de dommages directs ou indirects et mesurés de manière tangible ou intangible. Depuis l'impact sur les infrastructures jusqu'aux conséquences fonctionnelles et territoriales engendrées par ces impacts. Ordinairement, trois niveaux de vulnérabilité peuvent donc être analysés (Tableau 1).

Tableau 1. Les niveaux de vulnérabilité (Bouchon, 2006)



2.2.1. La vulnérabilité directe

La vulnérabilité directe se rapporte à l'atteinte matérielle ou corporelle directement imputable à l'impact physique d'un phénomène d'origine naturel ou anthropique. Elle peut donc être de nature structurelle ou bien porter préjudice à des personnes. Dans le cas des infrastructures routières, les dommages structurels porteront sur les voies de circulation (la chaussée goudronnée ou non), les bas-côtés (glissière de sécurité, rambardes, etc.), les ouvrages de franchissement et les plates-formes routières (ponts, buses d'écoulement des eaux de pluie, etc.), les installations annexes comme les panneaux de signalisation routière ou du matériel temporaire d'entretien de la route, voir à des véhicules en circulation.

Dans le cadre d'un impact par un aléa naturel, trois principaux types d'endommagement direct potentiel peuvent être identifiés (adapté de Léone, 1996) :

- i. L'endommagement des ouvrages d'art, sous la forme de pressions exercées lors de l'impact telle qu'une poussée frontale/latérale peuvent causer des déplacements et occasionner des déformations sur les infrastructures, des dégradations voir une destruction de celle-ci.
- ii. Les infrastructures peuvent être partiellement ou totalement obstruées par l'accumulation de matériaux ou de débris, ou bien être submergées.
- iii. Les infrastructures peuvent subir un phénomène d'ablation partielle ou totale par affouillement, d'affaissement de la voirie, de déchirure ou d'érosion du soubassement de la chaussée.

L'ensemble de ces éléments est capable d'entraîner une coupure partielle ou totale d'une portion locale et restreinte du réseau routier. Au-delà du simple constat d'endommagement, Gleyze (2005) ; Mermet (2011) et Lhomme (2012) postulent qu'une approche structurelle de la vulnérabilité des réseaux permettrait d'expliquer les impacts engendrés par les défaillances dudit réseau et sa capacité de réponse à l'endommagement. Cependant l'intensité des dommages structurels est également à mettre en relation étroite avec l'intensité et la nature du phénomène dommageable, c'est-à-dire son mécanisme d'action, sa magnitude, sa durée et sa surface d'interaction avec l'infrastructure (Léone et Deymier, 2011).

2.2.2. La vulnérabilité indirecte

La vulnérabilité indirecte (ou induite) représente les conséquences sur les activités et les fonctions associées au réseau routier impacté. Elle se traduit par des perturbations fonctionnelles et des dysfonctionnements permettant ensuite de mesurer la dégradation du service assuré par ce réseau. Son analyse met ainsi en évidence les enjeux distants du lieu directement impacté. Toutefois, le manque de données disponibles représente bien souvent un frein à son évaluation, sa quantification ne pouvant alors qu'être approchée (Manche, 2000).

Dans le cadre d'une approche systémique du risque, la vulnérabilité indirecte ne peut se contenter d'une approche généraliste du fait de sa complexité. En effet, son analyse doit être impérativement déclinée en sous-systèmes de vulnérabilités afin de rendre compte de l'ensemble des répercussions d'un évènement dommageable sur le réseau, sur son espace et dans le temps. Sa typologie distingue donc prioritairement la vulnérabilité dite fonctionnelle, la vulnérabilité territoriale et la vulnérabilité institutionnelle. Elles-mêmes pouvant s'articuler autour de l'étude de vulnérabilités socio-économiques, politiques, environnementale, etc. Quels que soient l'échelle et le sujet d'analyse (des composants de l'infrastructure au territoire dans son ensemble), la notion de dépendance des systèmes est donc fondamentale (Bouchon, 2006).

a) La vulnérabilité fonctionnelle

Elle traduit les perturbations fonctionnelles des tronçons impactés. La frontière entre vulnérabilité fonctionnelle et vulnérabilité territoriale étant mince à déterminer, ses conséquences sur le réseau routier peuvent correspondre à :

- i. Une interruption momentanée ou prolongée de fonctionnement par effet de coupure.
- ii. Une perte de connexité et/ou une altération de la connectivité du réseau.
- iii. Une dégradation du service rendu suivie d'une modification des itinéraires et d'une redistribution de la cartographie du réseau routier sur d'autres axes de communication.

b) La vulnérabilité territoriale

La vulnérabilité territoriale se rapporte aux conséquences du dysfonctionnement du réseau sur le territoire. Son analyse vise à identifier, caractériser et hiérarchiser les espaces à partir desquels se crée et se diffuse la vulnérabilité au sein d'un territoire. Les dysfonctionnements du réseau peuvent perturber, compromettre, voire interrompre le fonctionnement et le développement du territoire impacté (D'Ercole et Metzger, 2009). Les effets immédiats des dégradations du réseau peuvent conduire à :

- i. Un allongement et/ou un changement d'itinéraire pour une même origine-destination, par extension une augmentation de la distance kilométrique.
- ii. Un allongement du temps de parcours.

- iii. L'isolement d'une partie du territoire desservi habituellement par ledit réseau.
- iv. Occasionner une congestion du trafic sur un autre axe par report de service.
- v. Selon l'intensité du trafic et l'importance du réseau, les répercussions de la perturbation peuvent être ressenties à l'échelle spatiale territoriale dite locale, régionale, nationale voir transfrontalière.

La dégradation de l'accessibilité territoriale peut être ensuite responsable en cascade d'incidences socio-économiques sur les divers enjeux constitutifs du territoire impacté (les personnes, les biens et les activités associées).

c) La vulnérabilité institutionnelle

Liée étroitement à la vulnérabilité humaine voir politique, cette dernière s'exerce essentiellement dans le cadre de retours d'expérience associés à l'analyse de la capacité de réponse des institutions face à la crise (Léone, 2008). En ce qui concerne les réseaux routiers, elle vise à apprécier la planification des actions de la part des gestionnaires de réseau lors des phases préparation, de gestion de la crise puis de retour à la normale. Il s'agit d'une démarche d'évaluation du processus décisionnel et du cadre opérationnel des acteurs en réaction à un évènement dommageable.

2.2.3. Les dommages dits tangibles et intangibles

Les dommages tangibles impliquent généralement une notion de coûts et de préjudice économique. Ces coûts qu'ils soient directs ou indirects sont souvent l'objet d'une évaluation monétaire, ils correspondent aux pertes dont la compensation est rendue possible grâce à la réparation de l'infrastructure endommagée, sa substitution ou une contrepartie financière aux dommages. Ce coût est modulé selon l'intensité des dégâts et la valeur marchande de l'infrastructure impactée. Les coûts directs peuvent s'appliquer par exemple au déblaiement et à la remise en état de la route. Les coûts indirects concernent davantage le surcoût monétaire dû à l'augmentation de la distance de parcours et donc à l'augmentation du coût du trajet en cas de report de flux sur un axe de déviation par exemple. Les coûts indirects peuvent également impliquer le préjudice économique que subit une entreprise ou un

organisme imputable à la perturbation du réseau. A titre d'exemple pour une entreprise de transport, il peut s'agir du manque à gagner dû à l'immobilisation du matériel roulant, au coût de détournement des convois ou bien de retards de livraison. Dans le cas d'une entreprise touristique, une perturbation routière peut occasionner un manque à gagner en raison d'une baisse de la fréquentation. Comme l'illustre l'exemple du séisme en Italie en 1998 (Mazzochi et Montini, 2001 in Léone, 2008) dont la baisse d'activité suite aux ruptures des réseaux de communication a conduit à une baisse de la fréquentation et vice versa.

Les dommages intangibles concernent les dommages aux personnes, aux biens, aux services ou à un territoire difficilement chiffrables, et plus largement non quantifiables. Bien qu'ils puissent être le résultat de conséquences directes ou indirectes, ils ne peuvent dans l'état des connaissances actuelles être intégrés au sein d'un calcul économique fiable. Il s'agit par exemple du stress ou de la fatigue ressentis par les usagers suite à la perturbation routière, la pollution ou le bruit supplémentaires générés, la modification du paysage ou de l'environnement.

La corrélation entre les modes d'endommagement du réseau et leur intensité peut donner lieu à la création d'indicateurs représentatifs de la mesure l'impact physique et des perturbations fonctionnelles selon une échelle de valeur théorique, qui sous la forme de matrices d'endommagement peuvent servir de référentiel à l'évaluation économique de la vulnérabilité (Léone, 2008). Dans ce contexte et au vu de la complexité de la vulnérabilité des réseaux provenant à la fois de son caractère multidimensionnel et de l'hétérogénéité des enjeux qu'elle affecte indirectement, elle peut être résumée en six catégories d'analyse (Demoraes et D'Ercole, 2009) :

- i. Les conditions intrinsèques : elles englobent l'analyse des faiblesses internes structurelles du réseau. C'est-à-dire l'état initial de l'infrastructure et la topographie routière (pente, sinuosité etc.).
- ii. La dépendance : ce sont les relations de dépendance d'un élément du réseau vis-à-vis d'autres systèmes nécessaires à son fonctionnement (ex : la signalisation routière).
- iii. L'exposition à l'aléa, les pertes d'opérationnalité : à noter que sont confondues ici deux notions, entre l'origine de la perturbation qu'elle soit naturelle ou

anthropique et la perte de fonctionnalité liée à l'endommagement dudit aléa. L'idée principale à retenir sur ce facteur étant les impacts et les dysfonctionnements potentiels qui en résultent.

- iv. La préparation aux crises : ce sont les mesures préventives et de préparation mises en place par les gestionnaires de réseau comme l'existence de plans avec des itinéraires bis prévus en cas de perturbation.
- v. La capacité de contrôle : il s'agit de la facilité d'intervention sur une infrastructure sur place ou à distance en cas de problèmes, par exemple la proximité du centre technique, la surveillance routière, l'accès à la zone endommagée ou le niveau de sécurisation de l'axe en question.
- vi. Les alternatives de fonctionnement : elles font référence aux possibilités de remplacement, de contournement de l'élément endommagé ou les solutions de substitution en cas de défaillance du réseau.

Cependant, pour pouvoir évaluer qualitativement et quantitativement la vulnérabilité du réseau routier, il convient au préalable d'en analyser les composantes. Cette démarche a pour but de comprendre les processus de dysfonctionnement ainsi que toutes les conséquences que cela implique.

2.3. Les processus de dysfonctionnement du réseau

2.3.1. Les arbres des défaillances

Suivant une logique déductive, nous pouvons décrire tous les paramètres théoriques pouvant être intégrés dans le processus de dysfonctionnement d'un réseau de transport, ici le réseau routier. Traditionnellement, le principe suppose de partir de la cause soit l'interaction entre les enjeux et l'évènement dommageable pour ensuite en évaluer le maximum de conséquences possibles. La représentation schématique de la Figure 3 permet d'illustrer cette approche en distinguant la vulnérabilité directe de la vulnérabilité indirecte, sous la forme d'une dégradation en cascade des services et des activités assurées par le réseau ou qui en dépendent.

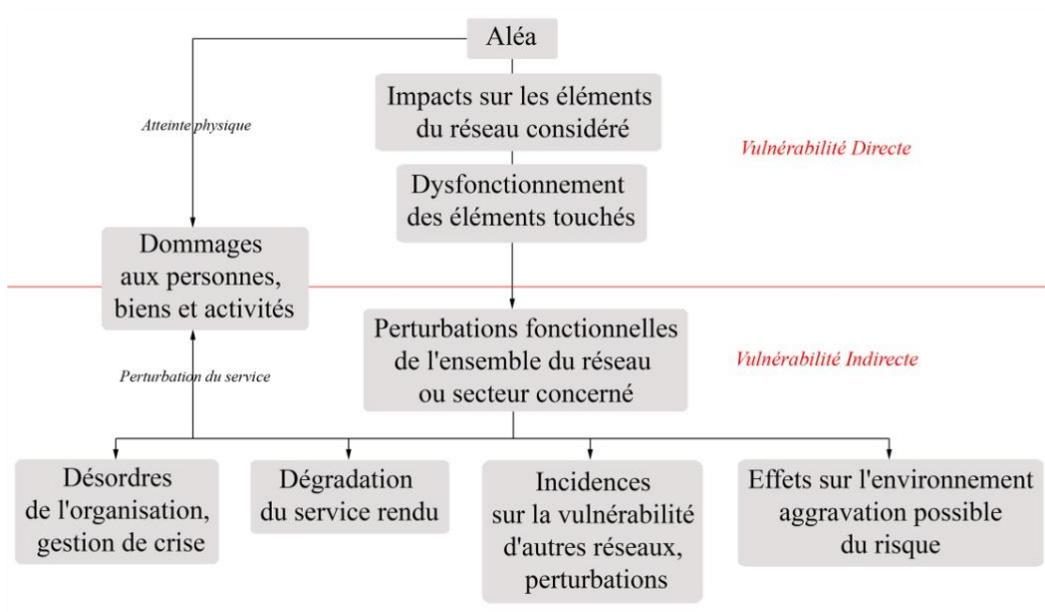


Figure 3. La vulnérabilité directe/indirecte du réseau routier (Utasse, 2010)

Cette approche peut être approfondie par la construction d'un second arbre des défaillances (Figure 4) permettant la mise en évidence d'un scénario amont des causes conduisant à un effet donné (Cojean et al., 2002). Depuis la source d'impact à savoir un tronçon routier, son dysfonctionnement, les conséquences de la perturbation et sa gestion institutionnelle.

Quelques précisions doivent toutefois être apportées : les dispositifs de prévention/contrôle englobent les systèmes d'alerte, les stratégies de protection à disposition immédiate et les mesures pré-opérationnelles. Les moyens de secours s'appliquent aux actions immédiates pour rétablir la communication sur le tronçon endommagé et aux solutions alternatives permettant de maintenir la circulation routière durant le temps de l'interruption. Les conséquences pour les services, les usagers et l'environnement illustrent par exemple les réseaux d'entreprises et de commerces dont l'activité est directement liée à la viabilité du réseau de transport, où les perturbations du réseau peuvent entraîner des pertes de distribution, de communication, des pertes d'exploitation et de charge, des retards, un surcoût de transport, etc. Pour les particuliers, il peut s'agir de temps/distance supplémentaire pour effectuer la liaison domicile-travail, la perte d'accès aux services publics et/ou l'isolement prolongé des habitations en particulier pour les petites communes tributaires du service. Les conséquences pour l'environnement peuvent affecter l'image du

territoire avec une perte potentielle de la valeur paysagère du patrimoine et de son attractivité. Cet état peut être immédiat, causé par l'évènement dommageable lui-même ou futur à la suite de constructions d'ouvrages de protection massifs.

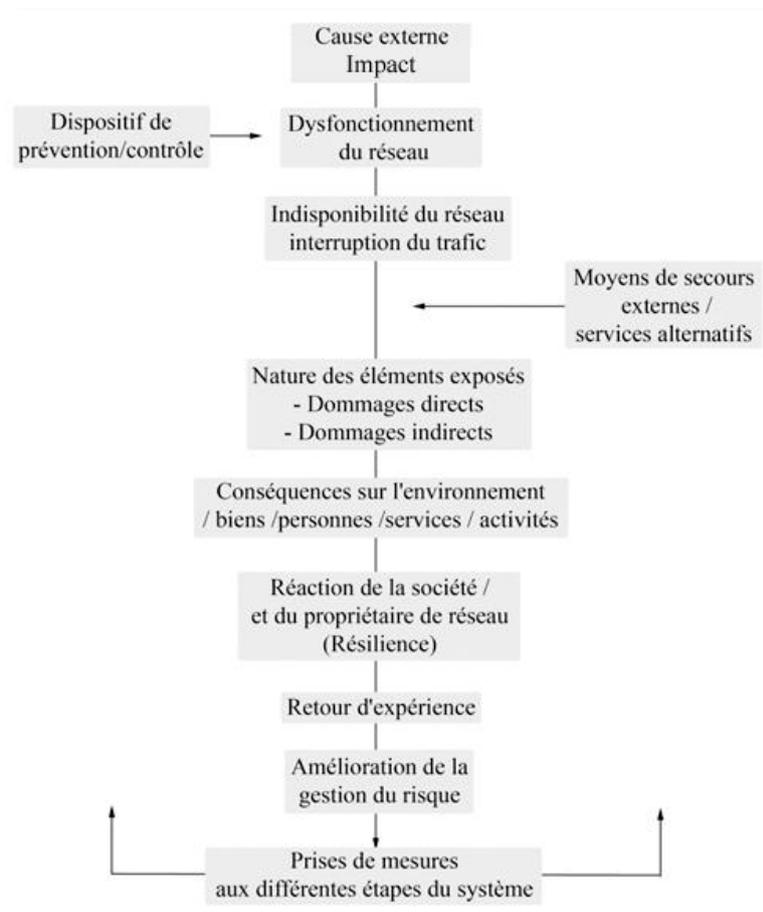


Figure 4. Arbre des défaillances (Utasse, 2010, adapté de Cojean et al., 2002)

La réaction de la société et du gestionnaire de réseau face à une situation dommageable traduit leur capacité à remédier à l'endommagement, ainsi que la vitesse de reprise d'une activité normale sur le réseau, cette capacité introduit la notion de résilience d'un territoire et/ou d'un réseau. A sa suite, un retour d'expérience peut être établi afin de pouvoir en tirer des enseignements, améliorer l'état de préparation et de gestion de la crise face aux risques. Cette étape passe par la mise en place de mesures correctives, de nature techniques, humaines et/ou organisationnelles. Bien que cette approche ne soit pas exhaustive, sa réflexion permet de dresser un panel des processus d'endommagement, des conséquences et des évolutions de la gestion du risque sur le réseau.

2.3.2. Vulnérabilité et Résilience

La résilience est un concept émergent qui peine encore à trouver une définition synthétique (Commissariat Général au Développement Durable, 2012) du fait de la complexité des systèmes sur lesquels elle porte et son caractère interdisciplinaire. Ces dernières années ont vu apparaître une multitude d'études et d'ouvrages à destination principalement des collectivités territoriales qui visent à introduire cette notion dans les politiques de gestion des risques (Bibliographies du CRDD – La résilience des territoires, 2014).

La première remarque tient en la distinction entre les termes de vulnérabilité et de résilience, les deux concepts ne sont pas opposés et doivent ainsi s'étudier dans une certaine continuité (Lhomme et al., 2010) et en complémentarité. Bien que la vulnérabilité semble considérée comme englobant le concept de résilience, cette dernière se définit comme « *la capacité d'un système social (territorial par extension) à faire face à un événement, à absorber les perturbations et à réorganiser ce système de manière à ce qu'il soit entièrement opérationnel tel qu'il existait avant les dites perturbations* » (Cutter et al., 2008). La définition sous-entend la mise en place d'un processus adaptatif et d'apprentissage en réponse à l'évènement dommageable (Adger et al., 2005; Klein et al., 2003; Folke, 2006).

En matière de résilience des réseaux de transport, la complémentarité de la notion de résilience avec celle de la vulnérabilité tient au fait qu'elle implique la capacité du système impacté à maintenir un niveau de service normal ou à revenir à un niveau équivalent dans un délai limité (Heaslip et al., 2009), à compenser les défaillances en permettant au réseau de fonctionner même lorsque les infrastructures sont endommagées (Battelle, 2008) et à minimiser les effets des perturbations sur le territoire (Ta et al., 2009). La résilience induit donc une dimension temporelle à la vulnérabilité des transports et d'équilibre dynamique (Figure 5). Elle n'est pas centrée uniquement sur les questions d'endommagement du réseau mais davantage sur les capacités de récupération liées à ceux-ci (Lhomme et al., 2010). Ainsi plus un système est résilient, moins il est vulnérable.

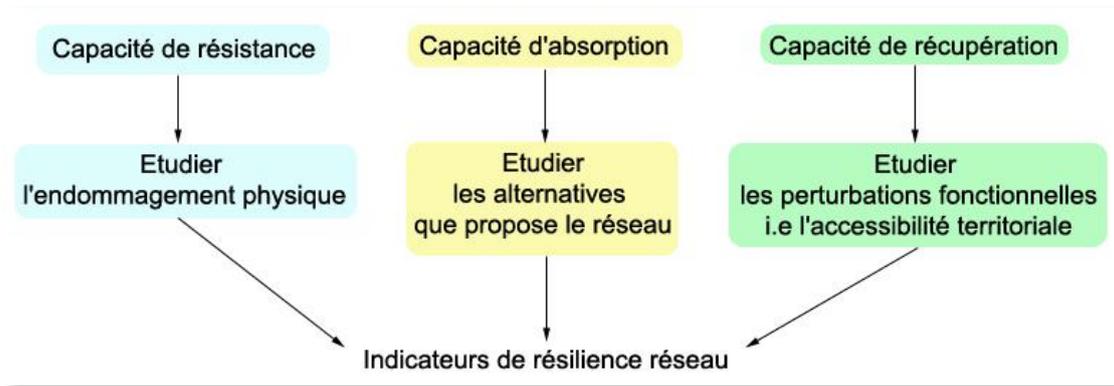


Figure 6. Les indicateurs de résilience des réseaux de transport (adapté de Lhomme et al., 2010)

a) La capacité de résistance

Elle se rapporte classiquement aux dégâts matériels et structurels à la suite de l'évènement dommageable. L'idée suppose que plus le réseau est endommagé, plus sa probabilité de dysfonctionnement est élevée et donc plus il sera difficile à remettre en service. Par conséquent, il est prioritaire d'identifier et de localiser les tronçons les plus susceptibles à l'impact, de mesurer la propension à l'endommagement physique et de recenser les moyens mis en œuvre à la réduction des dommages.

b) La capacité d'absorption

Elle pose le diagnostic des forces et des faiblesses liées à la configuration du réseau en situation d'altération. La capacité d'absorption se rapporte donc à l'étude des propriétés intrinsèques du réseau de transport (isotropie, connectivité, connexité, etc.). A la suite d'une perturbation sur l'itinéraire principal, il convient d'identifier l'ensemble des alternatives disponibles offertes par le réseau afin de maintenir un certain niveau de service aux usagers le temps d'un retour à la normale.

c) La capacité de récupération

A la suite du dysfonctionnement, cette dernière mesure les pertes d'accessibilité grâce à l'analyse spatiale du territoire impacté, en situation dite normale (ou d'équilibre du système) et en situation perturbée/altérée (ou de déséquilibre). Elle tient compte également des services qui dépendent étroitement de la remise en état du réseau routier. On suppose que si l'ensemble du territoire reste accessible en situation altérée, il lui est plus facile de se rétablir d'une perturbation routière.

Au regard de la complexité d'analyse de la vulnérabilité des réseaux routiers et par extension de son territoire, une approche systémique des problématiques liées semble indispensable (Tableau 2). Son étude suppose d'identifier clairement l'ensemble des enjeux exposés et leur importance, de prévoir efficacement l'amplitude des préjudices potentiels, la capacité de réponse du système endommagé, et de déterminer les échelles spatio-temporelles qui lui sont propres.

Tableau 2. Vision holistique/globale des problématiques concernant l'analyse des infrastructures de transport routier

Problématique	Description
Échelle spatiale	<p>Identification et localisation des tronçons exposés et/ou potentiellement vulnérables</p> <p>En cas d'impact : extension spatiale de la zone sinistrée (ex : en mètres linéaires)</p>
Échelle temporelle	<p>Période à laquelle les tronçons routiers sont les plus exposés et période à laquelle ils sont impactés. La fenêtre d'ouverture critique peut être exprimée en mois (ex : période touristique), en jours (vacances scolaires, début/fin de semaine) ou en heures (7h-9h/16h-18h)</p>
Comportement non linéaire	<p>La défaillance d'un tronçon routier peut entraîner des conséquences pour l'ensemble du réseau. Tous les axes d'un réseau sont interdépendants</p>
Importance	<p>Valeur administrative et territoriale du tronçon impacté (ex : liaison d'importance locale, départementale, régionale, nationale ou internationale)</p> <p>Poids du tronçon impacté dans le maillage routier global. Par exemple en termes de fréquentations journalières par les véhicules</p>
Structure physique	<p>Caractéristiques techniques (nombre de voies, largeur, hauteur, type de revêtement, présence d'ouvrage spécifique, etc.)</p>
Gouvernance	<p>Les modes de gestion du réseau par les autorités compétentes influent sur son fonctionnement (ex : construction, maintenance, politique, législation routière)</p>
Organisationnelle	<p>En cas de situation de crise par exemple, l'organisation et la réactivité des gestionnaires en termes de prises de décision et de gestion opérationnelle influence la remise en état du réseau, sa résilience</p>
Economique	<p>Coûts des dommages directs sur la zone sinistrée</p> <p>Coûts des dommages indirects : l'économie d'un territoire est étroitement liée à son accès. Une perturbation du réseau peut entraîner de lourdes pertes économiques sur les activités du territoire</p>
Sociale et culturelle	<p>Les usagers de la route sont dépendants du bon fonctionnement du réseau routier. Une perturbation peut entraîner une situation d'isolement territorial ou de détournements préjudiciables aux usagers et aux services dépendants</p>

La vulnérabilité n'est donc pas simplement réductible à la somme des vulnérabilités des enjeux exposés (Pigeon, 2002), son étude suppose l'interaction de l'ensemble des éléments vulnérables du réseau et du territoire à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans ce contexte, l'analyse de la vulnérabilité des réseaux routiers peut s'effectuer dans le cadre d'une démarche prospective dite *à priori* ou bien selon une démarche factuelle dite *à postérieure* de l'évènement dommageable (Léone et Vinet, 2008). Jusqu'à présent, la grande majorité des approches se concentrent prioritairement sur des constats d'endommagement et des retours d'expériences rétrospectifs dans une optique de capitalisation d'expérience afin de mieux anticiper les évènements à venir.

Dans l'optique d'une réduction des risques, il apparaît évident de relier la vulnérabilité du réseau routier aux causes de son dysfonctionnement : les aléas naturels.

3. Les aléas naturels dommageables sur le réseau routier – État de l'Art

De manière générale les études traitant de la vulnérabilité des réseaux de transport relatives à l'impact d'un phénomène naturel sont assez rares hors des champs de compétence de l'ingénierie ou du génie civil. Cela semble paradoxal au vu de la diversité des aléas naturels pouvant affecter les tronçons routiers, le kilométrage d'asphalte existant et la pression sociale/économique toujours plus forte pour l'assurance d'un réseau de transport rapide, fiable et viable.

3.1. Les principaux aléas impliqués

Qu'ils soient d'origine sismique, volcanique, gravitaire, hydrologique ou météorologique, la grande majorité des études réalisées sur les réseaux liés aux aléas naturels se sont orientées sur des événements de grande ampleur voir catastrophiques. Dans ce contexte, les méthodes employées pour caractériser ce type de risque se sont principalement développées à posteriori, au travers des constats d'endommagement inspirés des échelles de dommages déjà établies pour le bâti, champ de recherche de la vulnérabilité le plus largement investi (Léone, 2008). Initiées et axées sur les domaines de l'aléa sismique et volcanique, ces approches permettent d'inventorier les dommages structurels et d'en mesurer les pertes économiques associées (Gupta, 2001 ; Cho et al., 2001 ; Sohn et al., 2004 ; Hu et al., 2012 ; Wilson et al., 2012). De telles démarches permettent ainsi d'aboutir à la construction de courbes de fragilité des infrastructures routières, première échelle d'intensité mesurable (Nilsson, 2008 ; Argyroudis et Kaynia, 2014). En complémentarité, d'autres approches ont cherché à mettre en relation la mesure de ces dommages structurels avec des indicateurs d'accessibilité routière tels que la longueur, la distance et le temps supplémentaire pour effectuer un trajet. Le but étant d'évaluer la performance d'un réseau en situation perturbée, de mesurer l'intensité des pertes de service du système de transport et d'estimer la vitesse de restauration des flux (Chang et Nojima, 2001 ; Chang, 2003 ; Sohn et al., 2003 ; Bono et Gutiérrez, 2011 ; Nakanishi et al., 2013). Ce type d'application sous-entend l'urgence de la mise en sécurité des biens et des personnes en situation de crise et la gestion des évacuations

via les réseaux de transport disponibles (Chen et al., 2012 ; Lambert et al., 2013 ; Mei et al., 2013). L'accessibilité du réseau routier peut également être utilisée pour soutenir la gestion de crise et la planification d'urgence (Léone et al., 2013).

En parallèle, d'autres auteurs ont développé une approche plus probabiliste fondée sur la construction de scénarii d'impact sur les réseaux de transport, grâce à l'utilisation d'outils numériques tel que les SIG (Scaini et al., 2014) et la modélisation des perturbations routières (Ham et al., 2005 ; Arsik et Salman, 2013). Ces outils sont particulièrement adaptés pour l'aléa inondation (Suarez et al., 2005), car associés à la cartographie ils permettent la spatialisation des dommages et l'identification des tronçons routiers potentiellement affectés ou ceux encore praticables (Kalantari et al., 2004 ; Sohn, 2006).

La production scientifique articulée autour des notions de : risques naturels/réseaux de transport est relativement récente et semble encore très limitée. La grande majorité des travaux se focalisent sur trois aléas principaux : séisme, volcanisme et inondation, soit des événements naturels majeurs dont l'étendue des dégâts est importante et où les répercussions se mesurent à l'échelle nationale ou supérieure. Bien que la plupart des études portent sur les dommages structurels aux infrastructures et la spatialisation des impacts, il ne semble pas y avoir pour le moment de véritable méthode d'analyse standardisée. On note toutefois l'émergence de travaux orientés davantage sur les questions de vulnérabilité humaine et sociale. En revanche, il existe peu d'études sur les réseaux de transport en lien avec des phénomènes naturels de moindre ampleur (par opposition aux événements catastrophiques) dont les impacts se mesurent à l'échelle régionale, tel que les aléas hydro-gravitaires.

3.2. La spécificité des phénomènes hydro-gravitaires en montagne

En montagne, la disposition linéaire des corridors routiers (et ferrés) en fond de vallée les expose directement aux phénomènes hydro-gravitaires depuis les versants adjacents, auquel s'ajoute la contrainte supplémentaire d'un réseau de transport ultra fréquenté et peu connexe, c'est le cas des régions alpines. A ce titre, la littérature scientifique est très riche en travaux sur les avalanches, les glissements de terrain, les laves torrentielles et les chutes de

blocs du point de vue du zonage du risque, de la modélisation de l'aléa et de sa surveillance (Papathoma-Köhle et al., 2011). En revanche, une approche davantage centrée sur l'évaluation des enjeux et la vulnérabilité associée semble plus exploratoire (Fuchs, 2009). A l'image des phénomènes naturels de grande ampleur, le champ le plus largement investi en termes d'études de vulnérabilité des infrastructures est le bâti plutôt que les réseaux de transport. Pour appuyer ce constat, les auteurs Papathoma-Köhle et al., (2011) ont réalisé un état de l'art sur l'ensemble des études de vulnérabilité existantes vis-à-vis de ce type d'aléas dans les régions alpines. Leur conclusion est que la majorité des méthodes d'évaluation concernent effectivement le bâti, et peu prennent en compte les voies de communication tel que les réseaux routiers ou bien les vulnérabilités qui affectent la communauté comme l'économie, le tourisme, l'emploi, les activités etc. Ils notent également l'absence de réel consensus sur les méthodologies d'analyse. A leur suite, Winter et al., (2014) déclarent que l'estimation de la vulnérabilité des infrastructures routières face aux risques gravitaires semble être un domaine relativement inexploré par la littérature actuellement disponible. Malgré tout, ces dernières années voient apparaître un intérêt croissant pour cette problématique.

a) Les avalanches

L'essentiel des travaux sur les réseaux routiers portent sur l'aléa avalancheux, qui bénéficie au préalable d'un zonage du risque standardisé et conséquent. Wilhelm (1997) est un des premiers à proposer des formules empiriques d'estimation du taux de décès modulé selon les conditions du trafic, les caractéristiques du véhicule et du tronçon impacté. Fait rare en matière d'évaluation du risque, les réseaux sont souvent inclus dans les phases de simulation de l'aléa pour mieux en estimer les dommages structurels. Il est en fait largement admis que la caractérisation de cet aléa est étroitement liée à ses impacts potentiels du point de vue de son intensité, de son volume et de l'emprise spatiale sur le réseau (Kristensen et al., 2003 ; Margreth et al., 2003 ; Zischg et al., 2005 a et b ; Wastl et al., 2011).

En matière de vulnérabilité indirecte liée aux conséquences des coupures de réseau, on retrouve classiquement l'approche économique basée sur les liens de dépendance et d'importance des tronçons routiers (Rheinberger et al., 2009). Mais plus original, Hendrikx et

Owens (2008) proposent une méthodologie appliquée au risque individuel potentiel pour les véhicules stoppés sur les routes à la suite d'une avalanche.

Les études les plus récentes tendent vers une approche spatiale pour l'analyse du réseau perturbé, grâce à l'utilisation de la théorie des graphes (Erath et al., 2009), des propriétés structurelles du réseau (Tacnet et al., 2013) et la cartographie des pertes d'accessibilité du réseau routier (Léone et al., 2014), mais sans pour autant les relier aux propriétés géophysiques de l'aléa avalanche. Le projet européen *PARAMount* (paramount-project.eu) a également permis d'apporter une expertise technique à destination des institutions grâce à la cartographie des tronçons exposés à l'échelle transalpine pour les avalanches, les chutes de blocs et les laves torrentielles.

b) Les chutes de blocs

Les chutes de blocs constituent un aléa gravitaire particulièrement difficile à appréhender vis à vis des impacts sur les réseaux de transport en raison de la complexité des mécanismes de déclenchement, de la trajectographie, des variations de volumes potentiellement dommageables, mais également en raison de la difficulté que pose l'identification des lieux exposés (Partinevelos et al., 2014). En matière de gestion du risque chutes de blocs, la méthode la plus ancienne et largement acceptée par la communauté scientifique est le '*Rockfall Hazard Rating System*' développé en 1993 par l'*Oregon State Highway Division* et le *Transportation Research Board*, il est basé sur de simples observations de versants (Pierson et Vickle, 1993).

Par la suite, la plupart des études se sont concentrées sur les dommages aux véhicules et aux personnes, comme la probabilité d'impact d'un bloc rocheux sur un véhicule en mouvement circulant sur une portion de route exposée (Morgan et al., 1992 ; Bunce et al., 1997 ; Budetta, 2002 ; Mateos et al., 2014). Mais peu de travaux relient les impacts routiers à une mesure quantitative de l'aléa (Hungry et Evans, 1999 ; Budetta, 2004 ; Douglas, 2006 ; Torrebadella et al., 2013). Il semble que la plupart des recherches se font sur la base de l'analyse des données historiques et d'observations d'évènements passés (Guzzetti et al., 2004 ; Pantelidis, 2010). Budetta et Nappi (2013) misent plutôt sur la création d'une échelle de mesure qualitative en vue d'estimer le niveau de risque par tronçon routier. Enfin, très récemment le projet *R.O.M.A* (Mignelli et al., 2013a, 2015b) propose quant à lui une méthode

plus globale permettant de quantifier le risque de chute de blocs sur les réseaux routiers à l'échelle régionale en Italie grâce à la création d'un indice de susceptibilité des versants surplombant les routes. Bien qu'axée sur l'aspect humain et moins sur l'aspect structurel du réseau, la méthode s'applique à la protection des usagers de la route, à la prise en compte des dommages physiques aux véhicules et aux perturbations du trafic tel que les retards.

c) Les glissements de terrain

Une des premières études traitant de l'évaluation de la vulnérabilité en lien avec les aléas géologiques est celle de Mejia-Navarro et al. (1994). Le principe repose sur la cartographie de différentes parcelles de territoire classées selon des aspects économiques, sociaux et environnementaux. Ces dernières incorporent l'ensemble des aléas concernés et estiment le degré de vulnérabilité selon la présence de divers éléments comme la densité de population, la présence de bâtiments (et leur fonction), la présence de réseaux de communication (routier, téléphone, électricité, etc.). Les réseaux routiers figurent donc dans la chaîne d'évaluation du risque. A leur suite, Léone et al. (1996a.b.c) créés des matrices d'endommagement croisant la vulnérabilité des éléments exposés avec les glissements de terrain. Ces dernières permettent de classer et de hiérarchiser les types et les niveaux de dommages aux infrastructures. Cependant, ces matrices ne sont pas reliées à une mesure quantitative de l'aléa, comme l'intensité et la fréquence des évènements par exemple. En revanche, Zezere et al. (2008) mettent en relation une échelle de vulnérabilité aux infrastructures (bâtiments et routes) pour chaque type de glissement de terrain et le nombre d'évènements associés. Malgré tout, la mesure quantitative de l'aléa de type intensité-durée et sa spatialisation ne sont pas non plus prises en compte. Pour les éléments exposés, ils retiennent l'âge, l'état du matériel et ils établissent une typologie des routes en fonction de leur valeur d'usage et de leur importance (autoroute, nationale, rurale etc.).

Fell et al. (2008) évoquent la nécessité de prendre en compte les réseaux de transport en matière de zonage du risque glissement de terrain et pour la planification des actions d'aménagement du territoire. De même, Galli et Guzetti (2007) cartographient la vulnérabilité des bâtiments et des routes en s'appuyant sur un inventaire de 130 glissements ayant endommagés des infrastructures. Cette démarche à posteriori bénéficie d'un échantillon conséquent et relativement représentatif, ce qui permet en outre d'établir des courbes de

vulnérabilité bien qu'elles ne soient pas encore spécifiques aux réseaux. En parallèle, Bonachea et al. (2005, 2009) ont développé une méthode quantitative pour la gestion du risque gravitaire sous la forme d'une analyse monétaire et probabiliste de la vulnérabilité. Ils prennent en compte la valeur des éléments exposés (matériel et activités économiques) et les dommages attendus sur ces éléments en lien avec des modèles basés sur l'occurrence des glissements de terrain et le recensement de dégâts passés. Les scénarii testés permettent d'estimer l'ordre de grandeur des pertes attendues pour une période donnée. Ils abordent ainsi certains aspects de la vulnérabilité directe mais aussi indirecte tout comme les aspects spatio-temporels de l'aléa. Cette tendance à la monétarisation du risque est reprise par Remondo et al. (2008) où la cartographie repose sur un modèle de susceptibilité aux mouvements de terrain en lien avec une évaluation financière théorique du risque (euros/pixel/an). Bien que cette démarche soit assez généraliste dans sa manière d'attribuer une valeur monétaire aux biens, elle permet d'estimer globalement les pertes économiques liées à une coupure de réseau. D'autres travaux plus axés sur les mécanismes d'initiation du phénomène ont relié l'occurrence des événements avec les seuils de précipitations pour en déterminer la probabilité spatiale et temporelle d'un impact sur un tronçon routier donné (Jaiswal et Van Westen, 2009 ; Geertsema et al., 2009 ; Jaiswal et al., 2010).

Les travaux les plus récents tendent à s'appuyer sur les méthodes largement développées sur les séismes pour quantifier les impacts physiques sur les réseaux routiers. A ce titre Pitilakis et Fotopoulou (2011) transposent et adaptent les courbes de fragilité des infrastructures aux aléas hydro-gravitaires pour l'évaluation de la vulnérabilité directe structurelle.

d) Les laves torrentielles

Souvent confondues et/ou intégrées dans les études de glissement de terrain, les premières études sur l'interaction spécifique entre l'aléa lave torrentielle et les réseaux de transport apparaissent à la suite des travaux de Coe et al. (2003). Valable uniquement le long d'un corridor touché à l'échelle locale, leur approche est basée sur la morphométrie du bassin torrentiel et des observations géomorphologiques associées à un inventaire historique des impacts. A leur suite, les travaux de Wiczorek et al. (2004) ont consisté à identifier, caractériser et localiser les tronçons routiers exposés à cet aléa à l'échelle régionale dans le

cadre d'évènements météorologiques extrêmes. En parallèle, Michael-Leiba et al. (2000), et Glade et Elverfeldt (2005) font des suggestions sur l'évaluation de la vulnérabilité humaine exposées aux laves torrentielles sur les réseaux routiers. Enfin, dans le même cas de figure que les chutes de blocs, Budetta (2002) s'intéresse plutôt au matériel roulant et suggère de calculer '*un risque moyen au véhicule*' dans le but de mesurer la probabilité spatiale qu'un véhicule soit impacté directement en circulant sur un tronçon routier exposé aux laves torrentielles.

Comme c'est le cas pour les glissements de terrain, des travaux récents inspirés des méthodes développées à l'origine pour les séismes (Pitilakis et al., 2006) ont permis de mesurer de manière quantitative les modalités d'endommagement structurel du réseau. Ces approches sont basées sur la construction de courbes de fragilité liées aux différents éléments constitutifs de la route, en vue d'en estimer la vulnérabilité physique (Quan Luna et al., 2011 ; Papathoma-khöle et al., 2012). Mais à contrario des études sur les dommages, celle de Ferrero et Migliazza (2013) s'attarde plutôt sur les aspects géotechniques et leurs implications sur les infrastructures routières, en se focalisant sur la stabilisation des pentes et sur les types d'ouvrages techniques d'atténuation envisageables. En complément, Pramudita et al. (2014) soulève la question des volumes de matériaux déposés sur la chaussée et les moyens techniques de désobstruction du tronçon bloqué.

Une attention toute particulière est portée sur le projet européen *Safeland* (<http://www.safeland-fp7.eu>). Le but était d'évaluer l'aléa glissement de terrain, les effets du changement climatique et de proposer des stratégies pour la gestion du risque à l'échelle européenne grâce à un consortium de scientifiques et de gestionnaires publics multinationaux. Ce projet est évoqué ici parce que la partie consacrée aux réseaux de transport était nettement plus axée sur l'aléa lave torrentielle.

Parmi les nombreux résultats du projet, le livrable D2.10 (2010) a identifié et cartographié à l'échelle européenne les réseaux de transport (routiers et ferrés, via des bases de données OpenStreetMap.org) potentiellement exposés à l'aléa, avec une comparaison du nombre de tronçons affectés (en kilomètres linéaires) selon les pays. En complément, le livrable D3.9 (2012) s'est focalisé sur trois secteurs : en France dans la vallée de l'Ubaye (Alpes de Haute-Provence), en Norvège et en Écosse. Le travail a consisté à identifier les

tronçons exposés (en kilomètres linéaires), leur classement administratif et (uniquement pour l'Écosse) le nombre de véhicules circulant par an par tronçon. Ces informations ont ensuite été croisées avec la probabilité d'occurrence de l'aléa afin de déterminer une échelle de risque qualitative pour un scénario actuel puis constater son évolution avec un scénario projeté en 2050. Mais le rapport le plus complet en matière de vulnérabilité du réseau routier est le livrable D2.5 (2011) associé aux publications de Winter et al. (2013, 2014). Il propose une méthodologie basée sur la distribution d'un questionnaire à destination des experts en lave torrentielle et en dommages routiers. Après analyse statistique des réponses, des courbes de fragilité ont été développées en fonction de la typologie des routes (liaison locale ou liaison à haute vitesse), du type de dommages physiques (limités, sérieux, destructeurs) et selon le volume de matériaux déposés sur la chaussée. Ces travaux ont été particulièrement portés et valorisés par l'équipe Écossaise du projet. En effet, c'est à la suite d'évènements majeurs ayant eu lieu en 2004 touchant plusieurs axes routiers importants situés en Écosse, qu'un rapport scientifique est venu en appui du rapport technique officiel du service '*Transport Scotland*'. Parmi les propositions sur les méthodes d'analyse des impacts-réseau, l'équipe attribue un '*score risque*' à chaque tronçon routier géoréférencé en multipliant un '*score aléa*' (calculé à partir du matériel mobilisable disponible par un évènement, des conditions hydrologiques du sol, de l'occupation du sol, du nombre de chenaux fonctionnels et selon la pente) avec un '*score exposition*' (calculé à partir du niveau de trafic, la longueur potentielle de déviation, la proximité de la route avec le versant). Le but étant de cerner les zones prioritaires à sécuriser pour les décideurs locaux (Winter et al., 2005, 2006, 2008, 2009 et 2010).

Bien que la relation dommages et processus soit généralement de mise dans les études de réseau liée à l'aléa lave torrentielle, la majorité semble se focaliser sur la vulnérabilité directe. Les études appliquées à déterminer les conséquences des coupures de réseau et ses répercussions sur le territoire sont plus rares. Pourtant Petrova (2006) souligne que l'intensité des dommages et ses effets ne dépendent pas seulement de l'aléa, mais aussi des mesures de protection et de prévention mis en œuvre. On retrouve une partie de cette notion dans les travaux de Perrin et al. (1997) lors de la réalisation d'un rapport de type retour d'expérience sur un évènement torrentiel majeur en zone urbaine à Quito en Équateur. A leur suite, Demoraes et D'Ercole (2009) reprennent en carte cet évènement particulier en concentrant leur travail sur les éléments du territoire vulnérables (population, disponibilité en eau et

nourriture, capacités médicales etc.) en conséquences des pertes d'accessibilité sur le réseau routier.

Plus récemment, une étude est parvenue à lier la vulnérabilité directe physique du réseau routier avec la modélisation probabiliste des vulnérabilités indirectes fonctionnelles et territoriales dans les Alpes françaises (Léone et al., 2011). Malgré le fait que ces travaux soient coupés des propriétés géophysiques intensité/fréquence de l'aléa, ils fournissent une cartographie régionale de la dégradation de l'accessibilité territoriale à la suite d'une coupure sur les tronçons exposés. Ils établissent également un diagnostic de la vulnérabilité du réseau routier alpin français. Ces travaux intégrés au sein du projet *Scampeï* (www.cnrn.meteo.fr/scampeï) seront repris beaucoup plus en détails en chapitre 2.

De même, Keller et al. (2014) ont tenté une approche exploratoire axée sur les perturbations fonctionnelles en reliant un événement météorologique extrême ayant conduit à la formation de plusieurs laves torrentielles avec les impacts multiples engendrés sur le réseau routier. L'usage de la cartographie sert ici à superposer à l'échelle régionale les tronçons touchés, leur importance, et le taux de précipitations. L'approche informe également sur l'état du tronçon affecté puisqu'il renseigne la présence ou non de perturbations du trafic et s'il y a une fermeture partielle ou totale d'une portion du réseau.

Enfin, le projet européen ARNICA (www.lgp.cnrs-bellevue.fr/arnica ; 2011-2013) dans lequel s'intègre cette thèse s'est intéressé à l'évaluation probabiliste des risques liés aux laves torrentielles et leurs impacts sur les réseaux de transport routiers dans le contexte de changement climatique futur.

Conclusion et problématique

Le cadre conceptuel autour des réseaux de transport détaillé ici permet de dresser un inventaire des types de vulnérabilités déclinées selon les propriétés des réseaux en termes d'usage, d'infrastructures et d'organisation spatiale. Ces définitions usuelles servent d'accroche pour une analyse plus approfondie d'un endommagement du réseau dont l'origine est naturelle, qui plus est en milieu fortement contraint subissant une exposition chronique aux phénomènes gravitaires.

Ces dernières années ont vu l'émergence d'études progressivement orientées sur cette problématique dont les points forts, les limites et les besoins peuvent être résumés en cinq points :

- i. Comme la plupart des études appliquées au domaine de la vulnérabilité, la production scientifique relative aux réseaux de transport souffre de la primauté aux impacts sur le bâti. Malgré tout, quel que soit le type d'aléa à l'origine des dommages, il existe une grande diversité des approches sur l'évaluation de la vulnérabilité directe et une méthodologie généraliste semble se profiler. Ceci est valable pour l'identification des lieux les plus exposés et la mesure des dommages physiques aux infrastructures. La prédominance des travaux va aussi en faveur de la monétarisation des dommages. En revanche, les études plus axées sur la vulnérabilité indirecte que ce soit au niveau des perturbations fonctionnelles du réseau et/ou les conséquences territoriales qui en résultent sont nettement plus rares.
- ii. Il n'existe pas ou très peu d'informations sur la gestion institutionnelle et opérationnelle de ces événements dommageables au réseau. Ceci concerne l'identification des acteurs, le processus décisionnel, la planification des actions, ou tout simplement l'analyse de la capacité de réponse des institutions face à ce type de crise. Ce constat peut s'expliquer par le caractère multidimensionnel de la vulnérabilité des réseaux qui touche à plusieurs champs académiques, par la disparité et la complexité des approches réalisées jusqu'à présent. Pourtant, l'évaluation de la vulnérabilité institutionnelle du réseau peut être un outil utile aux acteurs impliqués dans la gestion de crise, un paramètre supplémentaire à prendre en compte pour la gestion des risques. Elle doit être également à la portée d'un public de non-spécialistes pour être efficace.

- iii. La connexion vulnérabilité/aléa est très disparate selon les études, elle dépend bien souvent du type de phénomène naturel ad hoc. Pourtant cette dépendance ne peut être sous-évaluée dans une démarche d'analyse du risque-réseau. Il est globalement admis de croiser les bases de données historiques des événements avec les impacts réseau. Mais il serait judicieux de prendre en compte les propriétés géophysiques du processus naturel, les conditions au déclenchement, les volumes de matériaux mobilisés, la trajectographie et l'évolution de la dynamique intensité-fréquence sur une période de référence.
- iv. Il ne semble pas exister de cadre prédéfini pour l'échelle spatiale d'analyse du réseau, d'où la question de la pertinence de l'échelle choisie pour son évaluation. Au vu de la complexité des propriétés d'un réseau de transport, il peut être judicieux de s'orienter sur un système d'emboîtement d'échelles spatiales pour l'analyse des impacts. La cartographie présente un intérêt majeur pour une vue d'ensemble et l'usage des SIG permet la mise en interaction d'indicateurs sur l'aléa, sur l'état des tronçons et sur les cibles socio-économiques. Par ailleurs, très peu d'études évoquent l'aspect temporel d'un dommage au réseau que ce soit au niveau des conditions de circulation (selon l'heure, la période de l'année, etc.) que sa capacité de résilience en cas d'impact ou bien la fréquence des impacts.
- v. Malgré une volonté pour développer une méthodologie qui soit transposable à d'autres sites ou à d'autres situations, l'ensemble des approches sont très sectorielles et peu mutualisées : il ne semble pas encore y avoir de véritable méthode d'analyse systémique du risque-réseau.

Chapitre 2 – Laves torrentielles et réseau routier alpin : Une situation représentative du Risque-Réseau

Les aléas hydro-gravitaires répertoriés dans les régions alpines représentent plus des $\frac{3}{4}$ des événements naturels recensés dans les archives publiques (Thénard, 2009). Cette prépondérance est le résultat du grand nombre de bassins-versants torrentiels présents dans les Alpes, de leur forte occurrence mais également de leur caractère dommageable. En effet, les torrents épandent généralement leur énergie et leur charge sédimentaire dans les fonds de vallée, densément urbanisés (Lievain, 2003). En parallèle, le tourisme est devenu le premier apport économique pour ces régions, or les touristes viennent par la route (Veyron, 2012). L'exposition des enjeux a également été encouragée par la réduction de l'emprise spatiale des torrents et par des exigences de sécurité accrues, augmentant de ce fait la vulnérabilité des infrastructures, tel que les réseaux routiers. Aujourd'hui, ces territoires tentent de concilier les acquis touristiques et le risque torrentiel, au sein d'un espace contraint et peu connexe.

1. L'aléa lave torrentielle : Terminologie, dynamique et stratégies de protection

Avant toute analyse de réseau, il convient de s'attarder sur la définition d'un système torrentiel, les mécanismes de déclenchement et de propagation.

1.1. Terminologie et définition du système torrentiel

En montagne, la notion de *torrent* renvoie directement à l'idée d'un cours d'eau situé sur un versant à forte pente et disposant d'une importante fourniture en matériaux solides (Meunier, 1989). Selon la classification littéraire classique des cours d'eau, la pente moyenne longitudinale du lit d'un torrent doit excéder 6%. C'est dans ces chenaux préexistants caractérisés par une inclinaison souvent forte que survient l'aléa lave torrentielle (CREALP, 2007). La représentation schématique d'un bassin-versant torrentiel suit généralement trois zones fonctionnelles (Figure 7), facilement identifiables sur site :

- Une zone d'ablation en partie supérieure correspondant au bassin d'alimentation. Il s'agit de la zone de production et de contribution en matériaux potentiellement mobilisables par le torrent.
- Une zone de transit en partie médiane où se trouve le chenal d'écoulement.
- Une zone de sédimentation en partie inférieure, communément appelée cône de déjection. Cette dernière contribue peu à la production sédimentaire, sauf cas de remobilisation des sédiments.

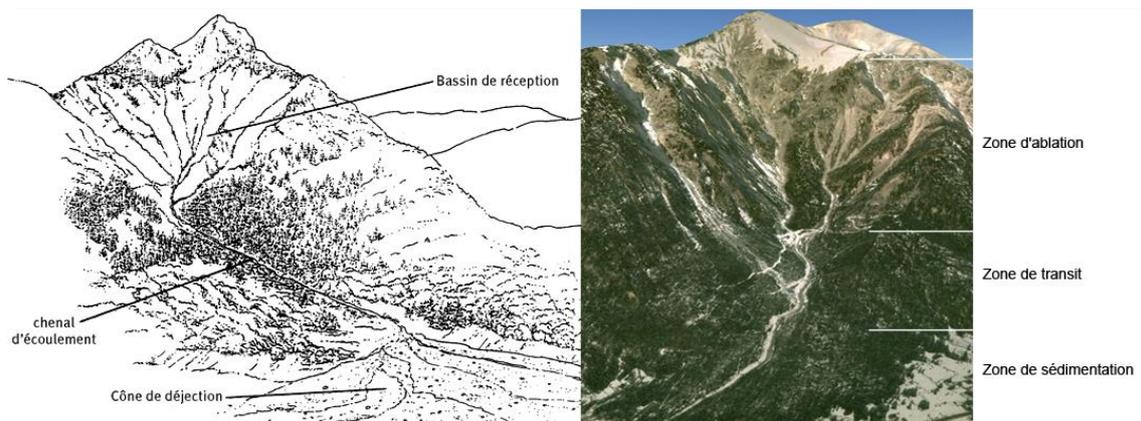


Figure 7. Représentation schématique d'un bassin-versant torrentiel. (Source à Gauche : IRSTEA)

Ce sont exclusivement ces systèmes géomorphologiques en zone montagneuse qui peuvent occasionner l'aléa lave torrentielle. Les laves torrentielles appartiennent aux mouvements de versant à dynamique dits rapides et de type écoulement. Cependant, le terme même de lave torrentielle est souvent source de confusion faute de réel consensus sur sa définition lexicale. L'expression était à l'origine employée par les montagnards des Alpes de Haute-Provence et par extension par les forestiers chargés de la correction des torrents au début du 20^e Siècle (Ouxami, 1906). Cette désignation au sens large regroupe tout un ensemble de phénomènes d'écoulements tel que les coulées boueuses, les coulées de débris ou les crues torrentielles. L'introduction du mot 'lave' contribue également à l'ambiguïté du type de phénomène pour un public non spécialiste. En revanche, sa forme Anglo-Saxonne se contentera de *debris flow* pour désigner ce type de processus (Tableau 3).

Tableau 3. Terminologie des mouvements de terrain de type écoulement dans la littérature anglophone (d'après Le Mignon, 2004)

Type	Varnes - 1978	Hutchinson - 1988	Hungr et al - 2001
Glissement-coulée	Mudslide	Flow Slide Slump Earthflow	Flow Slide
Coulée de boue	Earthflows	Mudslide	Earthflows
Lave torrentielle	Debris Flows	Debris Flows	Debris Flows Mudflow

En mécanique des fluides, la distinction entre les laves torrentielles et les autres mouvements de versant de type écoulement peut être établie à partir de la viscosité des matériaux et de leur concentration en eau (Figure 8). Cette différence n'est pas constante dans l'espace et dans le temps puisque un écoulement hyper-concentré ou une lave torrentielle peuvent par exemple être engendrés par un même torrent selon les conditions du milieu voir lors d'un même évènement.

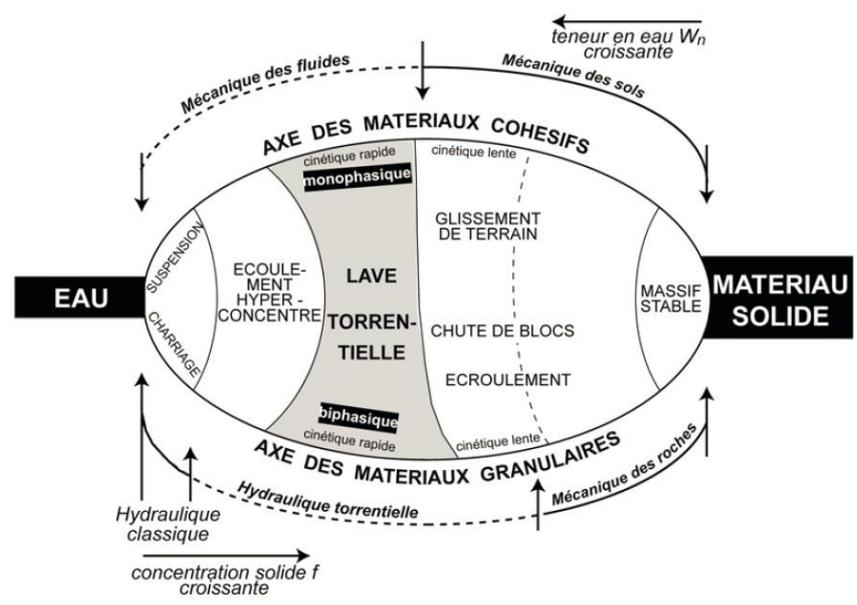


Figure 8. Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau (Meunier, 1991)

Classiquement, la définition morphologique d'une lave torrentielle correspond à un mélange fluide à une seule phase visqueuse et à matrice boueuse (Meunier, 1991), fortement concentré en eau et en particules solides, de l'échelle du micron à celle du mètre/ou plus (entre 45 et 80% de volume en fraction solide dans l'écoulement). Générée par l'érosion

progressive des versants et des berges d'un chenal torrentiel, la masse glissée est caractérisée par un comportement rapide des matériaux transportés (Hung, 2005). Les laves torrentielles ont un caractère imprévisible, soudain et violent et se produisent durant une très courte durée, leur vitesse étant comprise entre 1 et 20m.s⁻¹ elles doivent leur pouvoir de destruction de l'interaction de ces forces solides et fluides (Iverson, 1997 ; Remaître, 2006). De même, leur charge solide peut être considérable mais aléatoire puisque les volumes mobilisés peuvent varier de quelques milliers, à plusieurs millions de mètres cubes selon l'appareil torrentiel, sur des distances allant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Des volumes de matériaux supérieurs à 10⁵ m³ sont courants (Sauret, 1987).

Enfin, les laves torrentielles se distinguent des crues 'classiques' dans la mesure où elles restent presque exclusivement confinées dans le lit du torrent (Manche, 2000). Ainsi, le chenal d'écoulement torrentiel est délimité et modelé au fur et à mesure des événements (Remaître, 2006), permettant la formation d'un cône de déjection situé en aval et de taille importante s'il n'est pas déjà affouillé par un cours d'eau adjacent.

1.2. Morphologie et cinématique

La genèse des laves torrentielles implique plusieurs actions, à savoir la préparation des terrains en place et la présence d'eau en quantité adéquate (Meunier, 1991), afin de fournir des stocks de matériaux disponibles pour l'écoulement. La cinématique d'une lave torrentielle se constitue quant à elle de trois phases distinctes: le déclenchement, la propagation et le dépôt (Remaître, 2006), phases qu'il convient de développer brièvement pour mieux en saisir les mécanismes.

1.2.1. L'initiation du phénomène

Plusieurs processus complexes d'érosion permettent la production de matériaux potentiellement mobilisables dans les zones de contribution. Mais Reid et Dune (2003) proposent de distinguer deux types principaux d'érosion, celles-ci pouvant être complémentaires sur certains bassins torrentiels :

a) Les processus chroniques

Ce sont les versants qui subissent une ablation modérée, dont la vitesse de recharge et la quantité produite sont facilement mesurables. Outre des phénomènes classiques de ravinement et d'éboulis, le matériel d'origine résulte souvent de la fragmentation mécanique issue de l'alternance gel-dégel de la roche. Elle peut également être due à une remobilisation des matériaux dans le chenal ou bien être issue de la fonte locale du pergélisol en surface. L'accumulation de matériaux dans le chenal torrentiel et au niveau des zones de contribution seront ensuite mobilisés pendant l'évènement (Jomelli, 2002). La gélifraction étant dépendante de la lithologie, la fréquence des laves torrentielles dépend donc de la vitesse de reconstitution du stock de débris potentiellement mobilisable. Par conséquent, une seconde lave ne peut pas avoir lieu dans un même torrent si ce stock n'est pas reconstitué (Pech et Jomelli, 2001), cette fourniture en matériaux étant liée à l'intensité/ durée des périodes de gel-dégel. Toutefois, il est à noter qu'un retard peut être observé entre les phases de gel et les phases de libération de débris (Pech et Jomelli, 2001). De nombreux évènements historiques français relatifs à ce type de processus peuvent être cités tels que: le Grand Bornand le 14 juillet 1987 ayant entraîné la mort de 19 personnes sur un camping, le torrent du Claret en Savoie le 2 juillet 1987 ou encore le torrent du Bez le 24 juillet 1995 avec 1,7 millions de francs de dégâts.

b) Les processus discrets

Dans ce cas de figure, le matériel mobilisable provient généralement d'une source unique, dans la mesure où les débris résultent de l'évolution du front d'un glissement de terrain situé à proximité/ et ou en amont du chenal torrentiel. Ils peuvent également provenir de la déstabilisation progressive d'un versant due à un manque de cohésion interne du substrat rocheux et/ou des formations superficielles telles que les moraines. Particulièrement soudain et violent, un glissement de terrain peut évoluer en lave torrentielle par fluidification de sa masse glissée (Malet, 2003) ou bien par embâcle progressif. La recharge en matériaux est alors très importante avec d'importants volumes mobilisés. Iverson et al. (1997) établissent l'inventaire des différents processus en jeu dans la formation de ce type de coulée de débris. Des cas célèbres illustrent ce phénomène en France comme le glissement de la Valette dans les Alpes de Hautes Provence (Travelletti, 2011) et ou bien le torrent de

Pontamafrey en Savoie (Anchierry, 1966). Un autre cas plus rare est celui de la vidange brutale de poches d'eau sous-glaciaire ou d'un lac glaciaire.

Les conditions géomorphologiques participent également activement à la formation et au comportement d'une lave torrentielle, comme la morphologie du chenal, son profil en long, la largeur de la bande active, la pente, la rugosité, le degré d'engravement du lit, l'existence de ruptures de pente, la présence ou absence de végétation sur les versants, etc. Enfin, le type de lithologie conditionne fortement le comportement de la masse glissée. Par exemple, en présence de roches calcaires, de schistes ou de flyschs, la masse glissée sera davantage granulaire, contrairement à des terrains marneux et meubles qui conduiront à une lave plus visqueuse et plastique. Les formations superficielles constituent également une importante fourniture en matériaux lorsqu'elles sont peu consolidées, selon la fraction argileuse qu'elles contiennent ou selon le degré d'altération physico-chimique qu'elles présentent.

Le dernier paramètre élémentaire et indispensable dans la formation des laves torrentielles est l'eau. Elle joue un rôle prépondérant aussi bien dans la phase de préparation, par rapport à l'état hydrique initial du bassin-versant (fonte des neiges, degré de saturation des sols, altérations physico-chimiques par les circulations internes de l'eau, etc.), que dans la phase de déclenchement. Les forçages météorologiques tels que les orages et une forte intensité/durée des précipitations sont capables de générer des écoulements pouvant mettre en mouvement de grandes quantités de matériaux non consolidés (boue, blocs rocheux, débris divers, etc.) (ONERC, 2008). Toutes les coulées de débris sont provoquées sauf exceptions, à la suite de périodes de pluies abondantes et localisées, principalement en période estivale.

1.2.2. La phase de propagation

En termes d'écoulement, une lave torrentielle se comporte comme un fluide non newtonien, en raison de sa viscosité, de la force de friction des particules et de la rigidité initiale du mélange (Meunier, 1994). Mais elle n'observe pas non plus la cinétique 'classique'

des mouvements de terrain (Remaître, 2006). La composante motrice de la force gravitaire constitue un paramètre essentiel pour le transport solide. L'ensemble permet ainsi d'accélérer les écoulements, d'entraîner les particules sédimentaires et des éléments grossiers volumineux grâce à une grande capacité de transport des matériaux. Ces forces permettent d'exercer des forces d'arrachement au sein du lit torrentiel.

Cependant l'écoulement d'une lave n'est pas uniforme mais pulsé, une lave torrentielle se propage sous la forme de 'bouffées successives' (Meunier, 1991 ; Remaître 2006). Chaque 'bouffée' se traduit par une augmentation du débit. Malgré une grande hétérogénéité granulométrique, chaque bloc charrié ne se déplace pas de manière indépendante. Il se trouve englobé dans une matrice et enroulé dans la masse en mouvement quel que soit sa dimension. Une relation est établie entre les blocs transportés et la contrainte de cisaillement nécessaire à la mise en mouvement de la coulée de débris (Johnson, 1970). En termes de charge solide, la propulsion est généralement supérieure à 50% de la masse totale glissée avec des teneurs en eau plus ou moins faibles malgré une forte densité (Pierson, 1980 ; Takahashi, 1981). Au cours de l'écoulement, plusieurs entités fonctionnelles peuvent être identifiées, à savoir le front, le corps et la queue, observables en Figure 9.

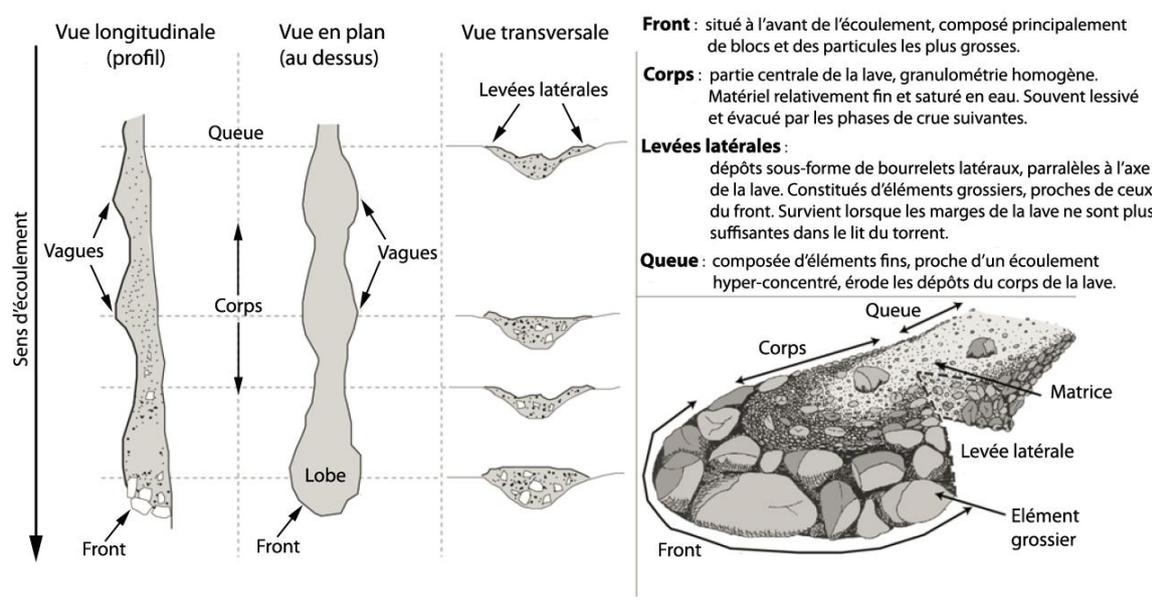


Figure 9. Morphologie générale d'une lave torrentielle (adapté de Remaître, 2006)

1.2.3. La phase de dépôt

Suite à l'évènement, des dépôts lobés se forment avec l'arrêt en masse des matériaux, lorsque les conditions requises pour permettre l'écoulement ne sont plus suffisantes (diminution ou rupture de la pente, faiblesse de la force motrice gravitaire, baisse de la teneur en eau dans la matrice, forte rugosité, etc.). Ce dépôt est observé le plus souvent sur le cône de déjection, sur lequel s'ensuit un phénomène de sédimentation qui contribue à construire le cône. A noter qu'aucun tri granulométrique n'y est opéré. Dans certains cas, la canalisation de l'écoulement dans le chenal et la géométrie de celui-ci ne permettent plus véritablement la mise en place d'un nouveau dépôt. En conséquence, la plupart des matériaux sont directement évacués delà du cône, par les rivières de fond de vallée, au risque de provoquer des embâcles. Le cas historique de Pontamafrey en vallée de Maurienne illustre encore une fois ce cas de figure lors de l'évènement majeur de 1965 ayant provoqué un embâcle de la rivière Arc sur près de 7km en aval.

1.3. Les stratégies de protection contre l'aléa torrentiel

Le caractère imprévisible des laves torrentielles rend difficile la gestion de ce risque. Les moyens de protection mis en œuvre à l'heure actuelle misent principalement sur de lourds travaux de correction torrentielle à caractère permanent, visant soit à modifier la dynamique du torrent, soit à diminuer les effets des laves sur les infrastructures situées en aval tel que le bâti, les routes ou les voies ferroviaires bien souvent situés sur les cônes de déjection. Mais pour des raisons techniques et de faisabilité, la plupart des ouvrages de génie civil se concentrent sur les zones de transit et de dépôts des bassins torrentiels, tels que les seuils, les plages de dépôts, systèmes de détection, etc. (Besson, 1996). Dans les bassins de réception, l'approche consiste généralement à identifier les zones de contribution les plus propices à la fourniture de matériaux.

Dans les Alpes françaises, la construction et l'entretien de ces ouvrages sont en grande majorité à la charge du service de la Restauration des Terrains en Montagne dits RTM (actuelle branche de l'ONF dont le domaine de compétence est principalement départemental). Historiquement, le service de la Restauration des Terrains en Montagne créé en 1882 avait

pour mission de reboiser massivement les versants pour lutter contre l'érosion des sols, régulariser le régime des cours d'eau et protéger les hommes et ses installations contre les catastrophes naturelles (Audrechy, 2001). Ainsi, les travaux de Mougin (1914) en Savoie, de Surell (1870) dans les Hautes-Alpes et de Demontzey (18N94) pour les Alpes de Haute-Provence sont reconnus comme les premiers à s'orienter sur la correction torrentielle et le recensement des évènements. Plus rarement la tâche peut être confiée à des entreprises privées sollicitées par les communes via un système d'appel d'offres.

Le bon fonctionnement des ouvrages nécessite cependant un entretien régulier coûteux et un curage systématique des matériaux accumulés après l'évènement. Dans le cas des axes routiers, un canal d'écoulement et/ou des ouvrages de canalisation tel que des avaloirs et des buses d'écoulements peuvent être créés sur les cônes de déjection ou sur les apex afin d'endiguer les torrents, de contraindre les écoulements et/ou détourner le lit du torrent au-dessus ou au-dessous des routes.

Outre les moyens de protection permanents, des moyens de prévention sont de plus en plus développés, ils reposent sur une observation attentive et continue des phénomènes, fondé sur une compréhension accrue des mécanismes d'hydraulique torrentielle (Dossier Départemental des Risques Majeurs, 2006). De nombreuses communes disposent aujourd'hui d'outils règlementaires tel que la cartographie des zones à risques : P.P.R.N (Plan de Prévention des Risques Naturels) et/ou d'un P.L.U (Plan Local d'Urbanisme) afin de permettre une prise en compte du risque dans l'aménagement des zones urbanisées et de sensibiliser le public et/ou les acteurs du territoire face à ce type d'aléa.

2. Interaction : dynamique torrentielle/enjeux réseaux dans les Alpes françaises

2.1. Contexte historique et géographique

Cette partie repose sur le traitement statistique, l'analyse cartographique et l'appréciation qualitative des bases de données sur les événements lave torrentielle mais également sur le maillage du réseau alpin et l'identification des principaux enjeux territoriaux sur trois départements des Alpes françaises.

2.1.1. Répartition spatiale et temporalité des événements

Ce travail s'appuie en majeure partie sur les bases de données historiques des services RTM disponibles et accessibles en libre consultation pour les départements suivants : la Savoie (73), les Hautes-Alpes (05) et les Alpes-de-Haute-Provence (04). Appelée '*BD Évènements*' cette dernière recense l'ensemble des bassins versants actifs et les événements lave torrentielle associés depuis 1950 (on y retrouve les terminologies lave torrentielle, crue torrentielle et coulée de boue). Pour chaque événement, la base de données renseigne le nom du torrent concerné, la commune, la date, la nature du phénomène et des informations additionnelles qualitatives telle que les circonstances de l'événement, les impacts occasionnés s'il y en a, parfois les conditions météorologiques et exceptionnellement les volumes mobilisés. Cette base de donnée a été harmonisée avec celles du Conseil Général des Hautes-Alpes (CG05, Direction des Infrastructures) et celles du Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM, '*BDmvt*').

Chaque bassin-versant recensé s'est vu ensuite attribuer un code unique d'identification (LGP : '*BDBV- IDsite*' ; Pavlova, 2013). Une fois l'information vectorisée et géoréférencée, les travaux d'Irina Pavlova ont permis d'obtenir un fond cartographique des enveloppes surfaciques des zones d'ablation, de l'apex et des zones d'accumulation (Figure 10) pour chaque bassin-versant. Cette spatialisation des bassins versants couplée à la base de données Évènements permet alors de repérer rapidement les corridors montagneux les plus

exposés à ce phénomène. C'est le cas particulièrement pour la vallée de la Maurienne en Savoie, le territoire Briançonnais dans les Hautes-Alpes et la vallée de L'Ubaye/Barcelonnette dans les Alpes-de-Haute-Provence. Au total pour les trois départements, on dénombre 286 bassins versants actifs répertoriés entre 1950 et 2012 (Pavlova, 2013) dont 220 ont au moins une fois occasionné un impact sur les réseaux de transports (routier et ferré confondus), soit 965 évènements dont 504 évènements avec endommagement du réseau (Léone et Deymier, 2011). Ce cas de figure est particulièrement visible pour l'arc de la vallée de Maurienne en Savoie (Figure 11). Le département des Hautes-Alpes semble nettement plus affecté puisque la proportion des évènements dommageables par rapport à la totalité des évènements est plus élevée et ce particulièrement dans les petites vallées. En revanche, malgré le nombre de bassin-versants actifs répertoriés dans les Alpes de Haute Provence, peu semblent affecter le réseau routier au regard du nombre d'évènements.

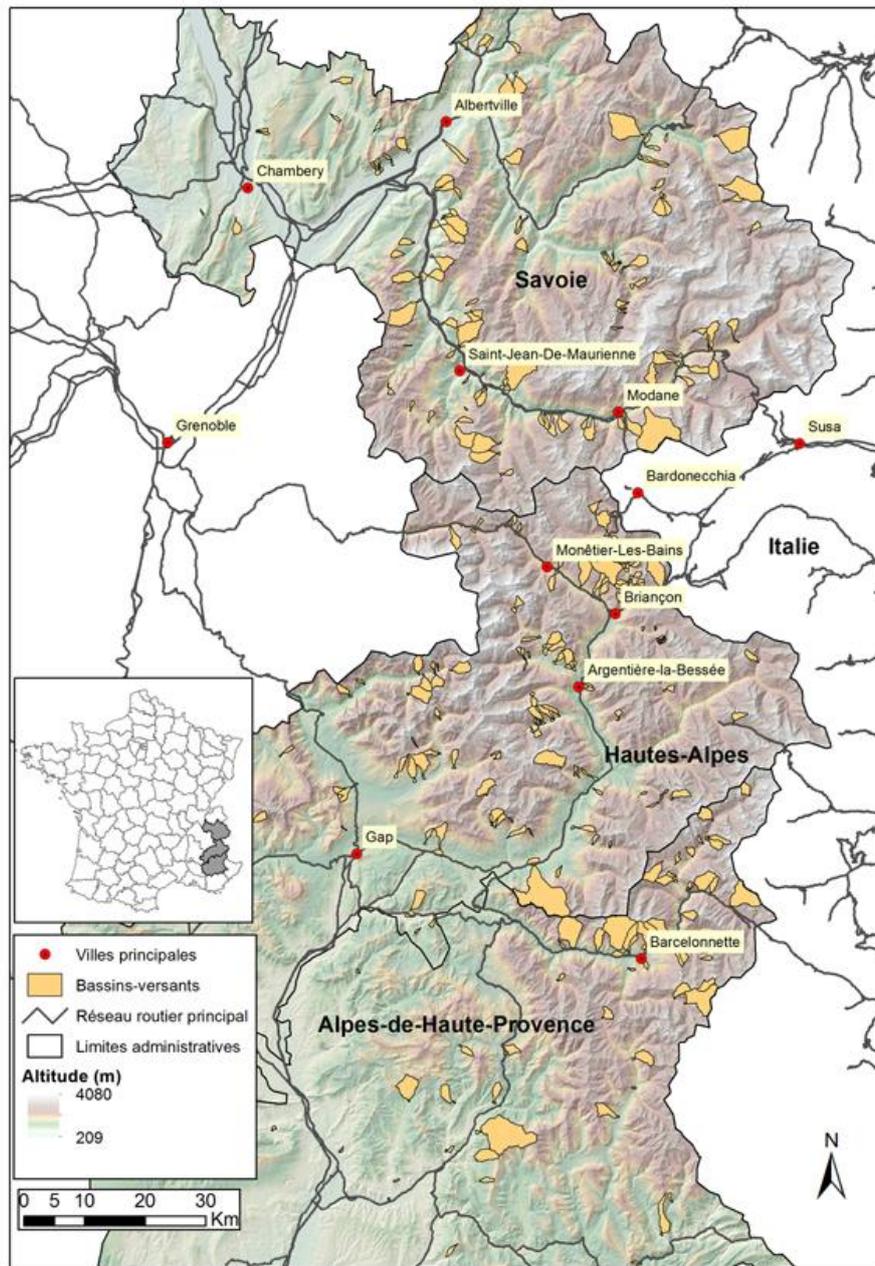


Figure 10. Localisation des bassins-versants alpins actifs de 1950 à 2012 (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence)

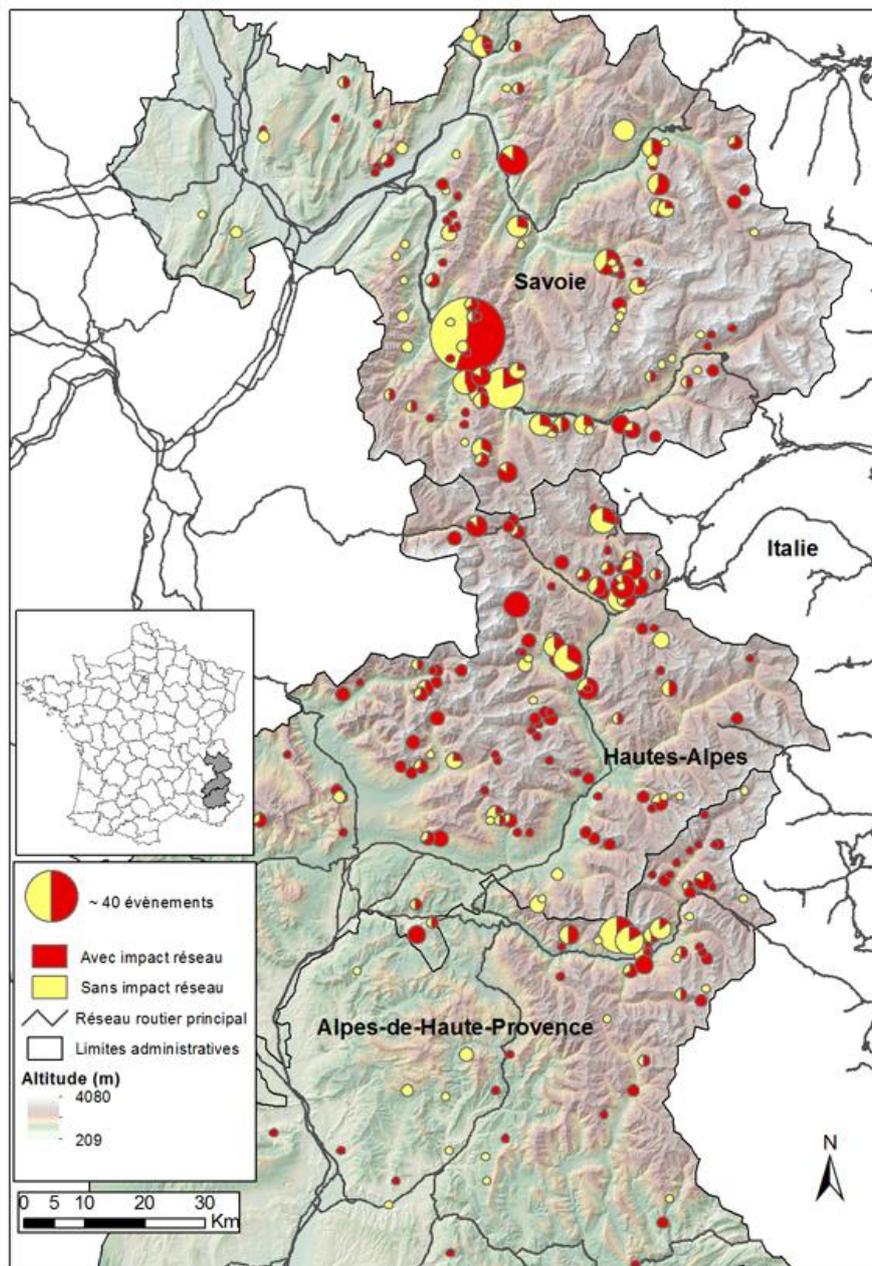


Figure 11. Localisation des bassins-versants alpins actifs de 1950 à 2012, proportion d'évènements avec et sans impacts sur le réseau routier (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence)

Cette tendance est confirmée par la répartition départementale du nombre d'évènements (Figure 12), où leur part avec impacts sur le réseau est stable pour les Alpes de Haute Provence. En revanche, la proportion d'évènements dommageables est nettement plus importante pour les Hautes-Alpes (Pavlova, 2013). On en déduit rapidement que pour ce département une lave torrentielle a plus de chance d'affecter le réseau routier, ou bien un

biais potentiel dans les bases de données. Pour la Savoie, malgré le grand nombre d'évènements répertoriés la proportion affectant les réseaux est plus réduite.

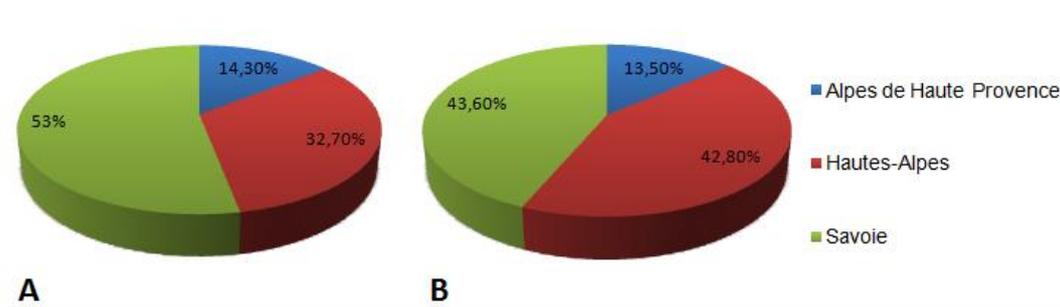


Figure 12. A. Part totale d'évènements lave torrentielle par département, B. Part des évènements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus)

En termes de répartition interannuelle des évènements totaux et dommageables au réseau, des années exceptionnelles se distinguent par la fréquence des évènements avec impacts sur le réseau, outre la répartition inégale flagrante du nombre d'évènements par département (Figure 13). C'est le cas notamment pour la Savoie en 1965, les années 1973/1987/1995 pour les trois départements en témoignent les expertises de Ballandras (1993), Lahousse et Salvador (1998) et les années 2003/2005/2008 pour les Hautes-Alpes. A noter qu'au-delà de l'année 2010, seule une partie de la base données *Évènements* des Hautes-Alpes est connue. La tendance semble également montrer une hausse progressive du nombre d'évènements torrentiels dans le temps et par extension une hausse du nombre d'impacts sur le réseau routier. En effet, à partir de 1985 l'on dépasse aisément les cinq évènements dommageables par an cumulés sur l'ensemble des départements et les 10 évènements dommageables sur deux périodes (1989-1996 et 1999-2004).

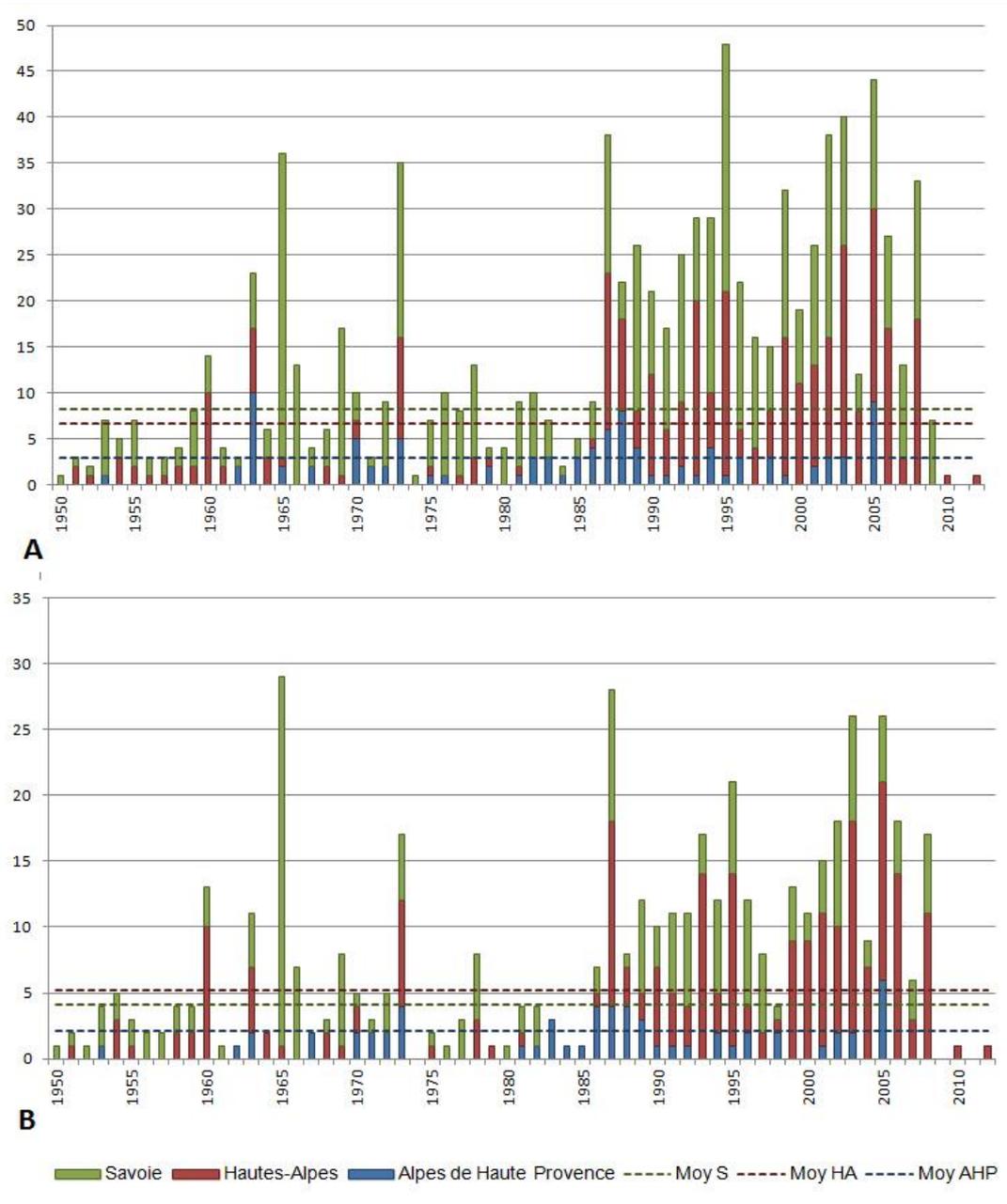


Figure 13. A. Répartition interannuelle du total des évènements lave torrentielle par département, B. Répartition interannuelle du total des évènements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus)

Enfin, la répartition mensuelle des évènements (Figure 14) confirme le caractère estival de ce type de phénomène dans les Alpes puisque pour les trois départements ce sont les mois de mai, juin, juillet et août qui recensent le plus grand nombre d'évènements lave torrentielle. Pour ceux avec impacts sur les réseaux, on retiendra surtout les mois de juin, juillet et août.

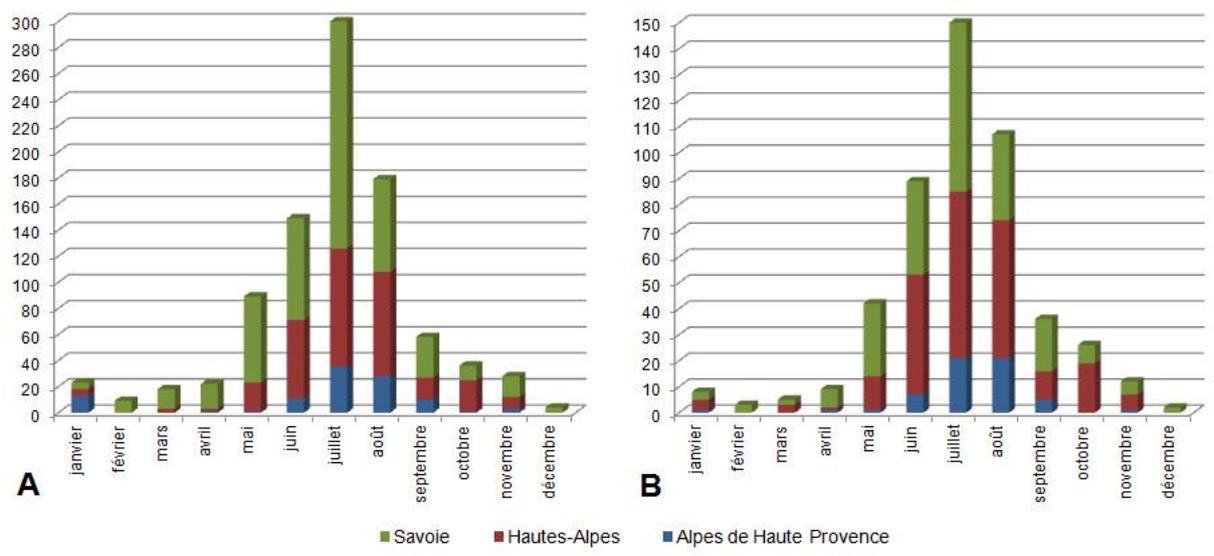


Figure 14. A. Répartition mensuelle du total des événements lave torrentielle par département, B. Répartition mensuelle du total des événements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus)

L'interprétation de ces informations brutes doit toutefois être prudente et à nuancer :

- i. Le nombre d'évènements torrentiels d'un bassin-versant n'est pas forcément représentatif du nombre d'impacts occasionnés sur le réseau routier. Puisque tous les bassins versants ne sont pas au contact direct avec une liaison routière.
- ii. Le nombre d'évènements ayant un impact sur le réseau routier n'est pas toujours représentatif de la vulnérabilité du secteur en question. En effet, bien que la fréquence soit un indicateur essentiel, ce paramètre n'est pas suffisant pour permettre une évaluation objective du risque-réseau (en atteste le chapitre 1).
- iii. Ces bases de données historiques ne sont pas toujours représentatives de l'activité actuelle et future des bassins-versants. L'aménagement récent d'ouvrages de protection ou de dérivation par exemple peut réduire drastiquement le risque encouru par le réseau. De même un changement des conditions météorologiques peut induire un changement dans la dynamique de formation des laves torrentielles (intensité-durée des précipitations, taux de recharge en matériaux mobilisables, etc.).
- iv. Malgré la richesse de ces bases de données, elles ne peuvent être exhaustives et ce quel que soit la correction des doublons (dénomination des bassins pas toujours

évidente, évènements redondants ou manquants, etc.) ou le croisement des informations entre les différentes sources, aussi fiables soient-elles. Par ailleurs, les bases de données ne renseignent pas toujours correctement le type de phénomène naturel survenu, ni les conditions détaillées des modes d'endommagement du réseau, ni les volumes de matériaux mobilisés. On note également l'absence de données horaires sur les évènements ce qui pourrait s'avérer utile pour mieux comprendre les dommages et les perturbations en fonction des flux routiers. Enfin, l'absence d'informations sur un évènement n'est pas forcément synonyme d'absence de dommages.

- v. L'augmentation du nombre d'évènements répertorié au cours des années n'est pas forcément synonyme d'augmentation de la fréquence des évènements lave torrentielle. Il peut s'agir également d'une procédure de recensement devenue systématique et standardisée au fil des années : c'est le cas depuis les années 1980. De même, l'inégalité de répartition des évènements entre les départements est certes due à la différence du nombre de bassins-versants actifs, mais elle peut aussi être le reflet d'un biais entre les bases de données. A titre d'exemple, celle des Hautes-Alpes est nettement plus fournie et mieux renseignée en dommages que les autres. Cette inégalité peut également témoigner d'une augmentation croissante de la vulnérabilité du réseau routier.
- vi. L'absence de suivi régulier de la plupart des bassins-versants torrentiels. Bien que généralement consignés, tous les évènements et surtout leur intensité ne sont pas forcément toujours enregistrés.

2.1.2. Cadre fonctionnel : le maillage routier alpin

La base de données sur les réseaux routiers utilisée dans ce travail provient de l'Institut Géographique National (IGN) pour la partie française. Il s'agit de la '*BDTOPO*' révisée en 2011 et disponible pour chaque département alpin. Son contenu, sa précision géométrique et sa qualité sémantique sont meilleurs que la '*BD route 500*' disponible auparavant. La '*BDTOPO*' fournit des informations topographiques vectorielles des éléments du territoire et de ses

infrastructures avec une précision métrique et exploitable à des échelles de 1 : 5 000 au 1 : 50 000. Classée en thèmes, la base de données correspondant au réseau de transport routier comprend l'intégralité des voies de communication existantes qu'elles soient asphaltées ou non. Chaque portion de route (ou tronçon) est hiérarchisée en réseau principal ou réseau secondaire, selon la valeur attributive IMPORTANCE définie à partir de critères administratifs, mais surtout en fonction du trafic routier (Figure 15).

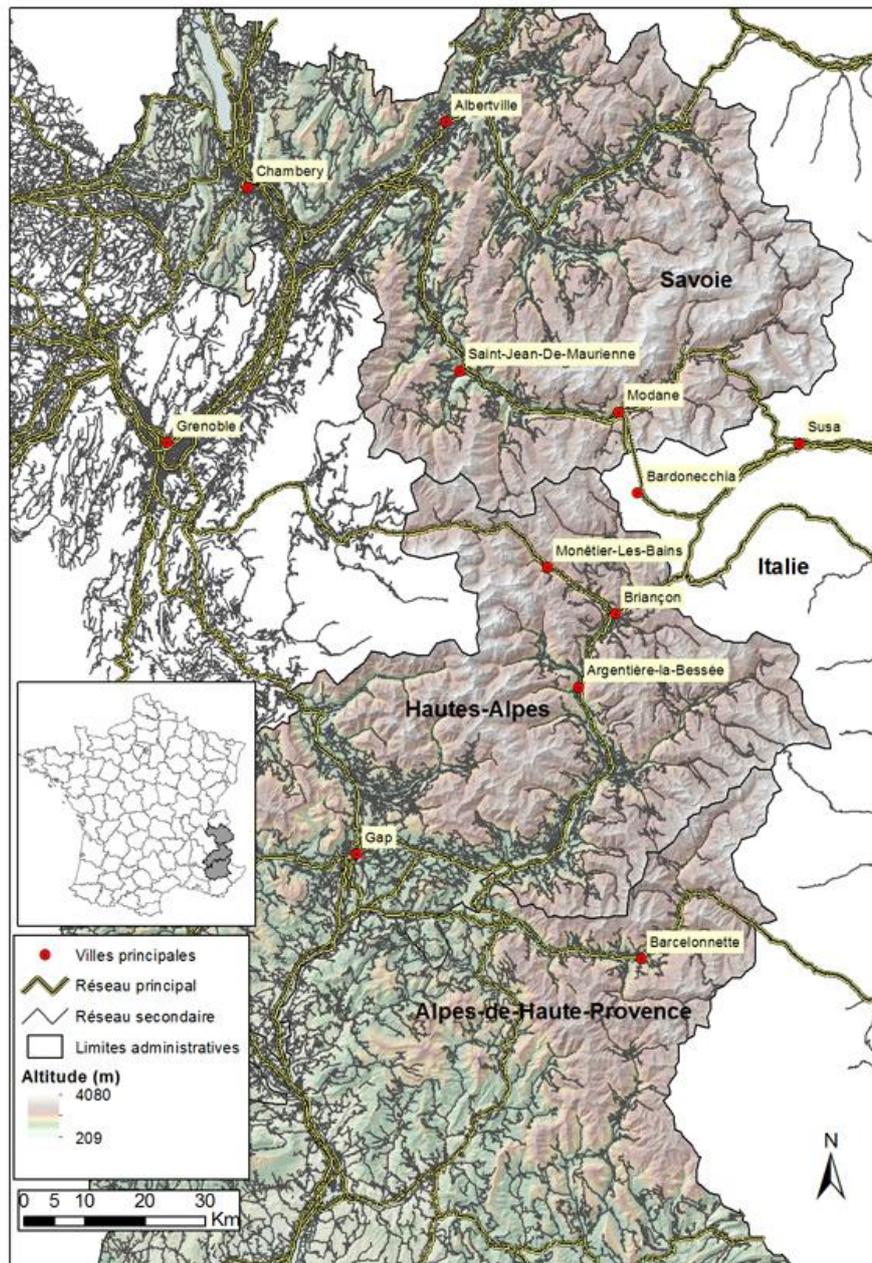


Figure 15. Cartographie du réseau routier principal et secondaire selon la 'BDTOPO' (IGN) (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence)

Ce tri préliminaire nous permet de mailler et de structurer le territoire afin d'en faciliter les analyses spatiales et attributaires. Ainsi le réseau principal comprend les valeurs "1" et "2", et le réseau secondaire comprend les valeurs "3", "4" et "5" (Tableau 4).

Tableau 4. Valeur de l'attribut IMPORTANCE, classe ROUTE de la BDTOPO (Source : Métadonnées BDTOPO 2011 - IGN)

1	Le réseau 1 assure les liaisons entre métropoles et compose l'essentiel du réseau européen. Il est composé en général d'autoroutes et quasi-autoroutes, parfois de nationales.
2	Liaisons entre départements. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 1. Les liaisons d'importance 2 ont fonction : <ul style="list-style-type: none"> - d'assurer les liaisons à fort trafic à caractère prioritaire entre agglomérations importantes, - d'assurer les liaisons des agglomérations importantes au réseau d'importance 1, - d'offrir une alternative à une autoroute si celle-ci est payante, - de proposer des itinéraires de contournement des agglomérations, - d'assurer la continuité, en agglomération, des liaisons interurbaines à fort trafic quand il n'y a pas de contournement possible.
3	Liaisons ville à ville à l'intérieur d'un département. Ce niveau est majoritairement représenté par des routes départementales, toutefois certaines départementales peuvent avoir une importance 4 ou 5. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 2. Les liaisons d'importance 3 ont fonction : <ul style="list-style-type: none"> - de relier les communes de moindre importance entre elles (les chefs-lieux de canton en particulier), - de desservir les localités et sites touristiques importants, - de desservir les points de passage des obstacles naturels quand ils sont peu nombreux (cols routiers, ponts), - de desservir les agglomérations d'où partent des liaisons maritimes, - de structurer la circulation en agglomération.
4	Voies permettant de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une commune et, dans les zones rurales, de relier le bourg aux hameaux proches. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 3. Les liaisons d'importance 4 ont fonction : <ul style="list-style-type: none"> - de structurer la circulation en agglomération, - de relier le bourg aux hameaux proches.
5	Voies permettant de desservir l'intérieur d'une commune. Valeur prise par exclusion des autres valeurs de l'attribut.
NC	Non concerné par cet attribut.
NR	Non renseigné

Cette classification permet de visualiser rapidement les artères vitales du territoire alpin, ainsi la Savoie et les Hautes-Alpes et les Alpes de Haute-Provence sont desservis par seulement quelques axes principaux :

- i. La liaison Grenoble - Monétier les Bains - Briançon, la liaison Grenoble – Gap – Argentière la Bessée – Briançon
- ii. La liaison Grenoble/Chambéry - Saint-Jean de Maurienne – Modane
- iii. La liaison Modane – Bardonnechia – Briançon

- iv. La liaison Grenoble – Gap – Barcelonnette
- v. La liaison Briançon – Argentière la Bessée – Gap – Barcelonnette.

Le réseau secondaire est d'autant plus sporadique et la densité de ses ramifications dépend clairement de la topographie : le réseau routier est présent majoritairement en zone de plaine ou de fond de vallée. Les hautes et petites vallées alpines sont très peu connexes et mal desservies, c'est particulièrement le cas sur la liaison Grenoble – Monétier les Bains - Briançon.

La seconde information relative au réseau est la valeur attributaire nommée CLASSE ADMINISTRATIVE qui permet de préciser le statut de chaque tronçon et son numéro d'identifiant national (Tableau 5).

Tableau 5. Valeur de l'attribut CLASSE ADMINISTRATIVE, classe ROUTE de la BDTOPO (Source : Métadonnées BDTOPO 2011 - IGN)

Autoroute	Les autoroutes sont des routes sans croisement, accessibles seulement en des points aménagés à cet effet et réservées aux véhicules à propulsion mécanique (Article L122-1 du code de la voirie routière).
Nationale	Route nationale (voies du domaine public routier national autres que les autoroutes précédemment définies).
Départementale	Voie qui fait partie du domaine public routier départemental.
Autre	Toute autre voie non classée dans les catégories administratives précédentes.

Ces renseignements permettent d'en déduire avec la valeur attributaire GESTION, le gestionnaire de réseau pour chaque portion de route : pour les routes départementales publiques, les routes nationales & les autoroutes non concédées il s'agit du gestionnaire départemental, soit le Conseil Général du département concerné. Pour les nationales et les autoroutes concédées, le gestionnaire est la société concessionnaire (SANEF, COFIROUTE, etc.).

En croisant ces informations routières avec les bassins-versants alpins connus pour impacter le réseau routier, nous pouvons déduire quel sont les réseaux les plus affectés (Figure 16).

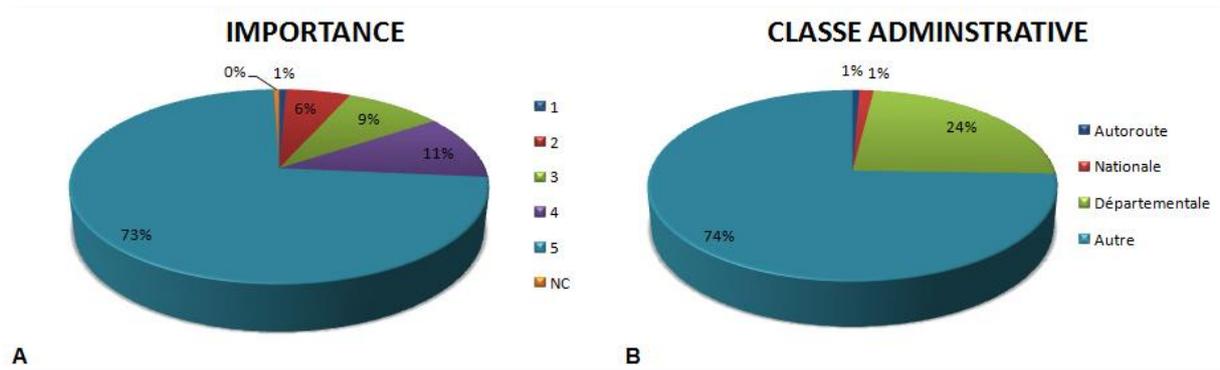


Figure 16. A. Parts du réseau routier impacté par les bassins-versants torrentiels tous départements confondus selon le critère IMPORTANCE de la BDTOPO (IGN), B. Parts du réseau routier impacté par les bassins-versants torrentiels tous départements confondus selon le critère CLASSE ADMINISTRATIVE de la BDTOPO (IGN)

Selon la valeur attributaire IMPORTANCE de la BDTOPO de l'IGN (Figure 16, A), les bassins-versants torrentiels alpins affectent en grande majorité la classe 5, puis dans l'ordre décroissant les classes : 4, 3, 2 et 1. Il serait tentant d'en déduire que les torrents impactent majoritairement les routes de faible importance, plus rarement les départementales et les nationales, et exceptionnellement les autoroutes. Vrais dans une certaine mesure, ces résultats sont à pondérer avec le poids du nombre de tronçons pour chaque classe (Tableau 6). En effet, il y a bien plus d'axes de type 5 sur le territoire que d'autoroutes par exemple. A souligner que ce calcul prend en compte l'interaction vectorielle entre la surface des bassins-versants et la présence d'un réseau routier sur celle-ci. Aussi, la présence d'un réseau routier sur un cône de déjection n'est pas forcément synonyme d'endommagement potentiel dudit réseau.

Concernant la valeur attributaire CLASSE ADMINISTRATIVE de la BDTOPO de l'IGN (Figure 16, B), la classe la plus affectée n'est pas renseignée de moindre importance. En revanche, parmi les routes nommées la plus large part des impacts revient au réseau routier départemental et dans une très faible proportion au réseau national et autoroutier. Ces résultats sont également à nuancer selon les propos cités précédemment.

Tableau 6. Kilométrage routier par classe administrative et par département en kilomètres (INSEE)

Classe administrative	Savoie	Hautes-Alpes	Alpes de Haute-Provence
Autoroute	163	26	66
Nationale	72	153	99
Départementale	3 146	1 961	2 567

Pour l'Italie, aucune base de données officielle n'a pu être accessible. Nous avons donc complété le réseau routier frontalier français avec le support collaboratif et *OpenSource* : 'OPENSTREETMAP' (OSM), la base de données est moins riche mais relativement précise. En vue d'harmoniser l'ensemble de la base de données réseau alpine, nous avons opéré la même hiérarchisation des tronçons que celle de la 'BDTOPO'.

2.1.3. Cadre démographique

A partir des bases de données 'POPULATION' fournies par l'Institut National des Statistiques et des Études Économiques français (INSEE), nous avons pu établir une carte de répartition des densités de population sur les trois départements alpins ciblés (Figure 17). Deux bases de données carroyées ont été utilisées pour notre étude, il s'agit d'un découpage de l'espace géographique en mailles régulières carrées qui représentent respectivement le nombre d'habitants sur 1km² et le nombre d'habitants sur 200m². Plus fines que les données de population de la *BDTOPO* (à l'échelle communale), les mailles permettent d'observer la répartition des individus résidents sur le territoire indépendamment des informations sur le bâti, bien que les deux données soient évidemment corrélées.

Sans surprise, la population résidente se concentre essentiellement dans les corridors montagneux, en fond de vallée au pied des torrents et le long des axes routiers. On observe également quelques pôles urbains tels que Gap (40 761 habitants en 2012) et Briançon (12 301 habitants en 2012) pour les Hautes-Alpes ; Chambéry (58 039 habitants en 2012) pour la Savoie et Barcelonnette (2 634 habitants en 2012) pour les Alpes de Haute-Provence. En revanche, les populations localisées dans les hautes vallées sont nettement plus dispersées et moins nombreuses. Dans l'ensemble, la densité de population est relativement faible

puisque en 2012, elle est de 25 habitants/km² pour les Hautes-Alpes et de 23 habitants/km² pour les Alpes de Haute-Provence. La Savoie reste nettement plus peuplée avec 113 habitants/km², soit légèrement supérieure à la densité de population moyenne française (112 habitants/km²), néanmoins les individus se concentrent davantage à l'ouest du département, dans les espaces plus ouverts.

Au total, on dénombre 1 177 606 habitants (2012) pour le département de la Savoie, 138 605 habitants (2011) pour le département des Hautes-Alpes et 161 241 habitants (2012) pour les Alpes de Haute-Provence.

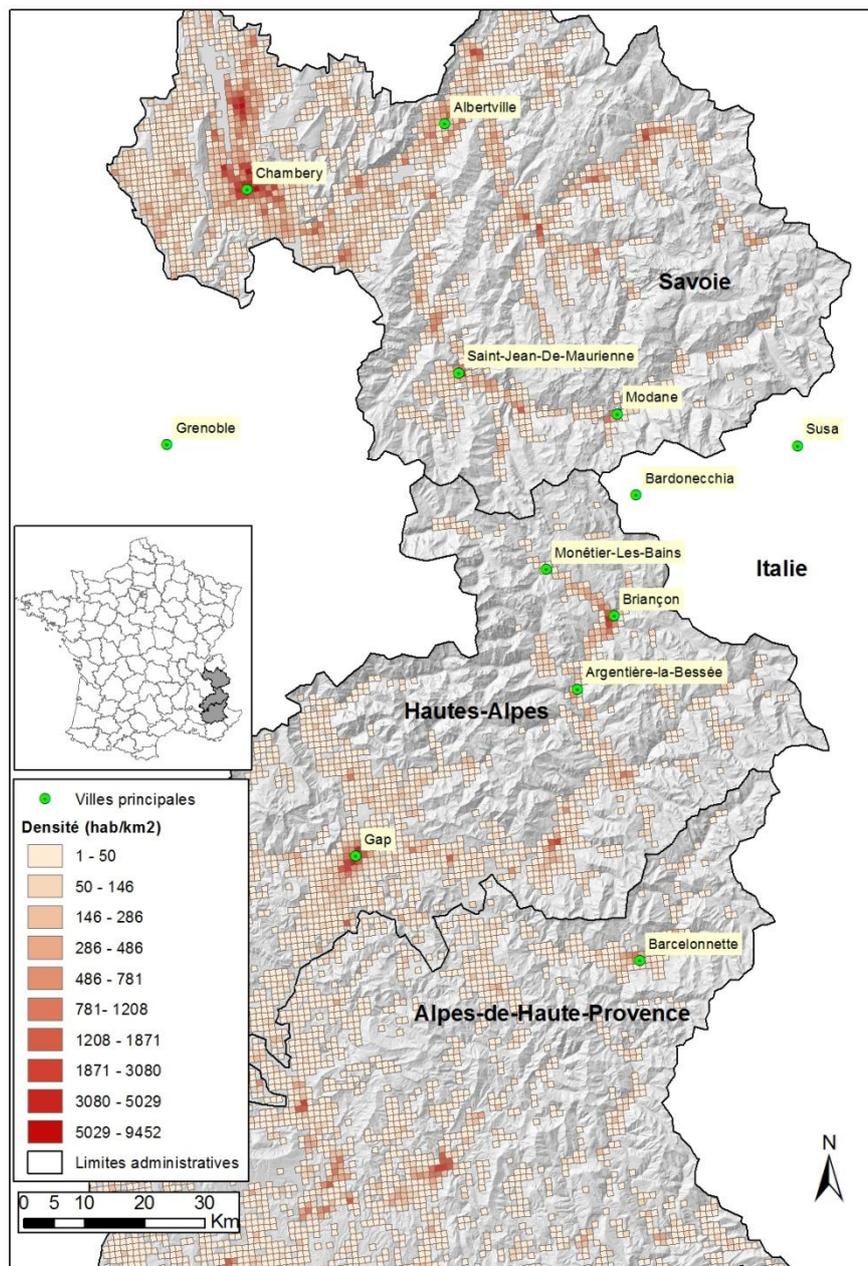


Figure 17. Répartition des densités de population résidente pour les départements de la Savoie, des Hautes et des Alpes de Haute-Provence (source : données carroyées 1km – INSEE)

2.1.4. Cadre culturel et économique

Dans l'ensemble du massif alpin, le tourisme s'est imposé comme un secteur économique de premier plan, de par la richesse de son patrimoine naturel et historique ; avec une saisonnalité des activités très marquée (Convention Interrégionale pour le Massif des Alpes, 2006). A titre d'exemple, la Savoie concentre la majeure partie des stations de ski en France. La fréquentation touristique calculée à partir des offres d'hébergement est donc très importante pour nos trois départements, au point de dépasser largement la population résidente (Tableau 7).

Tableau 7. Fréquentation touristique année 2011 par département en nombre de nuitées (INSEE)

Logement touristique	Savoie	Hautes-Alpes	Alpes de Haute-Provence
Activité hôtelière	3 326 922	885 502	642 088
Camping	650 336	1 236 153	1 817 149

Grâce au développement touristique des 30 dernières années, ces régions ont pu maintenir une population, des services et un niveau d'activité économique qui structurent le territoire (Convention Interrégionale pour le Massif des Alpes, 2006). Cependant ces conditions reposent en majeure partie sur la viabilité des réseaux de transports, avec un intérêt particulier pour les itinéraires routiers interdépartementaux à visée touristique (Convention Interrégionale pour le Massif des Alpes, 2006).

En parallèle, l'ouverture accrue des économies et l'intégration européenne ont conduit à l'expansion massive des flux routiers de proximité et surtout du trafic transfrontalier de longue distance (Rapport Reynaud, 2000). A titre d'exemple, le trafic transfrontalier avec l'Italie au col de Fréjus (Savoie) a augmenté de 83% entre 1983 et 1993 et de 22% au Mont-Cenis (Rapport Reynaud, 2000).

2.2. L'apport des travaux du projet SCAMPEI

En préambule, ce travail de thèse s'est appuyé sur les résultats du programme de recherche SCAMPEI (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes, 2009/2011, <http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>), plus particulièrement sur la tâche n°6 dont l'objectif était d'estimer les conséquences de l'aléa lave torrentielle sur les interruptions du trafic routier et ferré dans les Alpes françaises (Deymier, 2010 ; Utasse, 2010 ; Léone et Deymier, 2011). Le rapport du projet propose une analyse du réseau routier alpin à l'échelle régionale, à partir du recensement des événements de 1950 à 2009. La méthode est basée sur la construction d'échelles de gravité des dommages physiques et fonctionnels du réseau routier et sur des scénarii hypothétiques de pertes d'accessibilité territoriale.

Au titre de travail préliminaire à cette thèse, ce projet de recherche (compte-rendu de fin de projet, 2011) a permis de préciser le contexte d'étude en fournissant une lecture cartographique rapide des modes d'endommagement du réseau et la localisation des tronçons vulnérables. Il convient donc d'en expliquer les principaux apports.

2.2.1. Modalités d'endommagement physique des tronçons routiers

Inspirée de l'échelle d'intensité des dommages physiques établis par Léone en 1996 pour les mouvements de terrain, Léone et Deymier (2011) ont mis en place une typologie des dommages physique '*DPmax*' basée sur la description des impacts de la BD *Évènement* pour chaque tronçon routier concerné (Tableau 8).

Tableau 8. Typologie des dommages physiques (DP) du réseau routier (Léone et Deymier, 2011, adapté de Léone, 1996)

DPmax	Mode d'endommagement physique de la route
SD	Sans dommage décrit (mais perturbation fonctionnelle)
D	Dommage mais sans précisions
DP	Endommagement Pont (> fermeture route par précaution)
D1	Dégradation de la chaussée
D2	Affaissement de la plate-forme
D3	Obstruction de la chaussée
D4	Destruction de la plate-forme sans rupture de pont
D5	Destruction de la plate-forme par rupture de pont

Cette dernière met en évidence 6 niveaux de dommages graduels (DP à D5) et 2 niveaux sans distinction (SD et D). Ce constat est expliqué par le manque de précisions sur la nature des dommages renseignée dans la base de données *Évènements*. Les types de dommages cités sont : une dégradation ou une obstruction de la chaussée, un affaissement ou une destruction partielle à totale de la plate-forme (sous-entendu un ouvrage de franchissement). Cette méthode permet un traitement statistique rapide des chroniques des dommages avec différenciation de leur gravité (Deymier, 2010). Puis sous la forme de carte, elle permet de différencier les tronçons routiers les plus exposés, et d'identifier le type d'endommagement le plus fréquent (Figure 18).

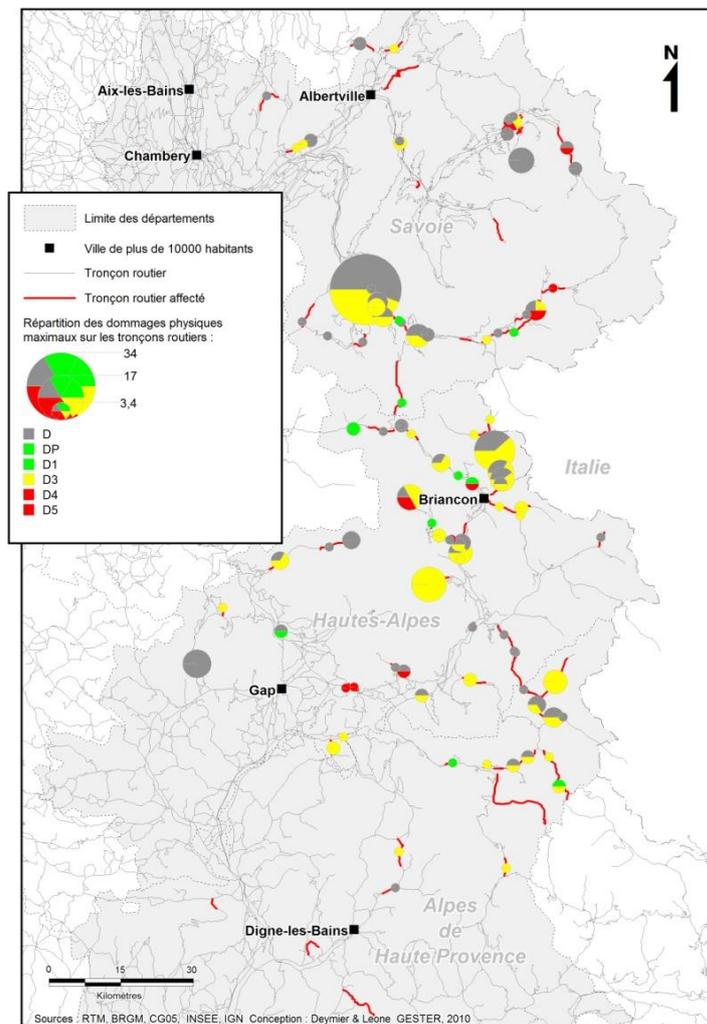


Figure 18. Nombre d'impacts physiques par tronçon routier de 1950 à 2009 (Léone et Deymier, 2011)

Ainsi, la vallée de la Haute-Tarentaise et de la Maurienne (Savoie), le pays du Briançonnais (Hautes-Alpes) et la vallée de l'Ubaye (Alpes de Haute-Provence) sont les zones ayant subi le plus d'impacts. Les routes les plus exposées aux laves torrentielles sont la départementale D1006 avec 34 événements dommageables (Vallée de la Maurienne, Savoie), la départementale D994 avec près de 58 événements dommageables (Briançonnais, Hautes-Alpes). Au total l'étude recense près de 94 tronçons routiers avec un impact physique clairement identifié. Mais le type de dommage dominant est l'obstruction de la chaussée puisque qu'il concerne 43% des événements dommageables recensés entre 1950 et 2009 pour les trois départements alpins confondus (Deymier, 2010). Selon les conclusions de l'étude ce constat peut s'expliquer par le fait que les débordements de matériaux surviennent en général

au niveau des ouvrages de franchissement des torrents (tel que les gués et les ponts), probablement parce qu'ils sont sous-dimensionnés vis-à-vis des volumes en transit. Les fourchettes de volumes de matériaux déposés dont la valeur est connue proposent jusqu'à 10 000m³ de débris sur la route par évènement (Tableau 9) pour des épaisseurs pouvant atteindre 5m et des longueurs de chaussée obstruées jusqu'à 400m linéaires.

Tableau 9. Volumes, épaisseurs et longueur des dépôts lave torrentielle estimés sur la chaussée routière sur 68 évènements renseignés de 1950 à 2009 pour les départements 73, 05 et 04 (Léone et Deymier, 2011)

	Volume (m ³)	Épaisseur (m)	Longueur (m)
Minimum	20	0.20	10
Maximum	10 000	5	400
Moyen	1 026	0.80	102

L'étude propose également de calculer le coût moyen global pour chaque niveau de dommage physique (Annexe 1) et selon leur fréquence historique par département. Au total, elle estime les dommages routiers à au moins 11,3 millions d'euros sur 59 ans.

2.2.2. Estimation des perturbations fonctionnelles des tronçons vulnérables

L'étude considère ici les perturbations fonctionnelles comme une forme d'endommagement indirect ou induit. Inspirée également des travaux de Léone (1996) sur les mouvements de terrain, la méthode consiste à établir une typologie des perturbations fonctionnelles maximales '*PFmax*' à partir des tronçons endommagés déjà renseigné par la méthode précédente (Tableau 10). Cette échelle d'intensité comporte 4 classes de dysfonctionnement (P1 à P4) dont la gravité est fonction de la limitation du gabarit en circulation et la durée de l'interruption du trafic (heures, jours, semaines ou davantage) et deux classes sans précisions (SP et P).

Tableau 10. Typologie des perturbations fonctionnelles (PF) du réseau routier (Léone et Deymier, 2011, adapté de Léone, 1996)

PFmax	Perturbation fonctionnelle liée à l'endommagement de la route
SP	Sans perturbation décrite (mais dommage physique)
P	Perturbation mais sans précisions
P1	Limitation de gabarit nécessaire
PP	Interruption sans indication de durée
P2	Interruption momentanée du trafic routier (heures)
P3	Interruption prolongée du trafic routier (jours)
P4	Interruption durable à définitive du trafic routier (en semaines ou mois)

Selon les résultats de l'étude, au moins 30% des évènements ayant touché le réseau routier alpin ont entraîné une interruption du trafic routier supérieure à quelques heures voir quelques jours. Mais près de 48% des évènements dommageables ne comportent pas d'informations sur le type de perturbation, ces informations ont été mises en carte pour plus de lisibilité (Figure 19).

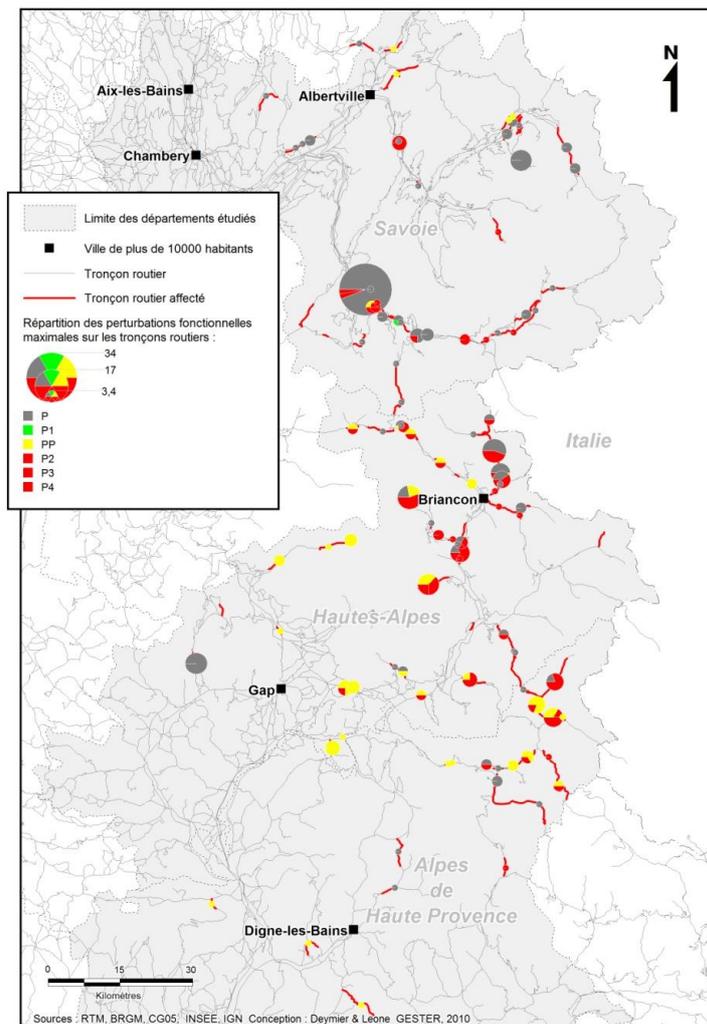


Figure 19. Nombre d'impacts fonctionnels par tronçon routier (Léone et Deymier, 2011)

Ainsi on constate que la plupart des évènements lave torrentielle de 1950 à 2009 ayant affecté le réseau routier ont eu pour conséquence une interruption du trafic. Les secteurs touchés restent les mêmes que pour les dommages physiques. Cependant, aucune tendance n'a pu être établie dans la relation dommage physique et perturbation fonctionnelle, pour cette raison les dommages physiques de même importance peuvent correspondre à des durées d'interruption très variables. Selon les résultats de l'étude la durée d'interruption du trafic est également conditionnée par le nombre de points de coupure par tronçon routier et pas uniquement par l'intensité des dommages en un point donné. La durée de la coupure du réseau dépendrait du volume déposé sur la chaussée et des capacités de déblaiement.

Enfin, l'étude propose de calculer un indice expérimental pour évaluer le risque de perturbation fonctionnelle du réseau 'IRd' ou risque de dysfonctionnement par tronçon (Figure 20). Ce calcul repose sur la combinaison de :

- i. La fréquence des impacts historiques (1950-2009).
- ii. La longueur de déviation possible (la plus courte distance) pour chaque tronçon.
- iii. Un indice de destruction des liens du réseau.
- iv. Éventuellement la valeur d'usage du réseau routier (ici liaison locale, régionale, principale, autoroutier).

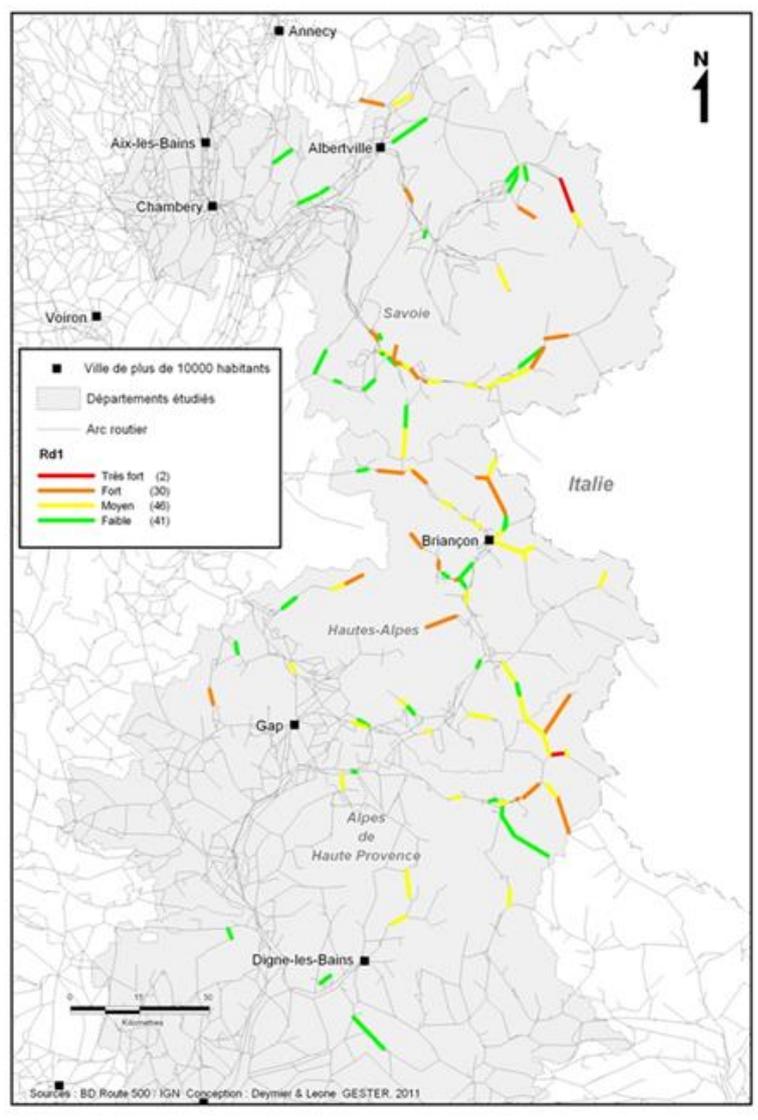


Figure 20. Exemple d'indice de dysfonctionnement par tronçon (Léone et Deymier, 2011)

Le niveau de risque est classé en 4 classes d'intensité, en théorie les tronçons les plus à risque correspondent aux tronçons avec la plus forte probabilité d'entraîner un préjudice fonctionnel.

Les résultats de la tâche n°6 du projet SCAMPEI nous permettent d'identifier les tronçons routiers les plus vulnérables et d'opérer une présélection des zones d'études vis-à-vis de l'aléa lave torrentielle. Ces cartes nous fournissent un support d'information pour orienter le choix des bassins-versants ainsi que la démarche à suivre vis-à-vis des modes d'endommagement du réseau.

3. Présentation des sites d'étude

D'emblée au cours de ce travail, il ne semblait pas judicieux de reproduire une analyse de risque à l'échelle régionale puisque déjà abordé dans la bibliographie. Par ailleurs, la bibliographie scientifique disponible semble riche d'approches analytiques et/ou orientées sur un ou deux aspects du risque-réseau. Mais grâce à ce support d'informations, il était intéressant de s'orienter vers une approche plus locale et centrée sur quelques bassins-versants représentatifs du risque-réseau. Aussi, une approche dite systémique a permis d'apprécier l'ensemble des étapes du risque : depuis les caractéristiques de l'écoulement torrentiel conduisant à l'endommagement physique sur le réseau routier jusqu'à ses conséquences fonctionnelles et territoriales ; sans oublier en parallèle, les modalités de gestion de l'évènement dommageable par les différents acteurs impliqués. Nous avons donc cherché à combiner l'ensemble des éléments constitutifs du risque-réseau en articulant chaque étape au sein d'une progression cohérente. Pour ces raisons, il était indispensable de choisir des sites d'études qui puissent être conformes à cette méthode de travail.

3.1. Le choix des sites

Pour répondre à ce type de démarche, le choix des sites d'étude devait correspondre à plusieurs critères en fonction de conditions géomorphologiques, territoriales et de la structure du réseau affecté. Les recherches ont été effectuées à partir de l'analyse de la base de données '*Évènements*' citée précédemment, d'informations géographiques spatialisées, de la bibliographie scientifique existante, de connaissances personnelles et de recherche internet générales. A noter que ce choix était aussi guidé par le tableau de la vision holistique des problématiques concernant l'analyse des infrastructures de transport routier évoqué en chapitre 1. En résumé, ce choix est fonction : des caractéristiques des bassins-versants, des types de dommages répertoriés, de la valeur stratégique du réseau impacté au sein du maillage routier général, de la présence de données pluviométriques fiables à proximité, du mode de gestion administratif et du contexte socio-économique du territoire impacté (Tableau 11).

Cette étape doit bien sûr être comprise comme un travail préliminaire et ne constitue en aucun cas l'ensemble des données acquises sur les sites d'études au cours de ce travail de recherche. Il s'agit d'informations générales encore incomplètes à ce stade, visant à dégager seulement quelques bassins-versants parmi les 220 affectant le réseau routier, mais aussi à définir un fil directeur pour les analyses du risque-réseau qui suivront.

Tableau 11. Critères retenus pour le choix des sites d'étude

Critère	Objet étudié	Élément recherché
Analyse de la base de données 'Évènements'	Échelle spatiale	Identification / localisation des bassins-versants Identification / localisation des tronçons exposés
	Échelle temporelle	Fréquence des évènements Évènements récents Période d'exposition critique des tronçons
	Dommages	Dommages physiques décrits Perturbations fonctionnelles bien renseignées et importantes
Conditions géomorphologiques	Topographie	Bassin-versant de petite surface Zones d'ablation, de propagation et d'accumulation visibles et caractéristiques
	Géologie	Lithologie et rhéologie facilement identifiables
Conditions météorologiques	Données pluviométriques	Présence d'une station météorologique à proximité du bassin-versant Précision au pas de temps journalier et si possible horaire
Dispositifs de prévention et/ou protection	Prévention	Absence de système d'alerte et/ou de surveillance permanente
	Protection	Peu ou absence d'ouvrage de correction torrentielle
Valeur stratégique des éléments exposés (réseau routier)	Importance	Vocation administrative du tronçon exposé, type d'usage principal, villes reliées etc. Poids du tronçon impacté dans le maillage routier global (niveau de fréquentation de l'axe)
	Comportement non linéaire	Interdépendance des axes du réseau Faible connexité/connectivité du réseau exposé Peu de possibilités de contournement si coupure de réseau, mais sans situation d'enclavement
Gestion du réseau (généralités)	Gouvernance	Identification des acteurs en charge du réseau routier
	Organisationnelle	Gestion opérationnelle globale du réseau
Valeur territoriale (généralités)	Aspects socio-économiques	Nécessité de viabilité du réseau / dépendance des usagers de la route et/ou des activités, perturbation préjudiciable Information sur les coûts des dommages

a) L'analyse de la base de données 'Évènements'

Nous avons identifié les bassins-versants dont les impacts historiques sur le réseau routier étaient connus et bien recensés dans la base de données 'Évènement'. Ensuite, nous avons privilégié des bassins-versants ayant des impacts récents (moins de 10ans) avec un faible pas de temps entre chaque évènement. L'idée supposait que des impacts récents étaient encore présents dans la mémoire collective et qu'une occurrence élevée sous-entendait des évènements dommageables susceptibles de se produire prochainement. Ainsi, les bassins-versants sélectionnés n'étaient pas forcément ceux ayant le plus grand nombre d'évènements torrentiels répertoriés, mais ceux conduisant à des impacts-réseau notables cette dernière décennie. Pour ce faire, connaître précisément la date de chaque évènement était une condition sine qua non. Faute d'informations dans la base données, nous n'avons pas pu utiliser de critère d'intensité du phénomène lave torrentielle mis à part quelques bribes de chiffres concernant les volumes des dépôts.

Outre la question de la fréquence, le critère essentiel était bien évidemment la description des dommages sur le réseau routier. Il était impératif que la description des dommages directs et indirects soit la plus précise possible, dans l'idéal pour l'ensemble des évènements d'un bassin-versant. Condition non réaliste au vu des informations fournies par la base de données, nous avons retenus les éléments les plus marquants. De la même façon, le nom de l'axe routier affecté devait être clairement identifié ainsi que la période de criticité du tronçon impacté.

b) Les conditions géomorphologiques

Pour cette étape, il était nécessaire de travailler sur des bassins-versants dont les écoulements torrentiels pouvaient être adaptés à la modélisation numérique (cf chapitre 4). Pour cela, nous avons retenu des bassins-versants de petite surface avec une topographie simple : des zones de contribution/de transport/de dépôt facilement identifiables, une géologie rapidement interprétable afin de faciliter la compréhension des comportements rhéologiques des évènements torrentiels.

c) Les conditions météorologiques

En zone montagneuse et en été, les seuils pluviométriques varient énormément d'un lieu à un autre, les données d'une station météorologique trop éloignée ne seraient donc pas représentatives des précipitations réellement tombées sur le bassin-versant. Pour être valables, les données pluviométriques doivent donc être collectées sur une station météorologique située à proximité du bassin-versant (dans l'idéal moins de 10km) et si possible dans la même vallée. La fenêtre des enregistrements météorologiques doivent correspondre à une échelle de temps pertinente vis-à-vis des événements torrentiels (cf chapitre 3).

d) Les dispositifs de prévention et/ou protection

Vraisemblablement il n'existe pas de suivi spécifique pour la plupart des bassins-versants mis à part des cas célèbres. Néanmoins, nous avons choisi des bassins-versants non instrumentés et ayant peu d'ouvrages de correction torrentielle pour maximiser les chances qu'un événement puisse atteindre le réseau routier et être dommageable (cf chapitre 4 et 5).

e) La valeur stratégique des éléments exposés (le réseau routier)

Bien évidemment, nous devons sélectionner un bassin-versant en fonction des caractéristiques du réseau routier affecté, plus seulement le tronçon impacté mais la liaison routière qui s'y rapporte. Afin d'évaluer qualitativement le poids d'un axe au sien du maillage routier global, la vocation administrative (fournie par la 'BDTOPO') a notamment permis d'estimer leur importance territoriale et leur usage principal. Information appuyée quantitativement par celle des comptages routiers si disponible.

Afin de déterminer le niveau d'interdépendance des réseaux, nous avons répertorié les villes reliées par ces axes, les principales villes traversées et les possibilités de contournement en cas de rupture du réseau. Nous avons toutefois exclu les petites vallées pour ne pas créer de situation d'enclavement en cas d'impact, l'intérêt étant de modéliser le maillage routier en cas de coupure du réseau principal et non l'isolement d'un territoire. Ce cas de figure rendrait alors toute analyse d'accessibilité future caduque (cf chapitre 6).

f) La gestion du réseau (généralités)

A ce stade, l'intérêt était de pouvoir déjà identifier les principaux acteurs en charge du réseau routier afin de pouvoir les contacter ultérieurement (*cf* chapitres 5 et 6).

g) La valeur territoriale

Pour savoir si la perturbation du réseau pouvait présenter un handicap pour le bon fonctionnement du territoire, nous avons préalablement identifié les principaux pôles économiques et touristiques situés à proximité des zones impactées. Il était donc préférable de s'orienter sur des bassins-versants situés sur des axes de transit importants et dont la qualité du service de transport est vitale pour ces régions (*cf* chapitre 7 et 8).

A la suite de ce travail de synthèse, nous avons dégagé pour notre étude une quinzaine de bassins-versants répartis principalement entre les départements de la Savoie et des Hautes-Alpes. S'ensuit alors un repérage sur le terrain pour confirmer ou informer nos choix. Cette mission de terrain a permis de mettre en exergue les écarts entre les informations fournies par les bases de données et la réalité. Des limites réelles pratiques nous ont conduits à écarter certains bassins-versants, comme de récents travaux de génie civil (ouvrages massifs sur le torrent ou sur le réseau) ou une modification des couloirs torrentiels par exemple. A cette issue, nous avons retenu trois bassins-versants jugés représentatifs du risque-réseau.

3.2. Description morphologique et analyse des évènements torrentiels

Chaque bassin-versant dispose de ses propres spécificités en termes de morphologie, d'activité torrentielle et d'endommagement du réseau routier. Il convient donc d'en faire une description synthétique. A noter cependant que le bassin-versant du Rif Blanc est traité comme site principal du fait de la richesse des informations dont nous disposons pour l'analyse du risque-réseau. C'est particulièrement le cas pour un évènement torrentiel dommageable récent survenu en juin 2012, au cours de ce travail de thèse.

3.2.1. Le site d'étude principal : le bassin-versant du Rif Blanc

Le Rif Blanc est localisé sur la commune de Monêtier les Bains au nord du département des Hautes-Alpes. Il s'agit du torrent situé le plus en amont sur le versant adret de la vallée de la Guisane et en rive gauche de la rivière éponyme. Cette haute vallée du *Grand Briançonnais* enregistre une trentaine de bassins-versants torrentiels actifs depuis le col du Lautaret au nord jusqu'à la ville de Briançon au sud (Lahousse et Salvador, 1998 ; Lahousse et Salvador, 2002).

Le Rif Blanc est un petit bassin-versant de haute-altitude observant une forte déclivité
Tableau 12. Ce constat est confirmé par un fort indice de compacité de Gravelius ($K_g = 1.7$).

Tableau 12. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant du Rif Blanc

Superficie du bassin de réception (km ²)	Superficie du cône de déjection (m ²)	Altitudes (max / min)	Longueur (m)	Pente du bassin-versant	Pente du cône de déjection
0.3 km ²	0.2	2 848 / 1 835	2 200	21° (45%)	-

Selon Thénard (2009), les principaux apports sédimentaires à l'origine des événements torrentiels se composent de dépôts morainiques de part et d'autres des versants du chenal principal et de formations polygéniques issues de l'affouillement d'un ancien mouvement de terrain. Ce dernier encore visible est situé en rive gauche du torrent, marquant l'interfluve avec le torrent des Valois adjacent. La charge sédimentaire provient également dans une moindre mesure de tabliers d'éboulis actifs situés à la tête du bassin-versant, ils sont composés de calschistes et de schistes noirs. Thénard ajoute que la fourniture sédimentaire mobilisable se concentre essentiellement dans les sections médianes et inférieures du bassin de réception où se développe le réseau hydrographique. Sur le cône de déjection, la zone d'emprise est importante et couvre près de 50% de sa surface. Sans incision marquée, le torrent présente un profil '*divaguant*' sur la zone d'accumulation (Figure 21).

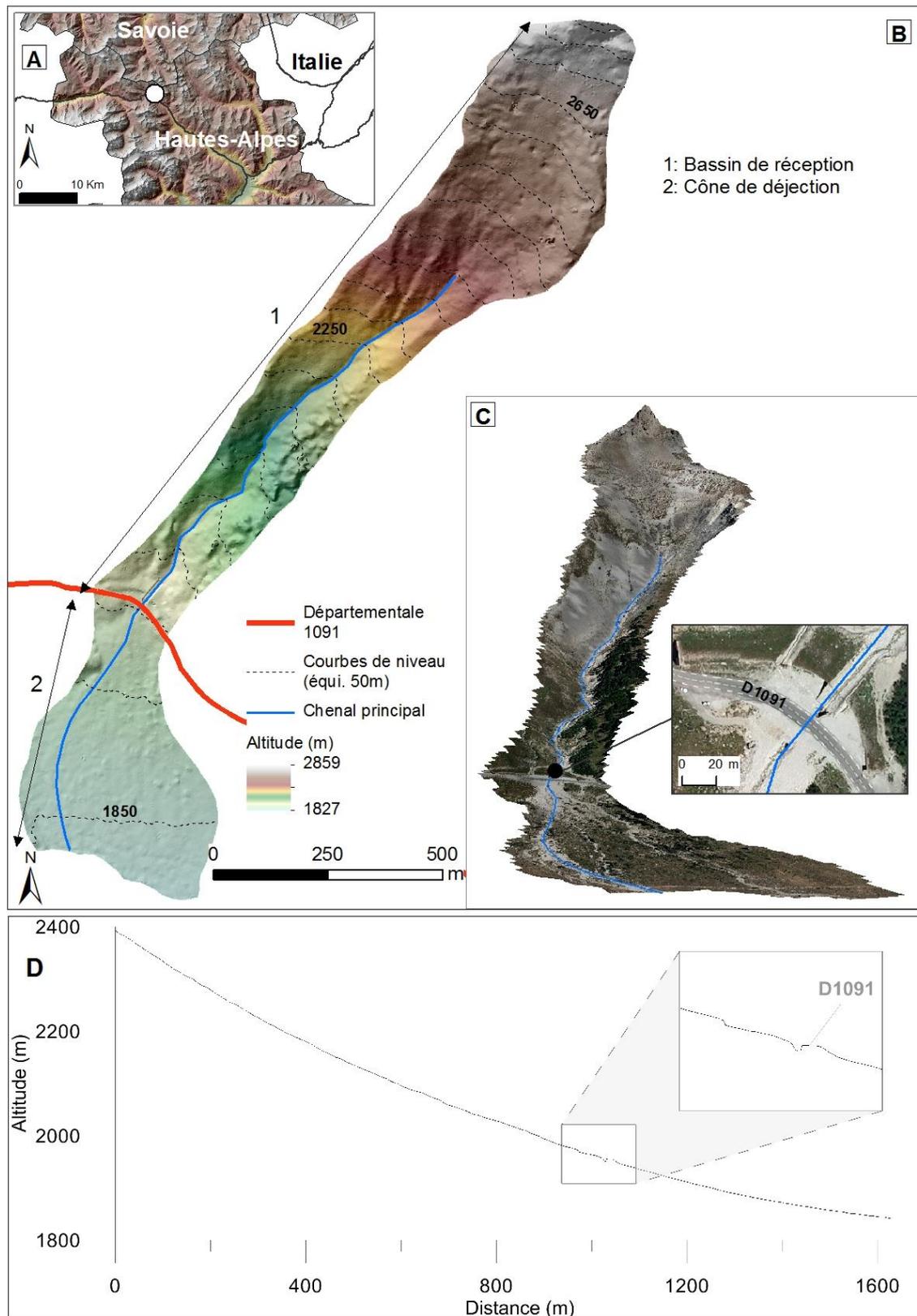


Figure 21. A. Localisation du bassin-versant du Rif Blanc, B. Topographie du bassin-versant du Rif Blanc (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant du Rif Blanc et interaction torrent/réseau routier (D1091), D. Profil en long du chenal principal du Rif Blanc et interaction torrent/réseau routier (D1091)

En termes de dynamique torrentielle, Thénard (2009) suppose que le lit du Rif Blanc présente les signes d'une instabilité chronique mais avec un état de charge disponible limité. C'est-à-dire qu'il y a peu ou pas d'organisation des dépôts, un aspect chaotique du lit torrentiel et une granulométrie hétérométrique avec la présence de quelques gros blocs.

Très réactif aux forçages climatiques, les événements se traduisent plutôt sous la forme de '*purge sédimentaire*' régulières (crues et avalanches). Sur la zone de transport, le chenal principal est peu contraint car il a peu fait l'objet de correction torrentielle mis à part un léger reboisement (moins de 2% de la surface du bassin-versant). Il est important de noter que le cours d'eau de ce torrent est en fonctionnement permanent hors périodes de lave torrentielle.

Au niveau de l'apex, le torrent du Rif Blanc traverse la route départementale D1091 ou D1091 (Figure 21). Cet axe dessert l'ensemble de la vallée de la Guisane et permet de rejoindre les villes de Grenoble et de Briançon en passant par le col du Lautaret. Cet espace est marqué par la présence d'un tunnel routier parallèle à la chaussée principale et situé sous le chenal torrentiel (Figure 22). La galerie d'une longueur d'une centaine de mètres de longueur, de quatre mètres de hauteur par environ trois mètres de largeur, dispose de trois fenêtres d'ouvertures le long de la chaussée. A l'origine, le tunnel constituait la voie principale de la route D1091, dont le but était de se prémunir des aléas torrentiels et des avalanches. Cependant, l'édification du tunnel/paravalanche ne semble pas avoir eu de conséquences majeures sur la dynamique torrentielle contemporaine (Thénard, 2009). Mais aux vu des augmentations du trafic routier, l'ouvrage s'est vite retrouvé sous-dimensionné, avec une circulation à sens unique en alternance. Des aménagements ont donc été entrepris dans le milieu du 20^e Siècle avec la construction d'une chaussée plus large à double sens en parallèle de la galerie : l'actuelle D1091. Un déversoir empierré fût construit en amont afin de permettre l'écoulement des eaux du torrent, dirigées ensuite vers un avaloir permettant à son tour de faire s'écouler les eaux sous la chaussée vers le cône de déjection situé en aval (Figure 23).

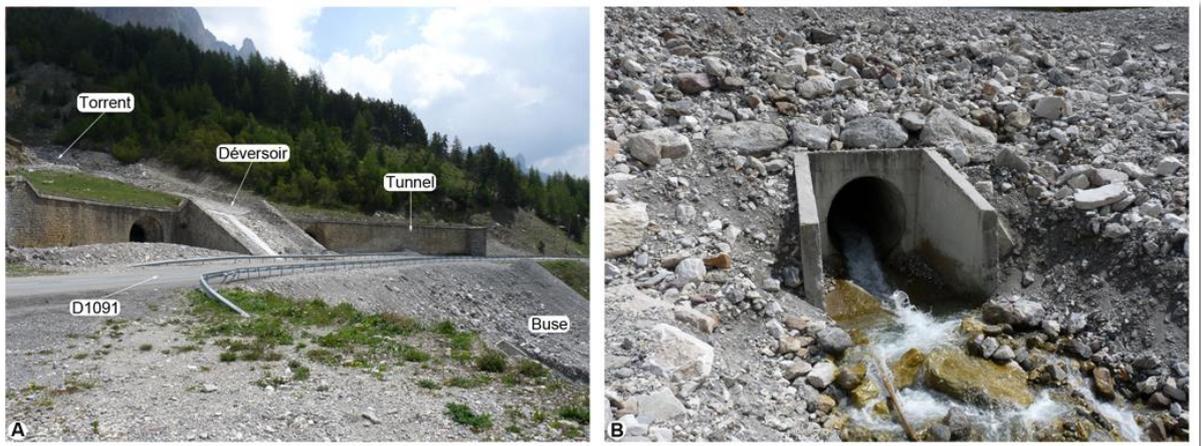


Figure 22. A. L'ouvrage de franchissement au niveau de la route D1091 pour le torrent du Rif Blanc, B. La buse d'écoulement des eaux du torrent sous la route départementale D1091

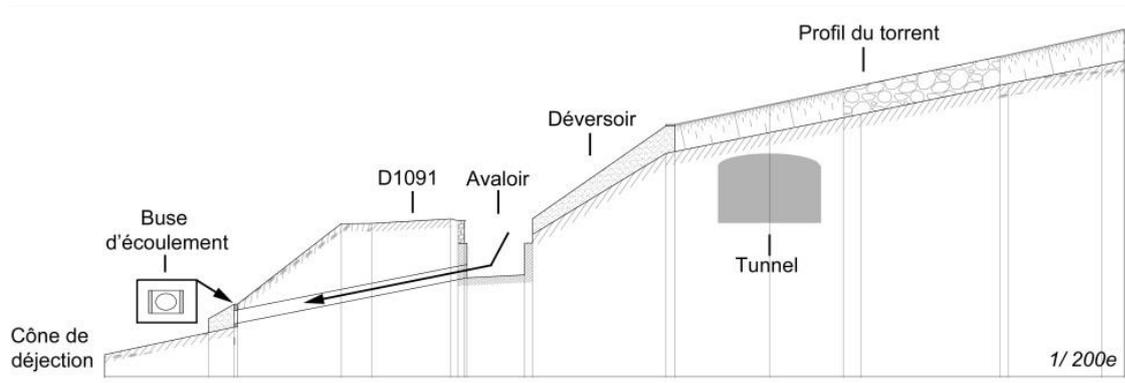


Figure 23. Vue en coupe de l'ouvrage de franchissement au niveau de la route D1091 pour le torrent du Rif Blanc

Ce dispositif était initialement prévu pour un écoulement fluide et rapide tel que les eaux de pluies. Il est nettement moins adapté pour un évènement torrentiel avec une matrice boueuse à forte viscosité accompagnée de blocs rocheux. En cas de lave torrentielle, le toit du tunnel fait office de radier et la faible dimension de la buse conduit à la formation d'un embâcle sur la route D1091. Ces travaux d'aménagement ont plutôt abouti à une plus grande exposition du réseau routier, en facilitant l'engravement du tronçon.

En recoupant les archives RTM, du Conseil Général des Hautes-Alpes et les informations fournies par de Thénard (2009) et celles de la presse régionale (Dauphiné libéré): sept évènements de type laves torrentielles sur le Rif Blanc ont été répertoriés, avec un temps de retour inférieur à deux ans depuis 2008, tous ont impacté le réseau routier (Tableau 13). A titre de comparaison, pour l'ensemble des bassins-versants de la vallée de la Guisane, le temps

de retour moyen des évènements est de 2,4 années, soit un laps de temps très court (Thénard, 2009).

Tableau 13. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant du Rif Blanc

Évènements Totaux (>1950) / dont impacts réseau	Période d'activité du torrent	Année du dernier impact	Nom du réseau impacté	N° du tronçon impacté (code IGN)
7 / 7	1970 - 2012	2012	Départementale D1091	223 193

L'ensemble de ces évènements dommageables sont décrits dans le tableau de synthèse (Tableau 14). L'année 2008 se distingue immédiatement comme étant celle occasionnant le maximum d'évènements et le maximum de dégâts, sur les sept évènements recensés à ce jour, quatre ont eu lieu entre mai et juillet 2008. On remarque également que depuis cette date, un évènement dommageable a lieu environ tous les deux ans.

Grâce au niveau de détails fournis sur les modes d'endommagement du réseau, nous pouvons constater que la majorité des évènements provoquent des dommages physiques de type obstruction de chaussée avec arrachement des glissières de sécurité. On note également l'engravement récurrent du tunnel, probablement dû aux grandes ouvertures le long de la D1091. Les évènements les plus violents peuvent conduire à la destruction partielle de la plate-forme routière, mais peu d'informations sont toutefois disponibles vis à vis des volumes de matériaux déposés. Faute de pouvoir circuler ni sur la chaussée principale ni dans le tunnel, les interruptions de réseau sont assez fréquentes pour ne pas dire systématiques. Mais visiblement, la priorité est donnée au dégagement du tunnel pour permettre une circulation alternée le temps des travaux de réhabilitation de la voie principale.

Tableau 14. Synthèse des évènements lave torrentielle sur le torrent du Rif Blanc et leurs conséquences sur le réseau routier

Date	Emprise des matériaux sur la chaussée	Dommages physiques	Perturbations fonctionnelles	Classement DPmax / PFmax	Coûts (Euros)
28/07/1970	-	Obstruction du déversoir et du tunnel	-	D3 / SP	-
20/05/2008	Dépôts estimés entre 7 000 et 11 000 m ³	1. Obstruction partielle de la chaussée 2. Arrachement des glissières de sécurité	Alternat de circulation durant une dizaine de jours par le tunnel	D3 / P3	-
29/05/2008 (02h00) + 01/06/2008	Longueur : 60m Épaisseur : 3m	1. Obstruction du déversoir, du tunnel, de la chaussée 2. Affaissement et destruction partielle de la plate-forme 3. Arrachement des glissières de sécurité et destruction du talus 4. Un véhicule emporté	1. Circulation interrompue pendant 8 heures 2. Panne de signalisation le temps de la fermeture de la route pendant 1heure 3. Alternat de circulation pendant 3 semaines par le tunnel	D4 / P4	125 000
28/07/2008	-	1. Obstruction du déversoir et de la chaussée 2. Arrachement des glissières de sécurité	1. Interruption de circulation sans indication de durée 2. Alternat de circulation sans indication de durée par le tunnel 3. Urgence du dégagement pour le tour de France	D3 / PP	-
31/05/2010	Longueur : 40-50m Épaisseur : 2m	1. Obstruction du déversoir et de la chaussée 2. Arrachement des glissières de sécurité	1. Circulation interrompue (fin matinée -18h) 2. Alternat de circulation par le tunnel sans indication de durée	D3 / P2	-
4/06/2012 (5h00 et 13h00)	Longueur : 95m Épaisseur : 2m	1. Obstruction du déversoir, du tunnel et de la chaussée 2. Affaissement de la chaussée 3. Arrachement des glissières de sécurité	1. Circulation interrompue pendant 8 à 9heures 2. Alternat de circulation par le tunnel pendant 5 jours	D3 / P3	25 000

a) Les évènements torrentiels de mai 2008, brève description

L'année 2008 a été marquée par de nombreux évènements torrentiels dans les Hautes-Alpes, le Conseil Général a dénombré près de 18 impacts répartis sur 12 axes du réseau routier départemental. Dans le cas du Rif Blanc, les conditions au déclenchement ont été rendues possibles en raison d'un maintien tardif du manteau neigeux en altitude suivi de deux journées fortement pluvieuses, entraînant une fonte accélérée de la neige. Le débit du torrent a considérablement augmenté, érodant les berges, transportant d'importants volumes de matériaux et conduisant à la formation d'embâcles (Annexe 2, fiche Intempérie du CG05). Cette situation répétée sur un cours laps de temps est responsable de la succession des '*purges sédimentaires*' pour l'année 2008.

Les dégâts enregistrés sont les plus importants répertoriés en termes de dommages physiques et de perturbations fonctionnelles, de par la violence des évènements, mais aussi en raison de leur répétition sur quelques semaines qui n'ont pas laissé de répit entre les opérations de remise en état du réseau. Un catalogue photographique illustre l'évènement et ses dommages en Figure 24. Selon les documents archivés du Conseil Général des Hautes-Alpes, les dégâts se sont élevés à environ 125 000Euros uniquement pour les évènements du 29 mai et 1^{er} juin. Au total (tous les torrents confondus), l'ensemble des dégâts occasionnés sur le réseau routier départemental a été évalué à près de 5ME.



Figure 24. Catalogue photographique des évènements torrentiels de 2008 sur le Rif Blanc (source : CG05) A. Vue générale de l'apex et des dégâts sur la route D1091 depuis le col du Lautaret, B. Vue plongeante en amont du torrent depuis un hélicoptère, C. Vue latérale de l'apex et des dégâts sur la route D1091 depuis un hélicoptère, D. Vue en contrepied de l'apex et dégâts sur la route D1091, E. Vue des dommages depuis la route D1091 sur l'apex sens Col du Lautaret – Briançon, F. Remorquage du véhicule emporté

b) L'évènement torrentiel du 4 juin 2012, brève description

En réalité deux coulées ont été enregistrées lors de cet évènement, la première est signalée par un usager vers cinq heures du matin. Puis, une seconde coulée est constatée par les services routiers et de gendarmerie vers dix heures du matin durant les premières opérations de déblaiement. Selon le Conseil Général des Hautes-Alpes, ces évènements se sont produits à la suite de journées particulièrement pluvieuses.

Au total plus de 95 mètres linéaires de route sont impactés. Les dommages physiques limités lors à la première coulée mis à part l'obstruction partielle de la chaussée, sont bien plus importants lors de la seconde coulée. Cette-fois, l'ensemble de la chaussée et du tunnel sont obstrués et une partie de la plate-forme routière est arrachée. Malgré des tentatives de rétablissement de la circulation lors des premiers travaux de déblaiements, le trafic est finalement interrompu pour une durée de huit à neuf heures, puis partiellement rétablit en fin de journée au moyen d'un système d'alternat via la galerie du tunnel dégagée. Un catalogue photographique de l'évènement illustre les dommages en Figure 25.

La perturbation routière s'est prolongée durant cinq jours avant le rétablissement complet des voies de communication. Ces perturbations entraineront notamment des coûts d'immobilisation du matériel et le prolongement d'un chantier pour une entreprise de travaux publics située à proximité.



Figure 25. Catalogue photographique de l'évènement du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc (source : CG05), A. Vue latérale de la première crue depuis la route D1091 sur l'apex sens Briançon - Col du Lautaret, B et C vues générale depuis la D1091 sens Col du Lautaret après le passage de la seconde crue

3.2.2. Les sites d'étude secondaires : les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec

a) Le bassin-versant de Malefosse

Malefosse est situé sur la commune de Briançon, au nord du département des Hautes-Alpes. Ce bassin-versant est situé au point d'entrée de la vallée de la Clarée le long de la Haute-Durance (Figure 26-A). Cette vallée est bien connue pour ses torrents actifs (le Roubion et le Ravin des Sables entre autres), elle est délimitée au sud-ouest par la ville de Briançon et au nord-est par la ville de Montgenèvre à la frontière avec l'Italie.

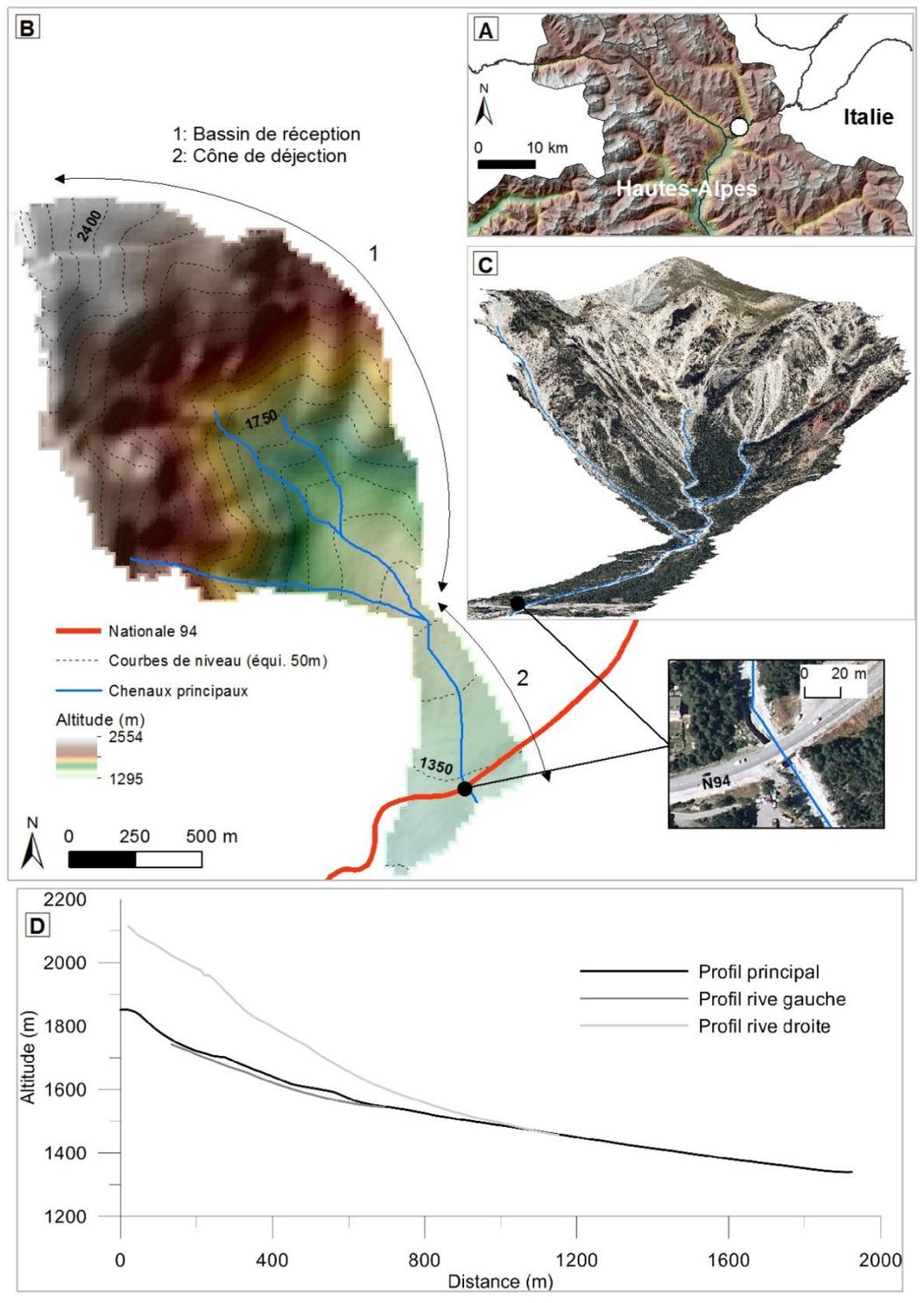


Figure 26. A. Localisation du bassin-versant de Malefosse, B. Topographie du bassin-versant de Malefosse (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant de Malefosse et interaction torrent/réseau routier (N94), D. Profil en long des chenaux de Malefosse et interaction torrent/réseau routier (N94)

La géomorphologie de ce bassin-versant a peu en commun avec celle du Rif Blanc (Tableau 15). Plus grand que ce dernier, il présente un indice de compacité de Gravélius moins élevé ($K_g=1.2$) et donc une forme peu étirée du bassin de réception. Bien que la surface et la pente de la zone d'ablation soient assez importantes, le cône de déjection est relativement peu étendu et la pente est faible.

Tableau 15. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant de Malefosse

Superficie du bassin de réception (km ²)	Superficie du cône de déjection (m ²)	Altitudes (max / min)	Longueur (m)	Pente du bassin de réception (%)	Pente du cône de déjection (%)
1.6	0.3	2 567/ 1 330	2 950	21.8° (40%)	9.09° (16%)

Ce constat peut être expliqué par le reboisement d'une partie du cône en rive gauche du torrent ce qui a eu pour effet de réduire les bandes actives du chenal. Davantage canalisé, le lit du torrent est relativement large et présente une douzaine de seuils dans sa partie médiane. En amont, le lit principal se divise en trois chenaux contributifs à forte pente, celui en rive droite fonctionne aussi comme couloir d'avalanche (Figure 26-D). La majorité des matériaux mobilisables proviennent de l'érosion directe des crêtes constituées de schiste argileux, de calcaire et de grès. Un engravement important au niveau de la jonction entre les chenaux contributifs avec le lit principal fournit également une source de matériaux disponibles (Figure 26-B-C).

En termes de dynamique torrentielle, Malefosse fonctionne par intermittence uniquement lors de forçages climatiques tels que les orages. Garitte (2006) a démontré que le lit du torrent a tendance à s'inciser progressivement depuis quelques années. Par ailleurs, l'analyse des bourrelets torrentiels observent un relatif tri granulométrique entre les gros blocs et une fraction fine plus organisée, ce qui traduit un écoulement proche de systèmes fluviaux (Garitte, 2006). Pour autant, ses mesures effectuées sur les dépôts prouvent que le torrent est nettement plus sujet aux laves torrentielles qu'au charriage. Il en a conclu que le torrent de Malefosse est plutôt caractérisé par une dynamique mixte où les deux cas de figure peuvent se présenter. Ce type de comportement serait le résultat de la contrainte exercée par les ouvrages de correction torrentielle et les curages réguliers du lit du torrent par le service RTM.

Contrairement au Rif Blanc, le croisement entre le chenal torrentiel et le réseau routier sur Malefosse est localisé directement sur le cône de déjection (Figure 26-C). Il s'agit d'un ouvrage de franchissement simple, un pont bétonné à deux voies avec une légère butée de chaque côté et des garde-corps métalliques tout du long. Il n'existe aucun aménagement particulier à ce niveau contre l'aléa torrentiel (Figure 27).



Figure 27. A. Chenal principal du torrent de Malefosse, vue en amont de l'ouvrage de franchissement routier, B. Chenal principal du torrent de Malefosse et ouvrage de franchissement de la route nationale N94 (pont à deux voies)

Des événements torrentiels sont cités dans les archives de l'ETRM (Eaux, Torrent & Rivières de Montagne) depuis 1856. Depuis 1950, on dénombre 13 événements dont 9 ont impacté la nationale N94, c'est-à-dire que 3 événements sur 4 ou plus sont dommageables au réseau (Tableau 16).

Tableau 16. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant de Malefosse

Évènements Totaux (>1950)/ dont impacts réseau	Période d'activité du torrent	Année du dernier impact	Nom du réseau impacté	N° du tronçon impacté (IGN)
13 / 9	1856 - 2009	2009	NN94	226 679

Cependant, les renseignements sur la nature des dommages ne sont pas aussi complets que pour le Rif Blanc (Tableau 17). La plupart des dommages physiques connus concernent des obstructions de chaussée ou des destructions partielles du pont. Peu de perturbations fonctionnelles sont décrites, mais cette lacune d'information ne signifie pas pour autant une absence de conséquences. En suivant l'exemple de 1993, il est probable que

les autres évènements ont provoqué le même type de perturbations. Le temps de retour moyen des évènements dommageables au réseau est de 6.5 ans, mais depuis les années 1990 ce temps de retour est passé à 3.2 ans en moyenne. Malheureusement, il n'existe pas à notre connaissance d'informations sur les coûts des dommages spécifiques à cette portion du réseau routier.

Tableau 17. Synthèse des évènements lave torrentielle sur le torrent de Malefosse et leurs conséquences sur le réseau routier

Date	Emprise des matériaux sur la chaussée	Dommages physiques	Perturbations fonctionnelles	Classement DPmax / PFmax	Coûts (Euros)
1950	-	Destruction de la plate-forme et du pont	-	D5 /SP	-
09/07/1956	Longueur : 100m	1. Obstruction de la chaussée 2. Dégradation du pont	-	D3/SP	-
26/09/1956	Longueur : 50m	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-
19/06/1960	-	1. Obstruction de la chaussée 2. Destruction partielle de la plate-forme (pont)	-	D4/SP	-
20/06/1993	Longueur : 500m	1. Obstruction de la chaussée	Circulation interrompue pendant 4 heures	D3/P2	-
03/07/2001	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-
24/06/2005	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-
16/07/2006	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-
18/09/2009	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-

c) Le bassin-versant du Rieu Sec

Le Rieu Sec est situé sur la commune de Saint-Martin-La-Porte en Moyenne Maurienne dans le département de la Savoie, au côté de grands bassins-versants torrentiels historiques (le torrent de la Ravoire de Pontamafrey, le torrent de l'Envers, le torrent du Pousset entres autres). Cette grande vallée intra-alpine appelée également pays de Maurienne s'étend sur plus de 120 km d'ouest en est jusqu'à la frontière avec l'Italie (Figure 28-A). Contrairement à ses voisins, le Rieu Sec est un torrent certes très actif mais dont la superficie est bien plus réduite puisque le bassin de réception fait moins d'un kilomètre carré (Tableau 18) pour un indice de compacité de Gravélius $K_g=1$. Très peu végétalisé, le bassin de réception est marqué par des pentes abruptes atteignant jusqu'à 29,7° au pied des crêtes (Figure 28-D) et un cône de déjection important, quasi égal à la moitié de la superficie du bassin de réception (Figure 28-B-C).

Tableau 18. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant du Rieu Sec

Superficie du bassin de réception (km ²)	Superficie du cône de déjection (m ²)	Altitudes (max / min)	Longueur (m)	Pente du bassin de réception	Pente du cône de déjection
0.85	0.4	2 031 / 690	1 960	16.17° (37%) 29.7° (57%) en partie amont	-

La particularité du Rieu Sec vis-à-vis des autres bassins-versants de la vallée est que la plupart des torrents en Maurienne font l'objet d'une correction torrentielle massive, mais pas le Rieu Sec. En réalité, 158 seuils ont été construits sur son chenal principal et sur son affluent à la fin du 19^e Siècle. Mais depuis la correction n'a pas été poursuivie, non entretenus, les seuils ont été détruits lors des évènements. La morphologie du chenal principal est relativement large dans le bassin de réception, puis ce dernier montre un profil très incisé sur son cône de déjection avec des bourrelets de lave, des zones de dépôts marqués et des vestiges d'embâcles rehaussant localement le niveau du lit (Figure 28-B-C).

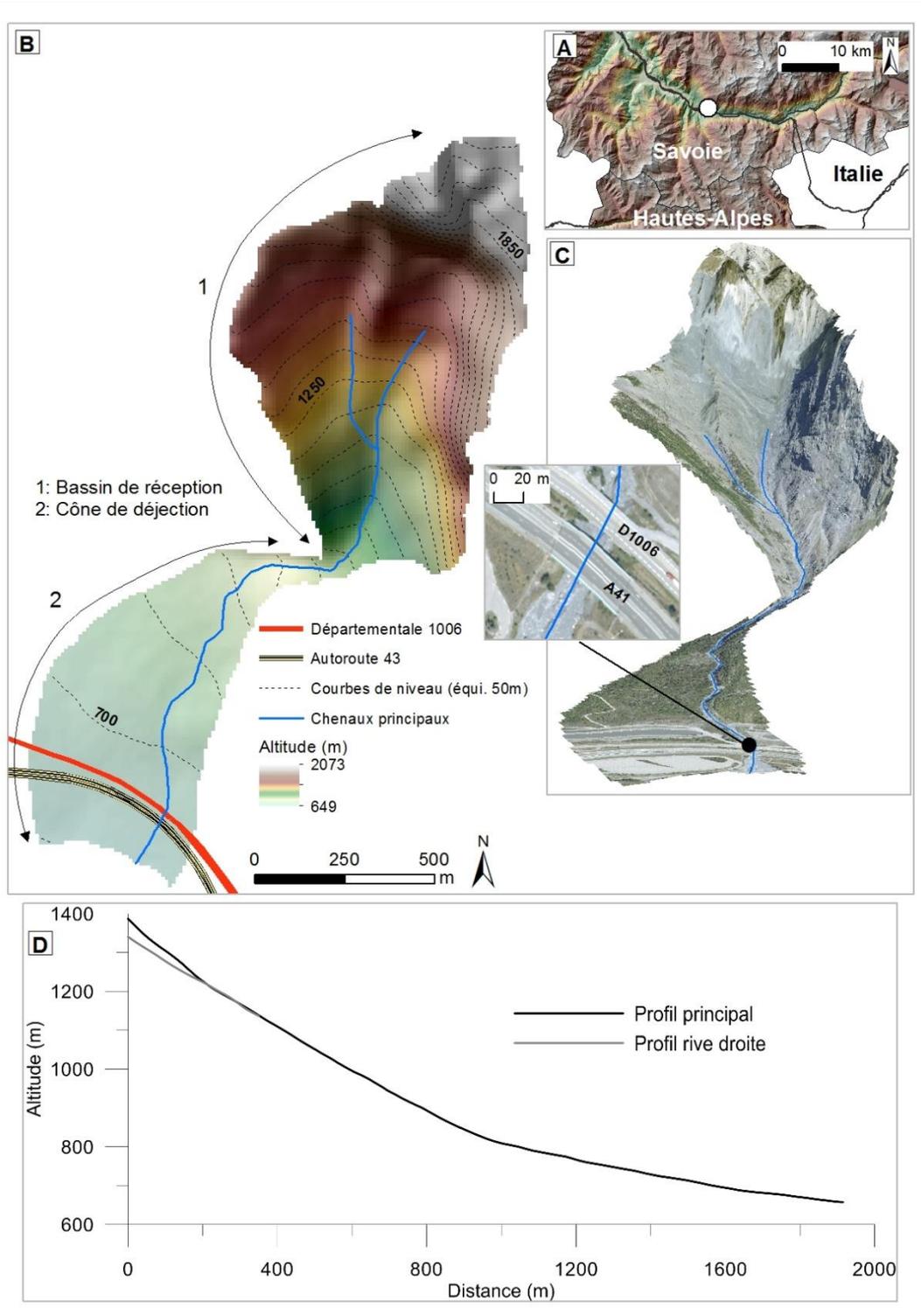


Figure 28. A. Localisation du bassin-versant du Rieu Sec, B. Topographie du bassin-versant du Rieu Sec (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant du Rieu Sec et interaction torrent/réseau routier (D1006/A43), D. Profil en long des chenaux du Rieu Sec et interaction torrent/réseau routier (D1006/A43)

Il est important de noter que le lit torrentiel semble avoir été clairement dévié vers la rive droite sur son cône de déjection pour des aménagements territoriaux de grande ampleur non spécifiques à la correction torrentielle (remblais de terre et bassins d'alimentation en eau pour l'usine électrique souterraine de l'Échaillon). Il est fort probable que cette modification brutale de la topographie a eu un impact sur la dynamique du torrent dans sa partie inférieure.

Les matériaux mobilisables sont constitués d'un conglomérat de calcaire pour les gros blocs et de marnes pour la matrice plus fine et boueuse. Ils proviennent pour la plupart de l'érosion mécanique en partie supérieure du bassin de réception, la fracturation de la roche y est très développée ce qui a permis la création d'un vaste cône d'éboulis. Les formations superficielles couvrent ainsi environ la moitié de la surface du bassin-versant (Cojean et al., 2002). Certaines zones en rive droite dans la partie supérieure du bassin-versant sont également l'objet de glissements de terrain (Cojean et al., 2002). La recharge en matériaux est aussi disponible tout le long du lit torrentiel très engravé dès que la force motrice est suffisante. Tout comme Malefosse, le Rieu Sec fonctionne par intermittence uniquement lors de forçages climatiques tel que des orages ou des précipitations intenses. Il est probable que ces conditions provoquent un ravinement important en tête de bassin jusqu'au chenal principal, initiant la formation des laves torrentielles.

Cojean et al. (2002) estiment que le Rieu Sec serait capable de fournir des laves torrentielles d'un volume compris entre 5 000m³ et 15 000m³, au-delà ils considèrent qu'un évènement serait considéré comme catastrophique.

Le cône de déjection est traversé par deux ensembles routiers : la départementale D1006 et l'autoroute A43, deux réseaux routiers sont donc directement exposés ici (Figure 28-C). Dans les deux cas de figure, les ouvrages de franchissement correspondent à des ponts routiers bétonnés ; contrairement au torrent du Saint-Bernard voisin du Rieu Sec où un ouvrage d'écoulement spécifique au torrent a été construit dans le prolongement du chenal, suspendu au-dessus des voies routières. Pour le Rieu Sec, la structure du pont de la D1006 est relativement simple et de même type que pour Malefosse : il s'agit d'un tablier retenu par deux piliers de chaque côté du torrent, sous lequel passe le chenal. En revanche, le pont de l'autoroute est bien plus haut et plus renforcé, il est composé de deux tabliers reposant

chacun sur quatre pilonnes. A souligner que les pieds de soutènement de tous les ouvrages sont largement engravés et englobés par les dépôts des précédentes coulées (Figure 29).



Figure 29. A. Bloc rocheux déposé par la lave torrentielle de 2007 à environ 50 mètres en amont des ponts routiers de la D1006 et de l'A43 sur le torrent du Rieu Sec, B. Vue amont du chenal principal du Rieu Sec à l'entrée du pont de la D1006 (On note la dégradation du pont par les coulées au niveau du tablier inférieur du pont) C. Vue latérale droite du lit torrentiel du Rieu Sec sous le point de l'A43, D. Vue aval du lit torrentiel du Rieu Sec en direction des points de l'A43 et de la D1006

Des évènements sur le Rieu Sec sont recensés dans les archives depuis 1781 (Cojean et al., 2002). Sur notre période de référence, il a produit 24 évènements torrentiels entre 1953 et 2009 dont 5 ont assurément impacté le réseau routier (Tableau 19).

Tableau 19. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant du Rieu Sec

Évènements Totaux (>1950)/ dont impacts réseau	Période d'activité du torrent	Année du dernier impact	Nom du réseau impacté	N° du tronçon impacté (IGN)
24 / 10	1953 - 2009	2006	D1006 (N6) A 43 (E70)	216 875 216 840

Cependant, la répartition des évènements est assez irrégulière, Cojean et al. (2002) en conclut que le torrent fonctionne par « crises », le temps que se reconstitue le stock de matériaux mobilisables en transit sur les pentes et dans le lit du torrent.

La synthèse des évènements dommageables (Tableau 20) montre une majorité d'obstruction de la chaussée, l'ouvrage le plus affecté étant bien entendu celui de la D1006 (dénommée Nationale N6 avant 2004). L'élément qui a retenu notre attention est l'impact de 1993 sur l'autoroute A43 (en fin de construction à cette époque). Il s'agit du seul torrent répertorié dans les bases de données avec une coupure de réseau avérée sur une liaison de cette importance. Pourtant, aucune mesure de protection corrective n'a été construite lors des travaux de l'autoroute contrairement aux torrents du Saint-Bernard et du Saint-Julien situés à proximité.

Tableau 20. Synthèse des évènements lave torrentielle sur le torrent du Rieu Sec et leurs conséquences sur le réseau routier

Date	Emprise des matériaux sur la chaussée	Dommages physiques	Perturbations fonctionnelles	Classement DPmax / PFmax	Coûts (Euros)
30/06/1953	-	Dégradation de la chaussée	Interruption du trafic pendant 48heures	D1/P2	-
29/06/1983	-	Obstruction de la chaussée	Perturbation du trafic sans indication de durée	D3/PP	-
17/08/1987	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/SP	-
19/05/1989	-	Tunnel routier et autoroutier atteints	-	D/SP	-
29/06/1993	-	Obstruction de la chaussée (A43)	Perturbation du trafic autoroutier sans indication de durée	D3/PP	-
17/07/1997	-	Tunnel routier et autoroutier atteints	-	D/SP	-
5/03/2006	-	Obstruction de la chaussée	-	D3/PP	-
13/05/2006	-	Tunnel routier et autoroutier atteints	-	D3/PP	-
05/07/2006	-	Tunnel routier et autoroutier atteints	-	D3/PP	-
24/07/2006	-	Tunnel routier et autoroutier atteints	-	D3/PP	-

La plupart des évènements récents notés comme sans dommages apparents (donc non répertoriés dans le tableau ci-dessus) ont une distance d'arrêt connue et notifiée dans la base de données RTM. En effet, il y est décrit que les dépôts de ces laves torrentielles ont atteint les ponts de l'Autoroute A43 et de la Départementale D1006 : le 17 juin 1988, le 17 juillet 1997, le 5 mars 2006, le 13 mai 2006, le 5 juillet 2006, le 24 juillet 2006, et le 2 août 2007. L'atteinte au réseau est donc fréquente, mais elle n'est pas forcément synonyme d'endommagement.

Le temps de retour moyen des évènements dommageables serait donc de 10,6 ans. Seulement, en y incluant les évènements ayant au moins atteint le réseau routier, il passe à 4,5 ans.

3.3. La place des réseaux routiers impactés au sein du maillage routier alpin

3.3.1. La Départementale D1091 (D1091)

Le torrent du Rif Blanc, traverse à son apex la 'route de Grenoble', dont la désignation officielle est Route Départementale D1091 (D1091). Cette liaison interdépartementale d'une longueur de 116km est située au cœur du Pays du Grand Briançonnais. Elle dessert l'ensemble de la vallée de la Guisane et permet de joindre les villes de Grenoble (Isère) et de Briançon (Hautes-Alpes) en passant par le col du Lautaret, les communes de Monêtier-les Bains et La Grave entre autres (Figure 30).

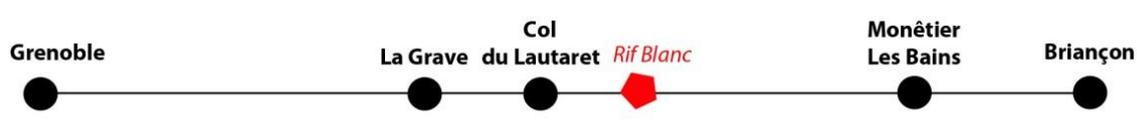


Figure 30. Liaison routière Grenoble-Briançon via le Rif Blanc (D1091)

Le Conseil Général des Hautes-Alpes (CG05) est en charge d'entretenir et d'exploiter cet axe mais aussi l'ensemble du réseau départemental depuis les lois de décentralisation¹. Ainsi au 31 décembre 2009, le CG05 était responsable de 1960 km de voirie départementale (statistiques des transports du Ministère de l'Ecologie, 2011).

Défini en tant que Grand Axe Economique par le CG05 (Annexe 3), cet axe majeur d'importance locale à régionale constitue un réseau essentiel au maillage routier départemental et interdépartemental.

Dans un département où 80% du PIB annuel provient du secteur touristique (Observatoire du tourisme des Hautes-Alpes, 2010), le Pays du Grand Briançonnais détient à lui seul 21% de l'offre touristique des Hautes-Alpes. La station touristique de Serre-Chevalier située entre Monêtier-Les Bains et Briançon (12ème station de ski française, 1ère de la région Provence-Alpes-Côte-D'azur) n'est desservie que par cette unique route et polarise 70% de

¹ (La loi de décentralisation de 1982 et surtout celle de 2004 ont conduit au déclassement de certaines routes nationales jugées d'intérêt local en routes départementales, c'est le cas de la DD1091 anciennement route nationale 91 ou N91).

cette offre. Le dynamisme de ce secteur d'activité est donc directement lié à la viabilité de la route D1091. A ce titre, une pression permanente est exercée par les décideurs locaux et les professionnels des secteurs d'activités influents pour limiter au possible la fermeture du col du Lautaret, dans le but de maintenir l'accessibilité de la vallée.

Or, comme pour la plupart des stations touristiques de montagne, la fréquentation touristique annuelle des Hautes-Alpes est majoritairement concentrée sur la période estivale, pour exemple en 2009 : 47% pour la période juillet-août contre 38% pour la période décembre-avril (Observatoire du Tourisme des Hautes-Alpes, 2010).

La vallée de la Guisane est également la plus peuplée du nord du département, ce qui implique d'importants déplacements domiciles-travail pour ses usagers quotidiens. En cas de d'interruption du trafic, les conséquences engendrées sont très influencées par la durée de la perturbation, mais également par l'heure à laquelle ont lieu les événements.

A l'image de l'activité touristique du département, cet axe routier tend à être de plus en plus utilisé en période estivale au regard du comptage routier effectué par les services du CG05 en 2011 sur la période d'activité du Rif Blanc (Tableau 21). La densité du trafic routier (tous véhicules) en période estivale est nettement plus importante qu'en période hivernale puisqu'elle observe une augmentation du trafic de 74% entre les mois de mars et août pour La Grave près du col du Lautaret et de 38.5% pour la même période à Monétier-les-Bains (tous sens confondus). La fréquentation du mois de juin est égale et/ou supérieure à celle enregistrée pour l'ensemble de l'année. Le mois de juillet quant à lui est le plus fréquenté puisque le trafic y est deux à trois fois supérieur par rapport à la moyenne journalière annuelle.

Tableau 21. Tableau de comptage routier 2011 tous véhicules pour les stations de La Grave et de Monétier-Les-Bains MJM : Moyennes Journalières Mensuelles. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)

Sens	MJM Mai	MJM Juin	MJM Juillet	MJA
La Grave - Briançon	882	1 385	2 502	1 334
Briançon - La Grave	895	1 372	2 390	1 331
Monétier -Briançon	1 030	1 615	2 430	1 860
Briançon - Monétier	1 045	1 697	3 282	1 711
TOTAL	3 852	6 069	10 604	6 236

En ce qui concerne le transit de marchandises, l'axe Grenoble-Briançon est également très fréquenté durant la période d'activité du Rif Blanc (Tableau 22), notamment pour rejoindre l'Italie dans le but d'éviter les surcoûts dus au péage autoroutier en Maurienne.

Selon les tableaux de comptage routier effectués par les services départementaux, les poids lourds représentent environ 5% du trafic moyen annuel sur la D1091.

Tableau 22. Tableau de comptage moyen journalier routier 2011 poids lourds pour les stations de la Grave et de Monétier-Les-Bains, MJM : Moyennes Journalières Mensuelles. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)

Sens	MJM PL Mai	MJM PL Juin	MJM PL Juillet	MJA PL
La Grave - Briançon	72	71	N94	65
Briançon - La Grave	64	60	74	76
Monétier - Briançon	72	N94	131	88
Briançon - Monétier	78	103	167	83
TOTAL	286	328	466	312

Cependant, l'accès en montagne est très règlementé en termes de poids, de gabarit et de la nature de la marchandise, auxquels s'ajoutent la contrainte topographique, les conditions météorologiques et les nuisances occasionnées. Dans cette logique, le département des Hautes-Alpes interdit la circulation des véhicules poids lourds de plus de 26 tonnes sauf dérogations préfectorales. En termes de gabarit, la hauteur est limitée à 4.3m sur la D1091.

Ce constat potentialise la vulnérabilité de ce réseau ainsi que sa valeur stratégique vis-à-vis de la période d'activité du torrent du Rif Blanc (Figure 31) où la probabilité de coupure par un évènement (ratio entre le nombre d'évènements recensés et le nombre de coupures occasionnées) est de 100%.

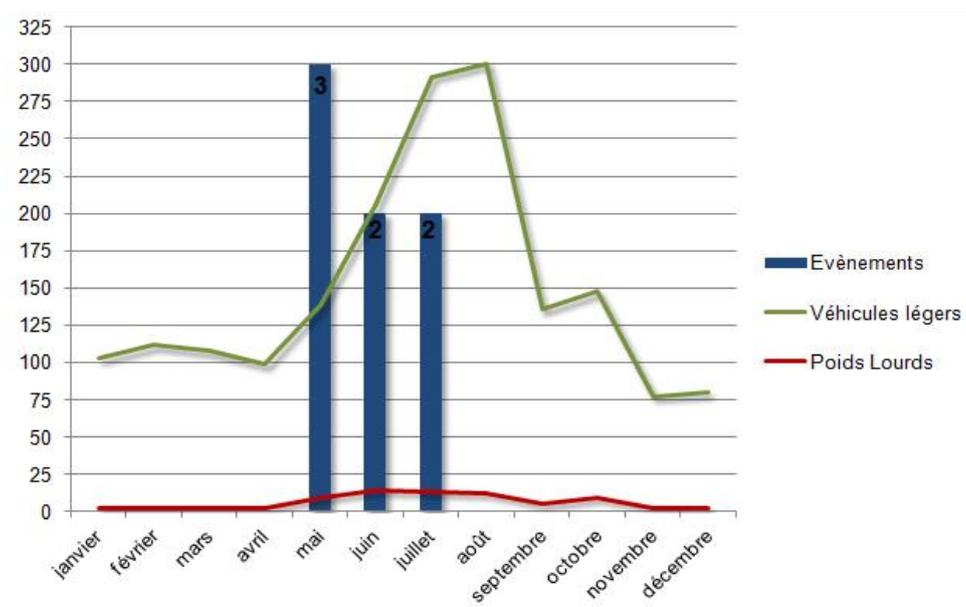


Figure 31. Comparaison entre la répartition mensuelle des évènements du Rif Blanc et la fréquentation routière journalière mensuelle, tous sens confondus, station de comptage de Monétier-les Bains – 2010 (Source : CG05, RTM)

3.3.2. La Nationale N94

La route nationale N94 (N94) est un axe majeur de la vallée de la Haute Durance, elle est située au cœur du Pays du Grand Briançonnais dans les Hautes-Alpes. D'une longueur de 100km, elle relie les villes de Gap à Montgenèvre ville frontière avec l'Italie, en passant notamment par Embrun, Argentière-La-Bessée et Briançon. Le torrent de Malefosse croise cet axe à la sortie de Briançon en direction de l'Italie (Figure 32).



Figure 32. Liaison routière Gap-Briançon via Malefosse (N94)

Certaines portions de cette route ont été déclassées en départementales suite aux lois de décentralisation, mais pas sur le tronçon Briançon-Montgenèvre. Par conséquent la gestion de la nationale N94 ne revient pas au Conseils Généraux mais à l'une des Direction Interdépartementale des Routes, dans le cas présent la DIR Méditerranée (DirMed). Ce service déconcentré de l'État est en charge de l'entretien et de l'exploitation des routes nationales/autoroutes non concédées de l'ensemble du sud-est de la France (inforoute-dir-mediterranee.fr).

La nationale N94 constitue un axe vital entre les deux pôles économiques du département des Hautes-Alpes à savoir Gap et Briançon. Cette liaison est également la seule connexion existante directe entre Briançon et l'Italie. Très fréquentée, la N94 dessert la station de Montgenèvre (25^{ème} station de ski française) et les sites de la Clarée et de Névache (Observatoire du tourisme des Hautes-Alpes, 2010).

En termes de fréquentation routière, peu de données sont connues mis à part les moyennes journalières annuelles du tronçon concerné (Tableau 23), il n'est donc pas possible de croiser ces informations avec la période d'activité mensuelle du torrent de Malefosse. Au regard des données disponibles, il semble que le trafic routier global tend à augmenter ces

dernières années. Les poids lourds représentent 3 à 5% du trafic sur l'ensemble de la période 2009-2013 et 6 à 8% du trafic routier à la frontière avec l'Italie.

Tableau 23. Tableau de comptage routier 2009/2012/2013 tous véhicules et poids lourds pour le tronçon Briançon-Montgenèvre et le Col de Montgenèvre. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)

Tronçon	Type véhicule	MJA 2009	MJA 2012	MJA 2013
Briançon-Montgenèvre	Tous	5 984	5 882	6 076
Col de Montgenèvre	Tous	2 596	2 888	3 192
Briançon-Montgenèvre	Poids lourds	287	230	163
Col de Montgenèvre	Poids lourds	1N94	225	196

3.3.3. La Départementale D1006 et l'Autoroute A43

Le Rieu Sec présente la particularité de croiser deux axes routiers : la départementale D1006 (D1006) et l'autoroute A43 (A43 ou E70 pour l'Europe). Ces deux axes desservent la grande vallée de la Maurienne elle-même située au sud du département de la Savoie. La D1006 constitue en réalité une portion de l'ancienne nationale 6 alors plus grande route de France, aujourd'hui la D1006 est délimitée par le département de l'Isère jusqu'au col du Mont-Cenis en Savoie à la frontière avec l'Italie. Pour notre étude nous retiendrons uniquement la portion de route entre Chambéry et Modane d'une longueur de 115km, elle traverse notamment les villes de Montmélian, Saint-Jean de Maurienne et Saint-Martin La Porte (ou De la Porte selon les usages) (Figure 33).

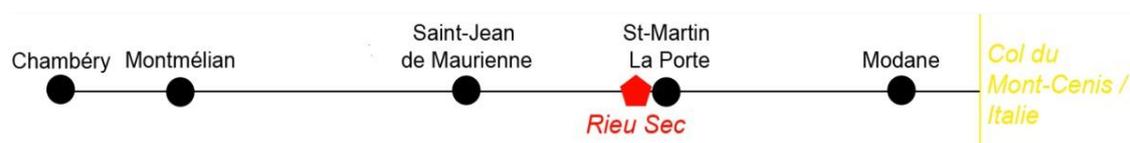


Figure 33. Liaison routière Chambéry-Modane via le Rieu Sec (D1006)

Tout comme la D1091, la gestion et l'entretien de la D1006 reviennent aux services déconcentrés de l'État depuis les lois de décentralisation, ici le Conseil Général de Savoie (CG73). En termes de fréquentation routière depuis 2008, le trafic routier sur la route départementale D1006 est en légère baisse avec -2.5% par an en Maurienne, soit plus que la

baisse générale observée pour l'ensemble du réseau routier départemental de Savoie (-0,6%) (Tableau 24).

Tableau 24. Tableau de comptage routier 2008/2013 tous véhicules et poids lourds pour le tronçon Chambéry-Modane, MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)

Territoire	MJA 2008	MJA 2013
Maurienne	8 506	7 509
Cœur de Savoie	11 616 /11 653	10 417 /11 844

L'autoroute A43 quant à elle longe la D1006 sur la majeure partie de la vallée de la Maurienne. D'une longueur de 185km, elle relie Lyon à Modane jusqu'à la frontière italienne via le tunnel du Fréjus (Figure 34). Dans sa version européenne (E70) cet axe majeur des déplacements alpins internationaux permet de connecter les départements du Rhône (Lyon), de l'Isère (Bourgoin-Jallieu), de la Savoie (Chambéry à Modane) et du Val d'Aoste en Italie (Bardonecchia à Turin) sur 500km, mais le parcours en totalité de l'E70 relie l'Espagne à la Géorgie sur près de 4 600km et traversant 10 pays.

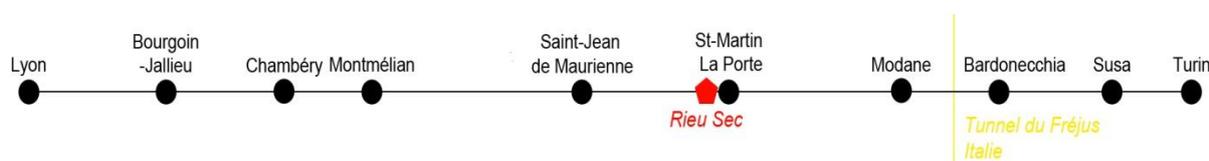


Figure 34. Liaison routière Lyon-Turin via le Rieu Sec (A43/E70)

L'autoroute A43 appartient aux concessionnaires suivants pour la partie française : la Société des Autoroutes de Rhône-Alpes (SAREA) et la Société Française du Tunnel Routier du Fréjus (SFTRF). La SFTRF a notamment la charge d'aménager et d'exploiter le tunnel franco-italien du Fréjus et l'autoroute de Maurienne (www.sftrf.fr).

La fréquentation de l'autoroute de Maurienne est en baisse depuis 2007 avec -3% par an en moyenne, le trafic est d'environ 5 800 véhicules au péage de Saint-Michel de Maurienne localisé entre Saint-Martin la Porte et Modane (Observatoire des Déplacements en Savoie, 2009). En revanche, le trafic de poids lourds est très important, surtout depuis l'accident au tunnel du Mont Blanc survenu en 1999, ce qui a eu pour conséquence le report massif des transferts de marchandises sur le tunnel du Fréjus (Tableau 25).

Tableau 25. Trafic de marchandises aux principaux points de passage avec l'Italie (Source : Alpinfo, CG73)

En millions de tonnes	2000	2006	2007	2013
Tunnel du Fréjus	35,2	18,6	19,7	13,6
Tunnel du Mont Blanc	0	9,1	8,6	8,6

En 2008, 842 900 poids lourds (autocars et camions) ont franchi le col du Fréjus contre 604 100 pour le tunnel du Mont-Blanc. Cependant, le rééquilibrage progressif des flux sur les deux tunnels tend vers une diminution du trafic sur le tunnel du Fréjus (-6% en 2008). L'autoroute de Maurienne conserve malgré tout la plus grosse part de trafic de poids lourds des Alpes françaises vers les Alpes italiennes (Observatoire des Déplacements en Savoie, 2014).

Conclusion

Pour cette étude, nous disposons de trois bassins-versants alpins où la chaîne du risque est travaillée selon un emboitement des échelles d'analyse, depuis l'impact local jusqu'aux conséquences régionales. Le recours à la cartographie et l'usage des SIG présente donc ici un intérêt majeur pour une vue d'ensemble.

Ce travail doit permettre de connecter les composantes aléa/vulnérabilité en reliant les conditions au déclenchement, les phases de propagation de la coulée et d'intensité-fréquence avec l'endommagement routier. Cette dépendance ne peut être sous-évaluée dans une démarche d'analyse du risque-réseau. En parallèle, nous évaluons la vulnérabilité institutionnelle des services en charge du réseau impacté en vue d'estimer sa capacité de résilience. Basé sur des enquêtes de terrain auprès des acteurs locaux à la suite de l'évènement de 2012, nous comparons la planification des actions prévue par les autorités gouvernementales avec la gestion de crise réelle en termes de prise de décision et des modes d'intervention. Enfin, nous analysons la vulnérabilité fonctionnelle et les conséquences territoriales de tels impacts au moyen de scénarii comparatifs d'accessibilité routière en situation dite normale et en situation perturbée après un évènement dommageable au réseau.

Chapitre 3 – Occurrence des précipitations et événements torrentiels dommageables

L'activité des laves torrentielles est déterminée par deux variables : les conditions météorologiques et les caractéristiques géomorphologiques des bassins-versants torrentiels. La première est surtout fonction des précipitations et la seconde du stock de débris disponibles à la mobilisation (Pech et Jomelli, 2001).

La relation étroite entre l'intensité/durée des précipitations et le déclenchement des événements a été établie par Caine (1980) puis démontrée par de nombreux auteurs (Johnson et Rodine, 1984 ; Van Steijn, 1991, 1996 ; Corominas, 2000 ; Crosta et Frattini, 2001 ; Aleotti, 2004, Wieczorek et Glade, 2005, Cannon et al, 2008, Borga et al, 2014). Les travaux de Guzzetti et al. (2007, 2008) ont notamment confirmé que dans les Alpes, des pluies intenses et/ou de longue durée sont responsables du déclenchement des laves torrentielles, particulièrement en période estivale.

1. La relation précipitations – laves torrentielles

1.1. Les conditions météorologiques favorables au déclenchement - Alpes françaises

Ce chapitre s'appuie sur les travaux d'Irina Pavlova, docteur du Laboratoire de Géographie Physique dont la thèse a été soutenue en 2013. Ses travaux portaient sur l'activité des laves torrentielles dans les Alpes françaises à l'échelle régionale en relation avec les conditions météorologiques propices à leur déclenchement sur la période 1970-2005. L'étude prenait en compte plus de 500 événements sur 237 bassins-versants répartis entre la Savoie, les Hautes-Alpes et les Alpes de Haute-Provence. Ses recherches abordaient également les effets du changement en climatique en lien avec l'occurrence des événements sur la base du rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat). Ses travaux servirent donc de cadre référentiel pour nos propres investigations.

Les analyses ont démontré que les valeurs d'intensité/durée des précipitations subissent une variation régionale dans le massif alpin français. Deux zones climatiques se distinguent selon un gradient nord-sud. Dans les Alpes du nord, le cumul annuel de pluies est

plus important, l'activité torrentielle a augmenté parallèlement au nombre de jours de pluies. Alors que dans les Alpes du sud, l'activité torrentielle est davantage sensible aux précipitations extrêmes d'origine orageuses (Pavlova et al., 2011). Pour les deux régions, les précipitations sur 35 ans ont surtout eu lieu entre mai et octobre, la tendance observée tend vers une diminution de l'intensité des précipitations contre une augmentation de leur durée (Pavlova et al., 2014). Dans près de 80% des cas, des précipitations ont été enregistrées jusqu'à 72 heures avant le jour de déclenchement des événements torrentiels (Pavlova, 2013).

Jomelli et al. (2007a) ont avancé la valeur de 10mm pour la valeur basse à partir de laquelle les précipitations sont dites extrêmes pour les coulées de débris non chenalisées. A partir de cette limite, Pavlova et al. (2014) ont calculé que près de la moitié des événements ont enregistré un cumul de pluies compris dans un intervalle de 1-10mm. Seulement 30% des événements ont enregistré des précipitations de plus de 10mm et 10% de plus de 30mm. La plupart des événements sont associés à des pluies de faible intensité, de l'ordre de 4mm/heure sur une journée.

1.2. Changement climatique et évolution de l'activité lave torrentielle

Les rapports du GIEC ont mis en évidence les effets du changement climatique pour le XXI^{ème} Siècle et ses conséquences potentielles d'ordre socio-économiques et environnementales. Dès lors, les variables climatiques et géomorphologiques responsables du déclenchement des événements torrentiels peuvent être influencées, ce qui pose la question des effets du changement climatique sur la dynamique des laves torrentielles.

Des changements de fréquence et d'intensité des précipitations, des changements de cycles gel-dégel, des changements dans le régime des glaciers et/ou des changements dans la disponibilité des matériaux mobilisables peuvent être des facteurs déterminants dans l'évolution du déclenchement des coulées de débris (ONERC, 2008 ; Jomelli et al., 2011). Selon les modélisations effectuées sur le massif des Écrins dans les Hautes-Alpes, les variations climatiques pourraient provoquer une diminution de l'ordre de 30 % de la probabilité de déclenchement des coulées de débris non chenalisées d'origine non glaciaire contre une augmentation de même amplitude pour les coulées d'origine glaciaire (Jomelli et al., 2007b). Le rapport de l'ONERC (2008) rapporte également un décalage temporel de la saisonnalité des

laves torrentielles ainsi qu'une élévation progressive de l'altitude des zones sources liée au retrait glaciaire et à la fonte progressive du pergélisol (Jomelli et al., 2004). A partir des simulations de 3 modèles climatiques, Pavlova (2013) observe une augmentation significative des températures quotidiennes moyennes pour les Alpes et une légère diminution des précipitations. Elle constate également un accroissement de la probabilité de déclenchement d'évènements torrentiels pour le milieu et la fin du XXI^{ème} Siècle.

1.3. La corrélation entre les régimes de pluies et les évènements dommageables au réseau

La relation établie entre le régime des précipitations et l'activité torrentielle dans les Alpes doit bien évidemment être étendue aux évènements avec impacts sur le réseau routier que ce soit pour les observations passées ou les prévisions futures.

Cependant, la spécificité de ces évènements soulève de nouvelles problématiques telles que le degré de corrélation entre l'intensité/durée des pluies et le nombre d'évènements dommageables par rapport aux évènements sans impact. Elle pose également la question de la fréquence des précipitations lors des évènements dommageables et par extension de leur période de retour. Des tendances peuvent éventuellement être dégagées afin de déterminer si la distribution des pluies à l'origine des évènements dommageables correspond plutôt à des précipitations rares et exceptionnelles ou au contraire à des précipitations peu intenses mais fréquentes, en particulier lors d'impacts répétés sur une même année. Enfin, un lien peut-il être établi entre la distribution des précipitations et l'intensité des dommages structurels observés sur le réseau.

2. Description des données météorologiques

2.1. Le réseau d'observations météorologiques

La majorité des données pluviométriques utilisées proviennent des stations météorologiques de *MétéoFrance* : service public en charge de la publication des données météorologiques et de l'entretien des stations de mesure en France. Les séries correspondent à des données observées non-homogénéisées, c'est-à-dire des enregistrements bruts de hauteur d'eau précipitée mesurée en millimètres par unité de temps. La précision de la mesure est de l'ordre de 0,1mm sur un pas de temps journalier.

Les conditions climatiques en zone montagneuse étant très variables, il est difficile d'obtenir des séries de données complètes, d'autant que le réseau d'observations météorologiques est assez irrégulier avec des stations de mesure très espacées (Frei et Schar, 1998). Pourtant les stations sélectionnées devaient être les plus proches possibles des bassins-versants pour assurer la fiabilité des données (Figures 35 et 36). Selon Pavlova (2013) dans les Alpes françaises cette distance doit être inférieure à 20km. Dans notre cas l'ensemble des stations se trouvent dans un périmètre inférieur à 13km.

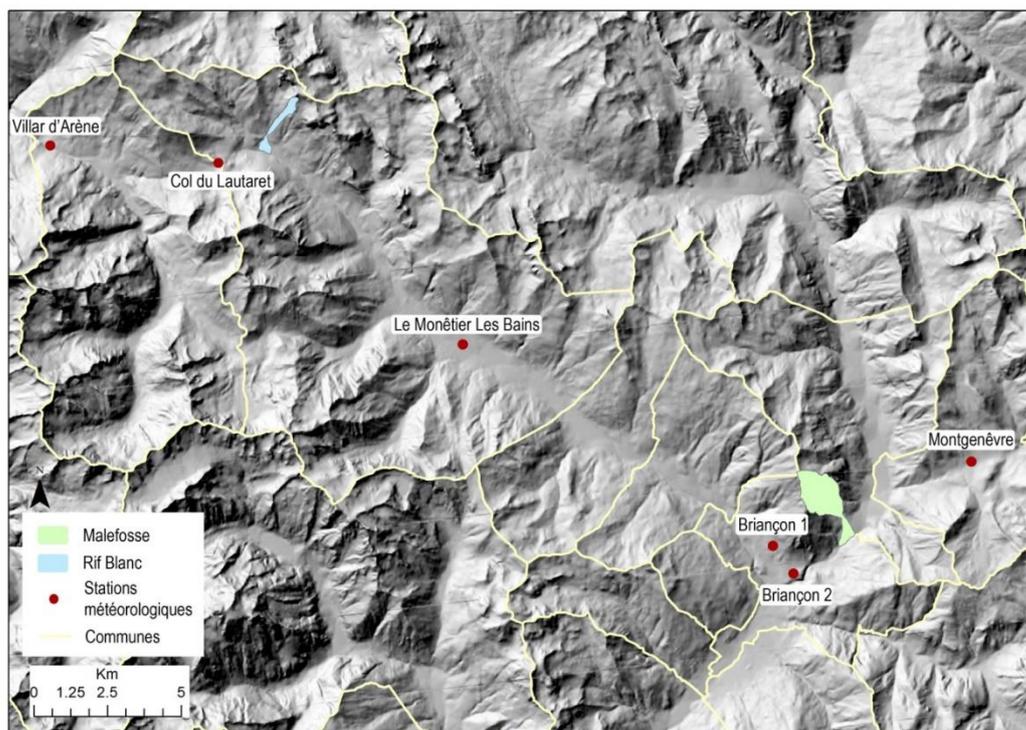


Figure 35. Localisation des stations météorologiques de référence pour les bassins-versants du Rif Blanc et de Malefosse

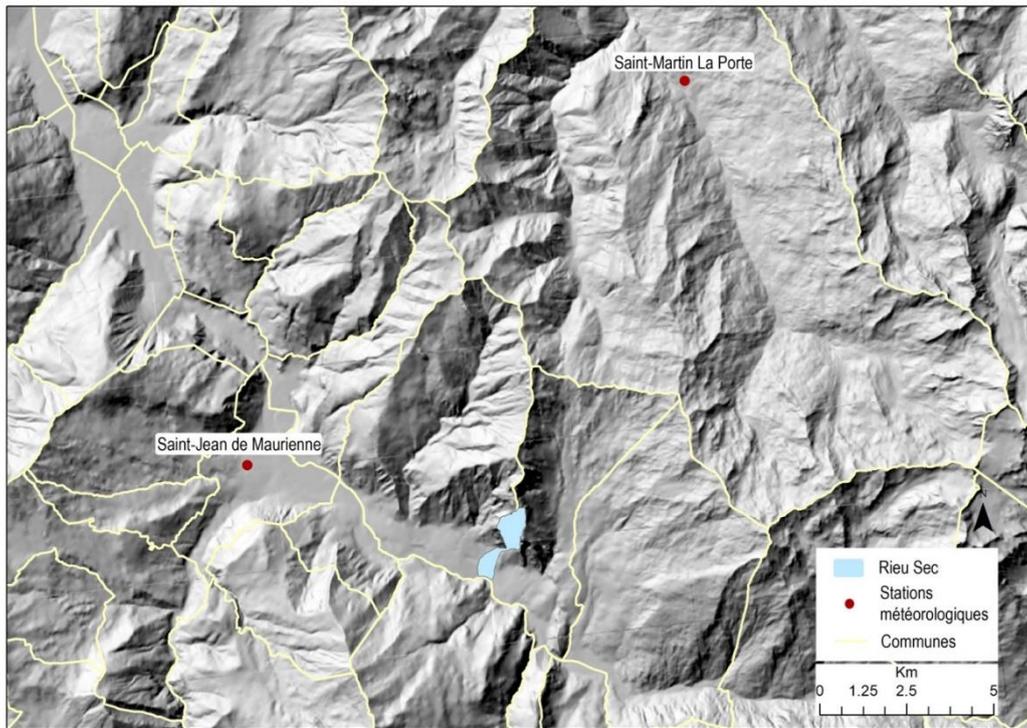


Figure 36. Localisation des stations météorologiques de référence pour le bassin-versant du Rieu Sec

Le suivi en continu des enregistrements est aussi très disparate d’une station à l’autre. Cette variabilité des données dans le temps peut s’expliquer par l’arrêt provisoire ou définitif de relevé sur une station dû à l’absence de maintenance, sa fermeture ou bien un problème technique.

En cas d’absence totale de données MétéoFrance, nous avons eu recours au réseau d’observations météorologiques d’associations françaises dont le suivi est sérieux et continu, tel que InfoClimat (créé en 2001) et ROMMA (Réseau d’Observation Météo du Massif Alpin, créé en 2007). InfoClimat met à disposition en ligne une importante banque de données historiques mais dans le cas de ROMMA, les données ont été recueillies par requête spécifique auprès de ses membres. Enfin, une mineure partie des données encore manquantes ont été obtenues à partir de la plate-forme Weather Underground (créée en 1993). Il s’agit d’une communauté de météorologues qui propose des données pluviométriques historiques et des prévisions météorologiques à partir d’un réseau international d’observations climatiques. Le recensement de l’ensemble de ces stations et la plage de données disponible est visible en Tableau 26.

Tableau 26. Recensement des stations météorologiques situées proche des bassins-versants et plage de données pluviométriques disponibles (Données observées)

Station météorologique	Département	Source Données	Période début	Période fin	Type relevé
Briançon 1 (Hôpital)	Hautes-Alpes	ROMMA	01/01/2008	31/12/2008	Quotidien
			01/05/2009	31/10/2009	
			01/04/2010	31/10/2010	
			01/04/2011	31/10/2011	
			01/04/2012	31/10/2012	
Briançon 1'1	Hautes-Alpes	InfoClimat	26/05/2010	31/05/2010	Quotidien
			30/05/2012	04/06/2012	
Briançon 2	Hautes-Alpes	MétéoFrance	01/01/1970	31/12/2005	Quotidien
Le Monêtier Les Bains	Hautes-Alpes	MétéoFrance	01/01/2006	31/12/2012	Quotidien
Col du Lautaret	Hautes-Alpes	ROMMA	01/01/2010	01/02/2013	Quotidien
			21/02/2013	17/03/2013	
			11/04/2013	22/06/2013	
			29/06/2013	24/08/2013	
			28/08/2013	27/09/2013	
Montgenèvre	Hautes-Alpes	MétéoFrance	01/01/2006	31/12/2012	Quotidien
Villar d'Arène	Hautes-Alpes	MétéoFrance	27/05/2008	01/06/2008	Horaire
			26/07/2008	28/07/2008	
			28/05/2010	31/05/2010	
			02/06/2012	04/06/2012	
Saint-Martin La Porte	Savoie	MétéoFrance	01/01/1970	30/04/2009	Quotidien
Saint-Jean de Maurienne	Savoie	Weather Underground	23/08/2009	26/08/2009	Quotidien

Les stations météorologiques enregistrent au pas de temps journalier. Seule la station de Villar d'Arène est équipée pour un enregistrement au pas de temps horaire.

2.2. Les limites des données pluviométriques

Nous avons ensuite comparé l'ensemble des enregistrements pluviométriques avec les dates des évènements torrentiels dommageables au réseau sur nos bassins-versants. Au total, la série de données observées la plus proche de nos bassins-versants couvre une période de 43 ans : de 1970 à 2013. Toutefois, les données pluviométriques présentent quelques limites :

- i. L'éloignement géographique du bassin-versant avec la station entraîne invariablement un biais entre les pluies réellement tombées sur la surface intéressée et les enregistrements. Cette différence dépend de conditions topographiques locales comme l'altitude, l'effet orographique, l'exposition des versants, etc.
- ii. La difficulté à capter des épisodes pluvieux périodiques, très localisés et violents comme les orages, pourtant décisifs dans le déclenchement des laves torrentielles.
- iii. Les inexactitudes instrumentales, due à un changement du matériel ou du mode de mesure au cours du temps par exemple (Costa et Soares, 2009).

Nous avons tenté d'améliorer la précision des données observées en utilisant le système météorologique régionalisé SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques adaptés à la Nivologie) (Durand et al., 1993 ; Pagé, 2008). Cette méthode produit un jeu de données raster à haute résolution à partir de techniques d'interpolation objectives (Pavlova, 2013). SAFRAN est un modèle spatial météorologique à l'échelle régionale de variables atmosphériques combinées avec une information topographique. Les variables topographiques en entrée sont : un découpage du massif alpin en zone bioclimatiques, la pente, l'orientation des versants, les surfaces des bassins-versants et des classes d'altitude par pallier de 300m à partir d'un MNT (résolution de 25m dans le cas présent).

Mais les données ré-analysées obtenues se sont révélées décevantes et ne permettaient pas leur exploitation. En effet, comme notre étude s'est focalisée sur 3 bassins-versants seulement, ces derniers n'étaient pas suffisants représentatifs pour en déduire une tendance, en particulier pour les quelques évènements avec impact sur le réseau. A l'échelle locale, le lissage des données ré-analysées a également fait disparaître beaucoup d'informations (Piazza et al., 2011), au point de manquer de données de pluies sur les évènements avec impacts, raison pour laquelle les analyses n'ont pas été poursuivies sur cette

voie. A titre d'exemple sur le bassin-versant de Malefosse, la perte d'informations entre les données observées et ré-analysées est de 70%.

Nous avons également tenté d'utiliser les images radar des précipitations via les supports d'InfoClimat et de Meteo60. Il s'agit d'observations en direct (puis archivées en ligne) du déplacement des masses nuageuses et des précipitations sur un territoire à l'échelle régionale. Seulement, l'enregistrement des données correspond à des estimations globales selon une échelle d'intensité en mm/heure régie par des seuils pluviométriques. Il est donc impossible d'obtenir une information précise sur la quantité de pluie tombée. Le résultat correspond à un intervalle pluviométrique (0 ; <5 ; <10 ; 10 ; 10 à 35 ; >35mm).

2.3. Fréquence et temps de retour

Fort des études précédentes, nous avons pu déterminer que le bassin-versant du Rieu Sec appartient à l'unité climatique des Alpes du Nord, en revanche les bassins-versants du Rif Blanc et de Malefosse se situent dans une zone intermédiaire entre les deux unités climatiques. Nous avons étalonné l'intervalle de temps sur le jour J -3 jours avant l'évènement torrentiel afin d'avoir plus de chance de capter l'ensemble de la période pluviométrique. L'attention a aussi été portée sur le seuil de 10mm de précipitations.

La première étape a consisté à construire un hyétogramme pour l'ensemble des évènements torrentiels de chaque bassin-versant. Cette démarche s'explique du fait que nous disposons seulement des valeurs d'intensité pluviométrique journalières et non des valeurs de durée des précipitations. Les graphiques prennent donc en compte la hauteur d'eau enregistrée le jour de l'évènement mais aussi la hauteur d'eau cumulée incluant les 3 jours précédents.

Ensuite, nous avons calculé la fréquence pour chaque évènement, c'est-à-dire le nombre d'apparition de la valeur de hauteur d'eau enregistrée le jour de l'évènement dans toute la série chronologique des précipitations journalières. Le même calcul a été reproduit en prenant en compte l'intensité pluviométrique des 3 jours avant l'évènement.

Cependant, les laves torrentielles ayant lieu majoritairement en été, le calcul de la fréquence des évènements pluviométriques ne semblait pas réaliste dans la mesure où nous disposions de la totalité des précipitations sur l'année. Il était donc plus fiable de ne conserver qu'une partie des informations pluviométriques. La période retenue pour les calculs correspond à la période d'activité des torrents, soit d'avril à octobre pour chaque année : la fréquence a été calculée sur la base de 214 jours et non 365 jours. Cette étape a permis d'éliminer les biais dans la distribution des données, telles que les pluies hivernales de longue durée.

De même, les jours comportant des données sans pluies indiqués initialement par un zéro ont été remplacés par une absence d'information. Cette démarche a permis d'éviter de créer un biais dans la distribution générée par une fréquence artificiellement trop élevée de la valeur zéro, écrasant tout le reste de la distribution. Seuls les évènements ayant enregistré un minimum de 0,1mm ont été pris en compte.

Ces calculs ont permis une représentation graphique d'intensité-fréquence des précipitations pour l'ensemble des évènements torrentiels par bassin-versant. La distribution des fréquences relatives cumulées a permis d'établir des courbes de quantiles empiriques, utiles lorsque l'on s'intéresse à un seuil déterminant. Elles permettent ainsi de situer la place de l'intensité pluviométrique d'un évènement par rapport à l'intensité pluviométrique du total de la série. En clair, elles permettent de représenter le pourcentage de la valeur de l'évènement dans la distribution des pluies.

Enfin, comme le temps de retour est l'inverse de la fréquence, nous avons ramené les valeurs de fréquence de 214jours à 365jours. Ainsi nous avons pu en déduire un temps de retour annuel pour chaque évènement pluviométrique sur nos bassins-versants.

3. Distribution statistique des précipitations

3.1. Intensité des précipitations maximales par évènement

Les graphiques présentés prennent en compte l'intensité journalière et horaire des précipitations par bassin-versant pour chaque évènement lave torrentielle avec ou sans impact sur le réseau routier associé. Les cumuls journaliers sont représentés sous la forme de hyétoigrammes et les cumuls horaires sous la forme de graphiques d'intensité-durée des précipitations.

3.1.1. Cumuls journaliers

a) Le Rif Blanc

Deux hyétoigrammes ont été réalisés sur le bassin-versant du Rif Blanc à partir des données harmonisées des stations Monêtier les Bains - Col du Lautaret (Figure 37) et un autre à partir des données de Briançon (Annexe 4). Les tendances observées sur les graphiques sont très proches malgré une légère diminution du cumul +72h (intensité pluviométrique en millimètres le Jour J + J-1 à J-3) sur celui de Briançon, probablement due à l'éloignement de la station.

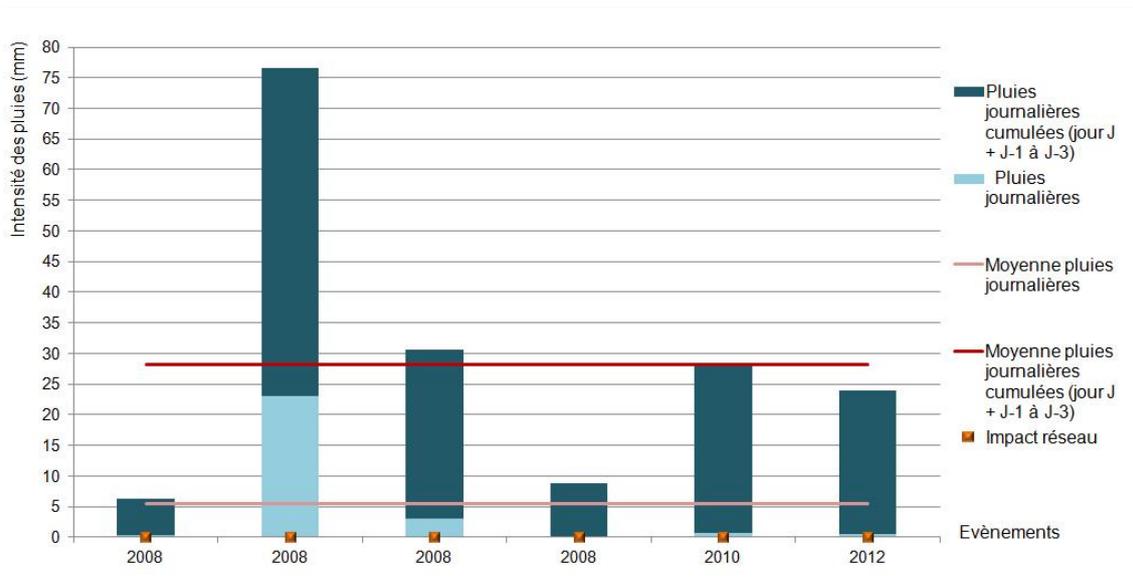


Figure 37. Intensité des pluies journalières par évènement – Rif Blanc (stations : Monêtier-Les Bains, Col du Lautaret)

Pour la majorité des évènements, le cumul +72h est déterminant pour le déclenchement des coulées dommageables et non la pluie du jour de l'évènement. Par ailleurs la moyenne des pluies journalières au jour J est largement inférieure au seuil de 10mm. En revanche, la moyenne des pluies cumulées +72h atteint presque 3 fois ce seuil avec 28mm. L'année 2008 est certes exceptionnelle en nombre d'évènements torrentiels mais aussi en termes d'intensité des précipitations, elle représente les deux extrêmes : pour le 1^{er} et le 4^{ème} évènement, le seuil nécessaire au déclenchement est inférieur à 10mm. Mais pour le 2^{ème} et le 3^{ème} évènement les valeurs d'intensité pluviométriques sont les plus fortes enregistrées avec un maximum de 77mm en 4jours. Il est très probable que la préparation des terrains a joué un rôle important dans la réponse du bassin-versant aux intempéries, en particulier aux faibles valeurs. Le 2^{ème} évènement de 2008 correspond également à l'évènement record en termes de dommages au réseau. Les valeurs pluviométriques de 2010 et 2012 sont relativement similaires, tout comme les dégâts occasionnés. Cependant, sans recul suffisant sur la période d'activité du torrent et le manque d'informations sur la représentativité des précipitations réelles mesurées sur le bassin-versant, il est hasardeux d'en tirer des conclusions.

Selon le site Pluies Extrêmes de MétéoFrance, quelques années exceptionnelles se distinguent en corrélation avec les dates des évènements torrentiels dommageables sur le Rif Blanc : le 24 mai 2008, les Hautes-Alpes ont enregistré un record de 115,3mm et le 29 mai 2008, les Hautes-Alpes ont enregistré un record pluviométrique de 200mm.

b) Malefosse

La distribution des pluies par évènement est assez disparate et non homogène, deux années avec impact sur le réseau ont enregistré très peu de pluies (Figure 38). Les valeurs moyennées sont cependant supérieures au seuil de 10mm.

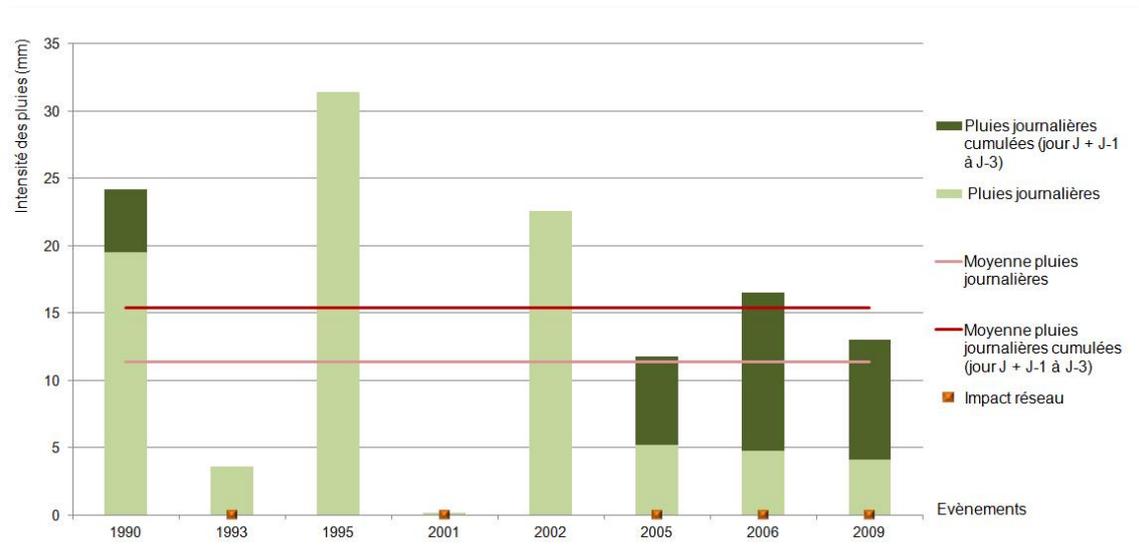


Figure 38. Intensité des pluies journalières par évènement – Malefosse (stations : Briançon, Montgenèvre)

Pour les trois évènements sans impact ce sont les pluies journalières le jour de l'évènement qui semblent déterminantes au déclenchement des coulées, les valeurs enregistrées sont 2 à 3 fois supérieures au seuil de 10mm. Contrairement aux trois derniers évènements avec impact sur le réseau où l'intensité pluviométrique cumulée est supérieure à celle du jour J. Pourtant les valeurs cumulées des évènements avec impacts restent largement inférieures à celles des évènements sans impacts. A titre d'exemple, 1995 enregistre un maximum de 31mm en 24h contre 16mm en 4jours en 2006. On observe que ce n'est pas l'intensité pluviométrique en une journée qui conditionne l'impact sur le réseau mais plutôt des pluies régulières sur plusieurs jours. Néanmoins nous restons prudents et gardons à l'esprit que les précipitations ne correspondent pas réellement à celles tombées sur le bassin-versant.

c) Le Rieu Sec

Malgré la grande quantité d'évènements, il est difficile de dégager une tendance générale dans la distribution des pluies (Figure 39). Jusqu'en 1987, l'intensité pluviométrique semble augmenter graduellement à chaque évènement puis des évènements avec des valeurs de pluies record (2000=39,6mm ; 2001=63mm ; 2006=57,3mm) se succèdent à des évènements avec très peu de pluies captées (1993=6,5mm ; 2005=1mm ; 2006=0mm)

indépendamment des impacts sur le réseau. Néanmoins les moyennes sont au-dessus du seuil de 10mm.

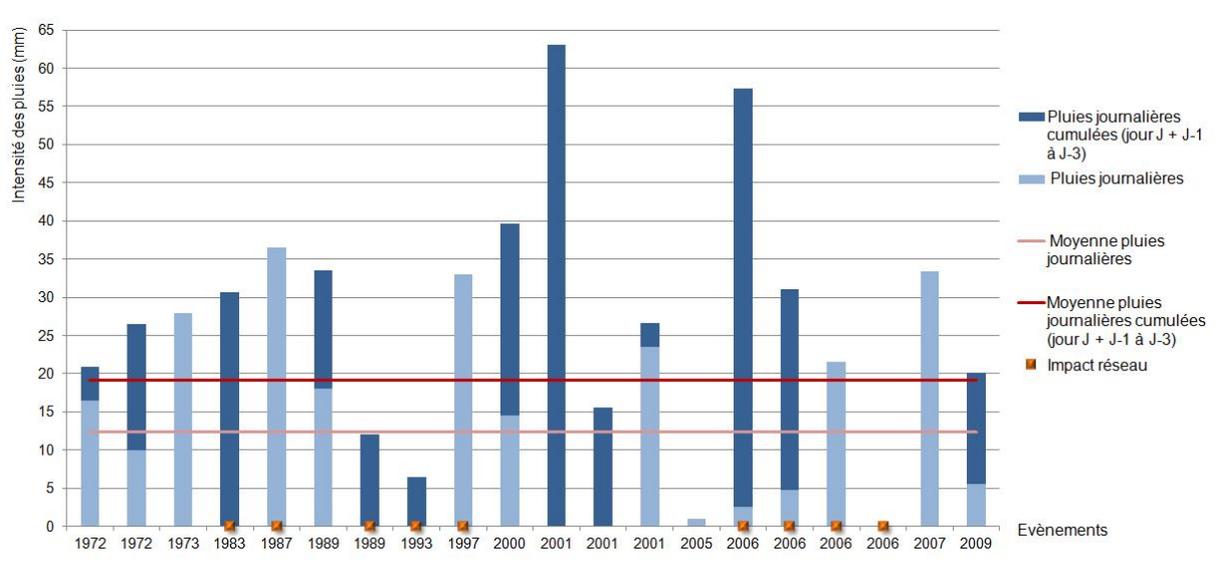


Figure 39. Intensité des pluies journalières par évènement – Rieu Sec (stations : St-Martin La Porte, St-Jean de Maurienne)

2006 représente une année exceptionnelle en termes d'évènements dommageables et en termes de précipitations. Le bassin-versant a répondu quel que soit l'intensité pluviométrique, ce qui sous-entend le rôle déterminant des conditions géomorphologiques pour le déclenchement de ces coulées. La moitié des évènements avec impact sur le réseau sont liés à des pluies intenses sur 24h, l'autre moitié à un cumul pluviométrique les jours avant l'évènement. Cependant, dans 77% des cas les évènements avec impact réseau enregistrent des pluies largement supérieures au seuil de 10mm et 44% sont supérieures à 20mm. Néanmoins, l'intensité pluviométrique n'est pas forcément liée aux évènements avec impacts. C'est particulièrement intéressant pour l'année 1993 qui enregistre seulement 6,5mm alors que l'évènement a été en mesure d'endommager l'autoroute. L'intensité des pluies est donc certes liée au déclenchement des coulées mais elle ne sous-entend pas nécessairement un impact sur le réseau.

3.1.2. Cumuls horaires

a) Le Rif Blanc

Le détail des hyétogrammes au pas de temps horaire pour chaque évènement est disponible en Annexe 5, le présent graphique représente les courbes cumulées d'intensité-durée des précipitations pour chaque évènement hormis l'évènement du 20 mai 2008 pour lequel nous n'avons pas obtenu d'informations (Figure 40). A l'image des hyétogrammes, la durée correspond au jour J additionné des trois jours précédant l'évènement soit 96h mais mai 2008 ; juillet 2008 et juin 2012 remontent à 72h en raison de l'absence de pluies au-delà.

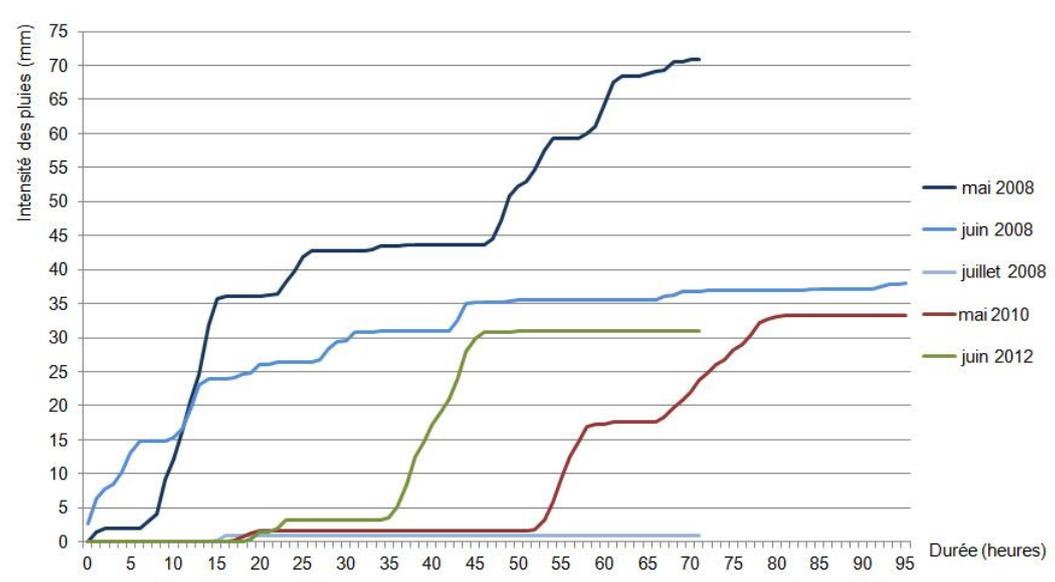


Figure 40. Intensité / durée cumulée des pluies – Rif Blanc, tous évènements

Mis à part juillet 2008 pour lequel nous n'avons presque pas d'information, chaque courbe illustre plusieurs épisodes pluvieux intenses dont la durée moyenne est assez longue puisque de 10h. Seul juin 2008 est caractérisé par des pluies plus régulières. Comme précédemment juillet 2008, mai 2010 et juin 2012 enregistrent peu ou pas de pluies le jour de l'évènement. En mai 2008 le maximum des précipitations a lieu 2 jours avant l'évènement contre 3 jours en juin.

Au total, le 29 mai 2008 il a plu 71mm pendant 40h sur 3 jours, le 1^{er} juin 2008 il a plu 38mm pendant 34h sur 4 jours, le 28 juillet 2008 il a plu au total 1mm pendant 2h sur 3 jours, le 31 mai 2010, il a plu au total 33,3mm sur 29h pendant 4 jours et le 4 juin 2012, il a plu 31mm

pendant 17h sur 3 jours. Le bassin-versant réagit donc plutôt à des pluies soutenues mais à condition qu'elles soient prolongées dans le temps.

b) Malefosse et le Rieu Sec

Un seul graphique a pu être exploitable à partir des données ré-analysées par le modèle SAFRAN pour les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec (Figure 41).

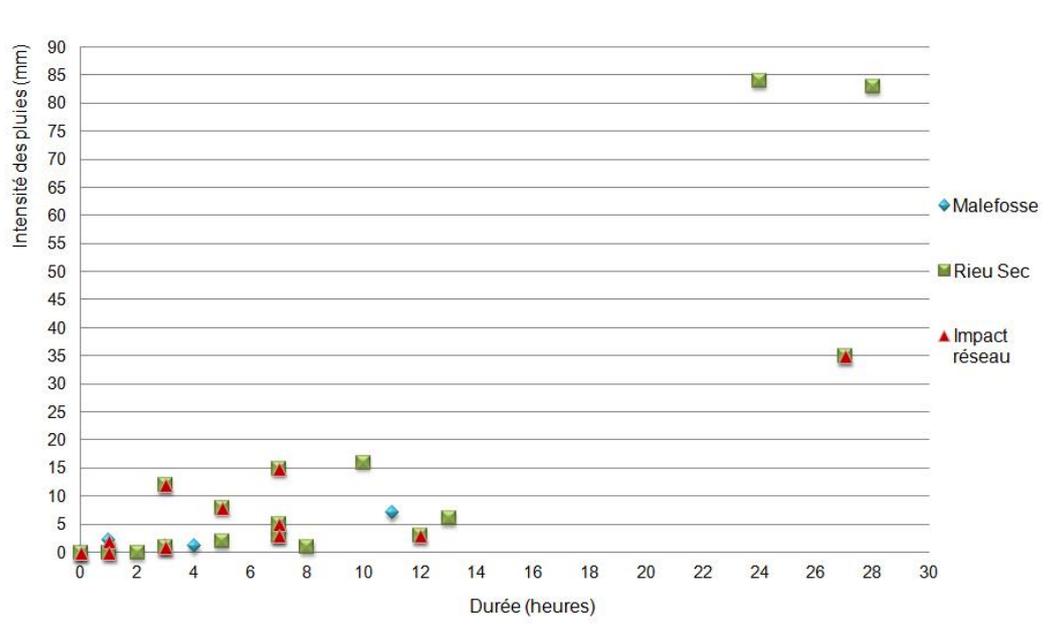


Figure 41. Intensité/durée des pluies par évènement (données ré-analysées SAFRAN)

Malgré la perte d'information sur Malefosse, 91% des évènements avec impact réseau enregistrent des valeurs d'intensité pluviométriques inférieures ou égales à 15mm et 72% sont sous le seuil de 10mm. Ce résultat reste à nuancer au regard de l'écrasement des valeurs d'intensité pluviométrique. En revanche, 82% des évènements avec impact réseau ont lieu lors de précipitations inférieures à 8h et 54% en dessous de 5h. Le Rieu Sec en particulier semble réagir très rapidement aux précipitations selon ce modèle.

3.2. Analyse fréquentielle des précipitations

Les graphiques représentent l'histogramme de distribution des fréquences des précipitations le jour de l'évènement et leur équivalent trois jours avant la date de l'évènement dommageable ou non, et ce pour chaque bassin-versant. Ils sont complétés par des graphiques de fréquence cumulée. Étant donné que certains évènements présentent peu ou pas de pluies le jour J, la date ne peut apparaître dans les graphiques. Chaque graphique suit une loi normale asymétrique de distribution des pluies. Un complément de fréquence horaire est disponible en Annexe 6.

3.2.1. Fréquence journalière

a) *Le Rif Blanc*

Sans surprise, la plupart des évènements correspondent à des pluies faibles au jour J (Figure 42). Par conséquent, les valeurs ne se détachent pas du gros de la distribution, leur fréquence est élevée au regard du total des précipitations interannuelles puisque 3 évènements se situent au-dessus de la fréquence moyenne (0,016). Seule l'année 2008 se distingue par des pluies intenses et rares dont la valeur est inférieure à la fréquence médiane (0,002) et supérieure à la moyenne des précipitations interannuelles (5,7mm).

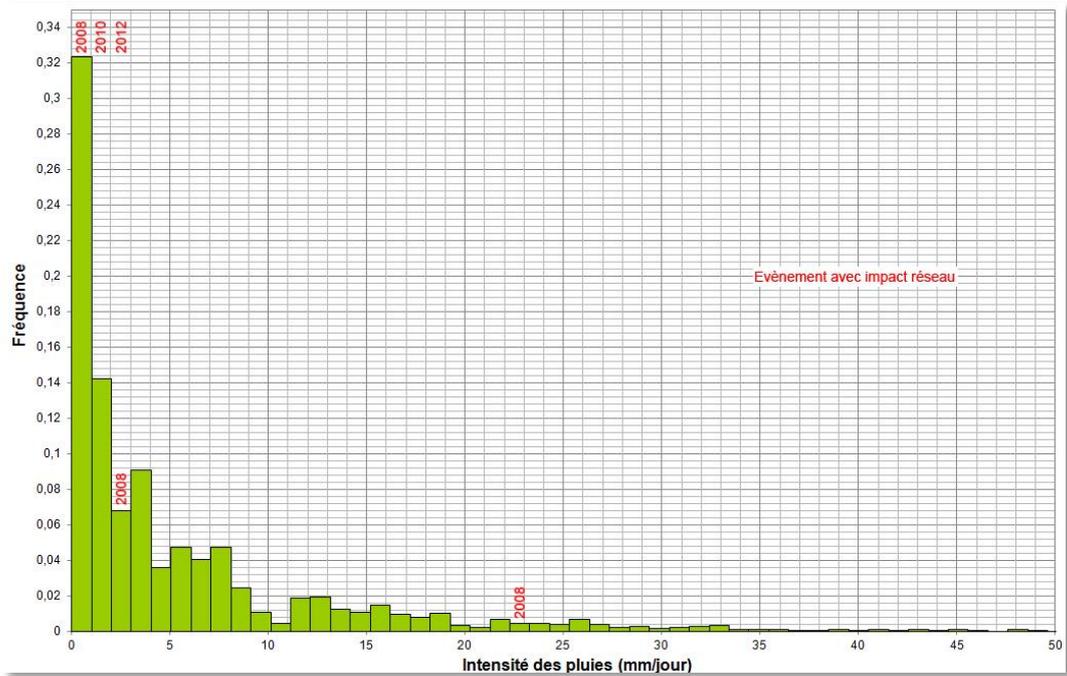


Figure 42. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Rif Blanc

En revanche, la distribution des fréquences journalières +72h est nettement différente puisque la fréquence d'apparition des pluies des évènements est beaucoup plus faible (Figure 43). Tous les évènements se situent au-dessus de la fréquence médiane (0,002) mais en dessous de la fréquence moyenne (0,012). 4 évènements dommageables sur le Rif Blanc appartiennent à des pluies intenses mais rares dont les valeurs sont supérieures à la moyenne des précipitations interannuelles (9,7mm).

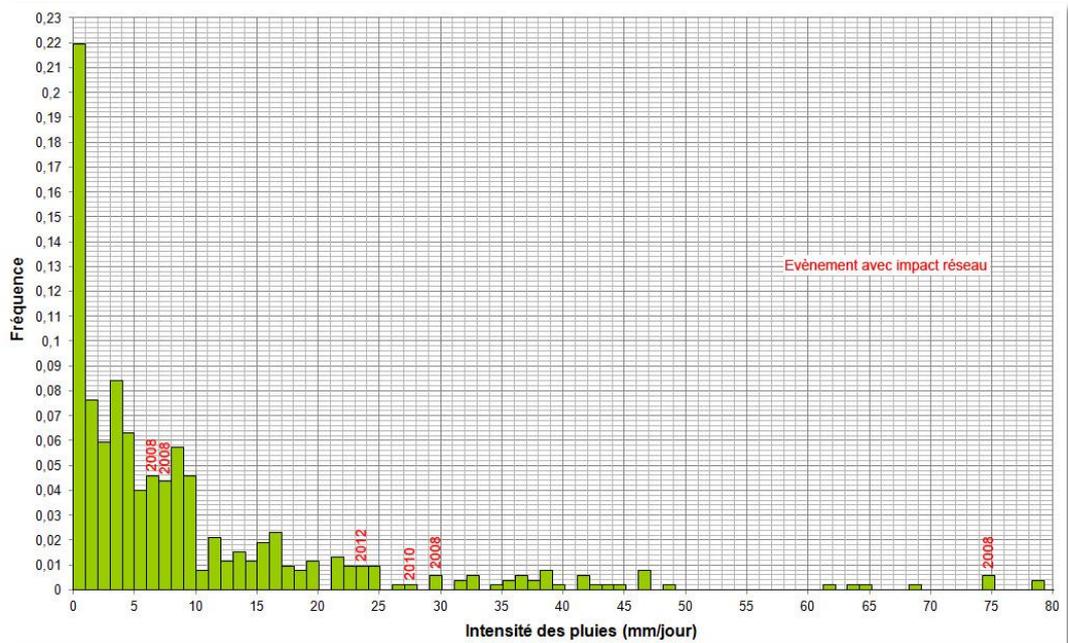


Figure 43. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc

b) Malefosse

Il est intéressant de constater que les pluies du jour de l'évènement ont une fréquence d'apparition très faible pour les évènements sans impact réseau contrairement à aux évènements dommageables dont la fréquence est nettement plus élevée et non exceptionnelles au regard de la distribution (Figure 44). Tous les évènements dommageables se situent en dessous de la valeur moyenne des précipitations interannuelles (5,7mm). En revanche, 4 évènements dommageables ont une valeur inférieure à la fréquence moyenne (0,016), mais tous sont supérieurs à la fréquence médiane (0,001).

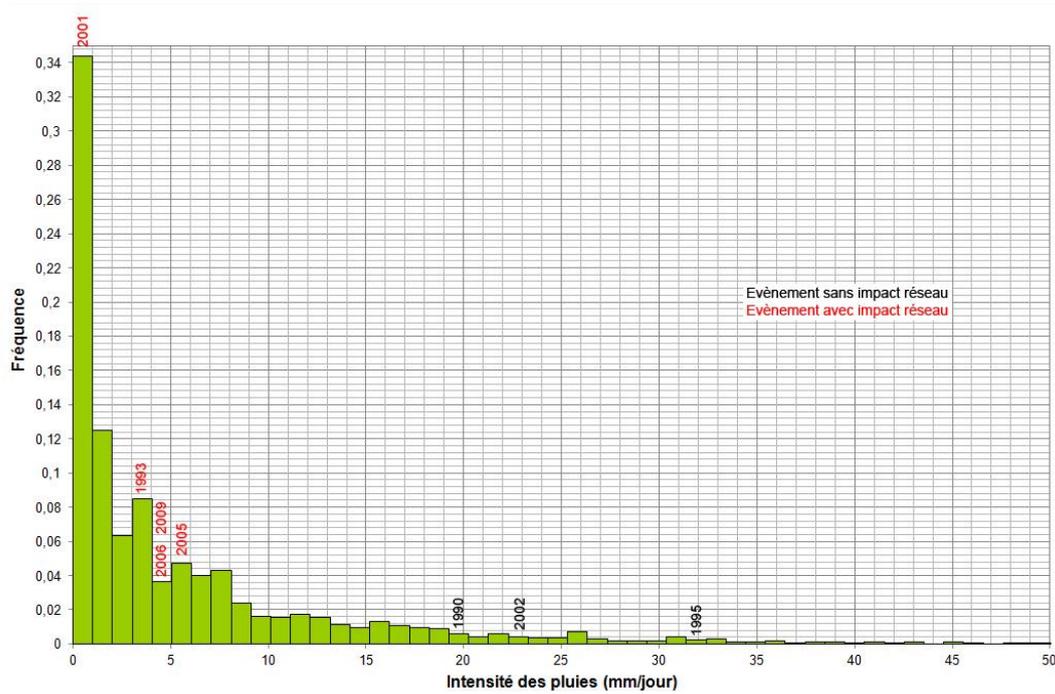


Figure 44. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Malefosse

Le constat reste le même dans la distribution des fréquences journalières +72h, les pluies des évènements sans impact réseau sont moins fréquentes que les pluies des évènements avec impact (Figure 45). Seuls deux évènements dommageables observent une intensité pluviométrique supérieure à la moyenne interannuelle (11,6mm). Tous ont des valeurs supérieures à la fréquence moyenne (0,008) et médiane (0,001). Nous restons conscients que ces résultats dépendent largement de la validité de la série de référence.

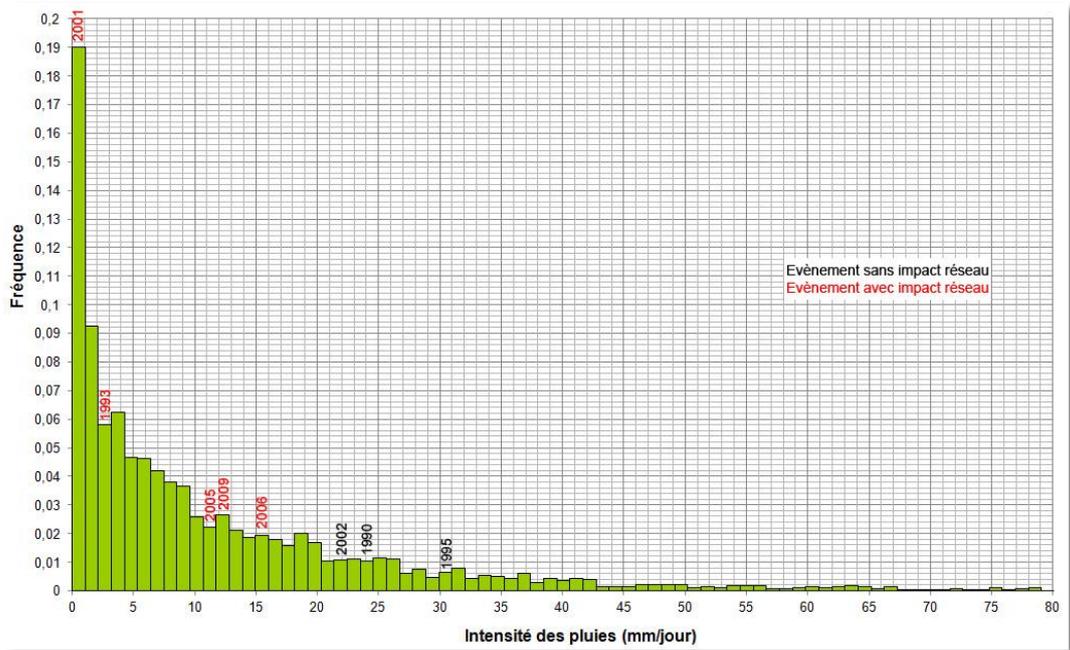


Figure 45. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Malefosse

c) Le Rieu Sec

La distribution des pluies des évènements qu'ils soient dommageables ou non est assez disparate (Figure 46). 3 évènements dommageables sur 5 ont des fréquences d'apparition faibles mais ils ne se détachent pas clairement des évènements sans impact, les valeurs sont inférieures à la fréquence moyenne (0,02). Cependant, la grande majorité des évènements observent une intensité pluviométrique supérieure à la moyenne interannuelle (7,1mm).

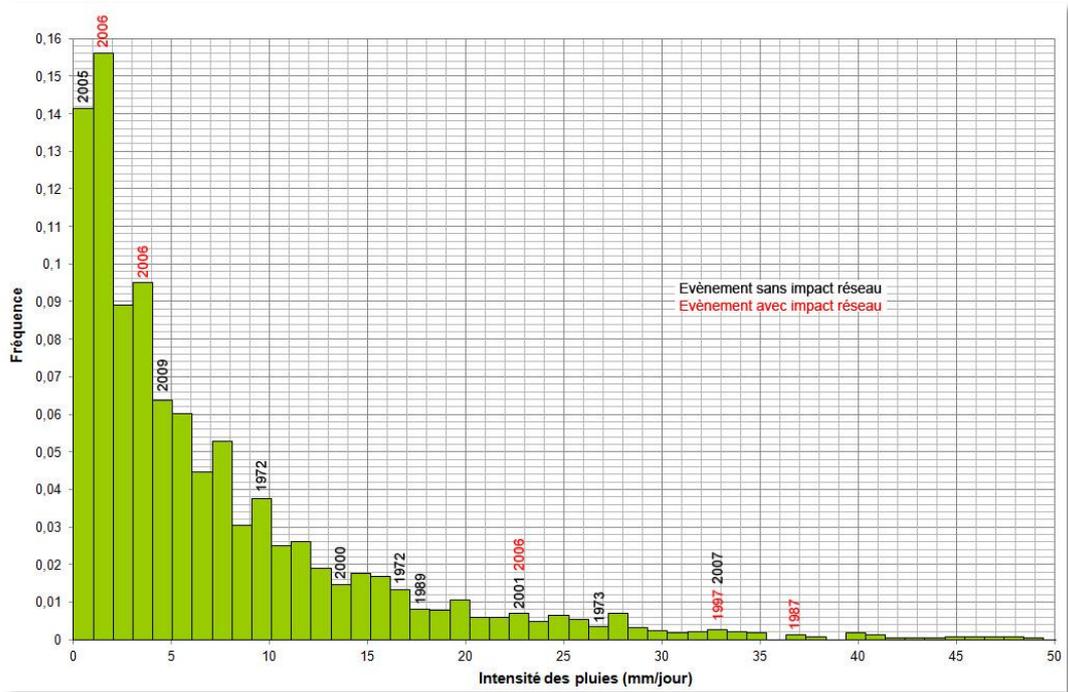


Figure 46. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Rieu Sec

Le constat est identique dans la distribution des fréquences journalières +72h (Figure 47). 84% des évènements qu'ils soient dommageables ou non ont une intensité pluviométrique supérieure à la moyenne interannuelle (13,9mm) et seuls 2 évènements dommageables sont inférieurs à la fréquence moyenne (0,007). Il ne semble pas y avoir de relation entre l'intensité des précipitations et les dégâts au réseau routier.

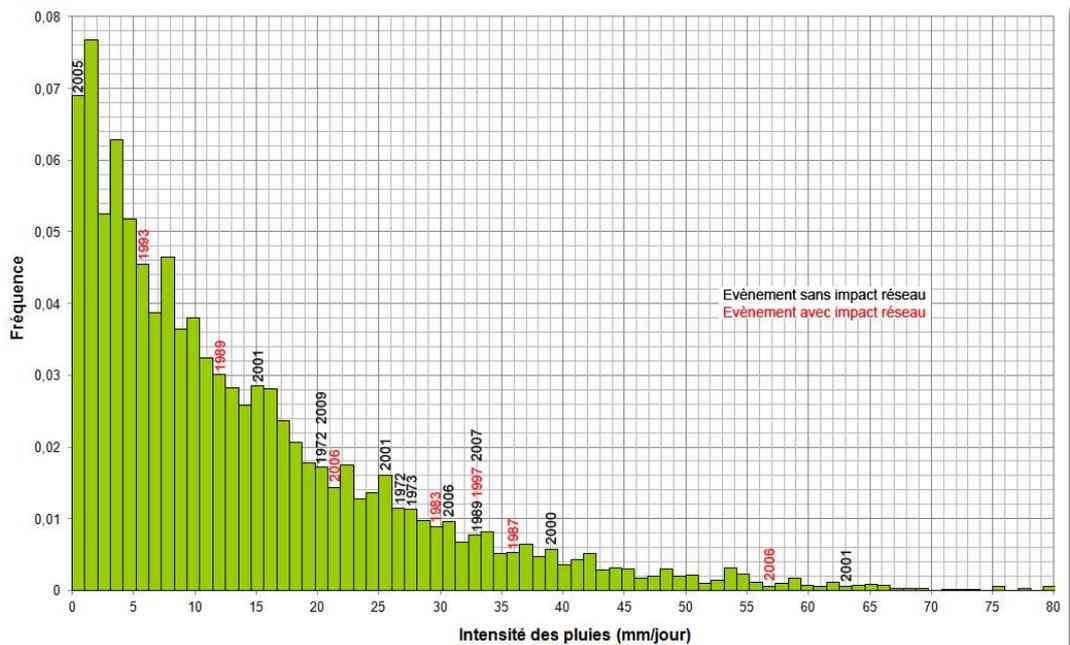


Figure 47. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec

3.2.2. Fréquence journalière cumulée et temps de retour

a) Le Rif Blanc

La courbe des fréquences cumulées le jour de chaque évènement permet de confirmer que seule l'année 2008 enregistre une valeur extrême par rapport à la normale pluviométrique (Figure 48). En effet, les pluies enregistrées le jour de l'évènement se situent dans les 5% des jours de pluies les plus importants avec un temps de retour pluviométrique plus que centennal (Tableau 27). En revanche, les pluies des évènements de 2010 et 2012 se situent dans la tranche des 70% des jours de pluies les plus importants. Le temps de retour pluviométrique pour ces évènements dommageables au réseau est donc extrêmement faible puisque inférieur à 2 ans.

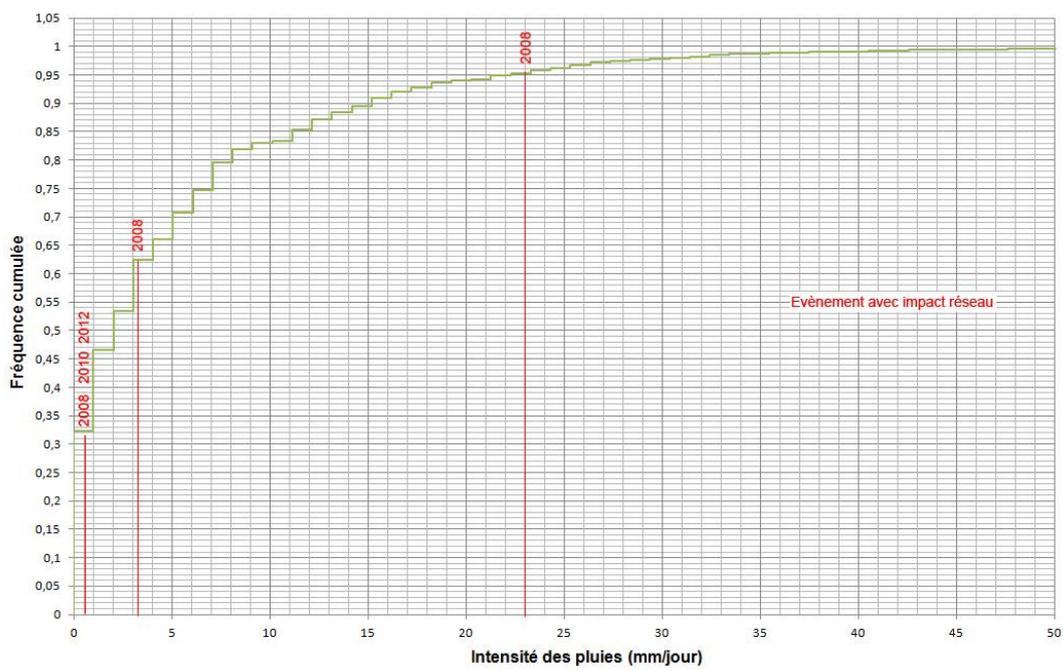


Figure 48. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (jour J) – Rif Blanc

Tableau 27. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Rif Blanc

Année	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
2008	0.206	0.351	2.8	50% Pluie évènement = 50 % des jours de pluies les plus importants
2008	0.005	0.009	111.1	95% Pluie évènement = 5% des jours de pluies les plus importants
2008	0.07	0.12	8.3	60% Pluie évènement = 40% des jours de pluies les plus importants
2008	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm
2010	0.325	0.554	1.8	30% Pluie évènement = 70% des jours de pluies les plus importants
2012	0.325	0.554	1.8	30% Pluie évènement = 70% des jours de pluies les plus importants

En revanche, les valeurs cumulées sur plusieurs jours contredisent les premiers résultats (Figure 49). Comme le total pluviométrique est très important sur cette fenêtre, les écarts entre les valeurs extrêmes sont lissés sauf pour les évènements enregistrant peu ou pas de pluies. La majorité des évènements se situent dans la classe des 10% des jours de pluie les plus importants (Tableau 28). Les valeurs de temps de retour sont très élevées et dispersées, ce qui interroge sur la pertinence des résultats d'un tel cumul. En effet, pour mettre en évidence une précipitation extrême supérieure à 30mm, 100ans d'observations sont nécessaires, l'incertitude sur ces temps de retours est donc exagérée.

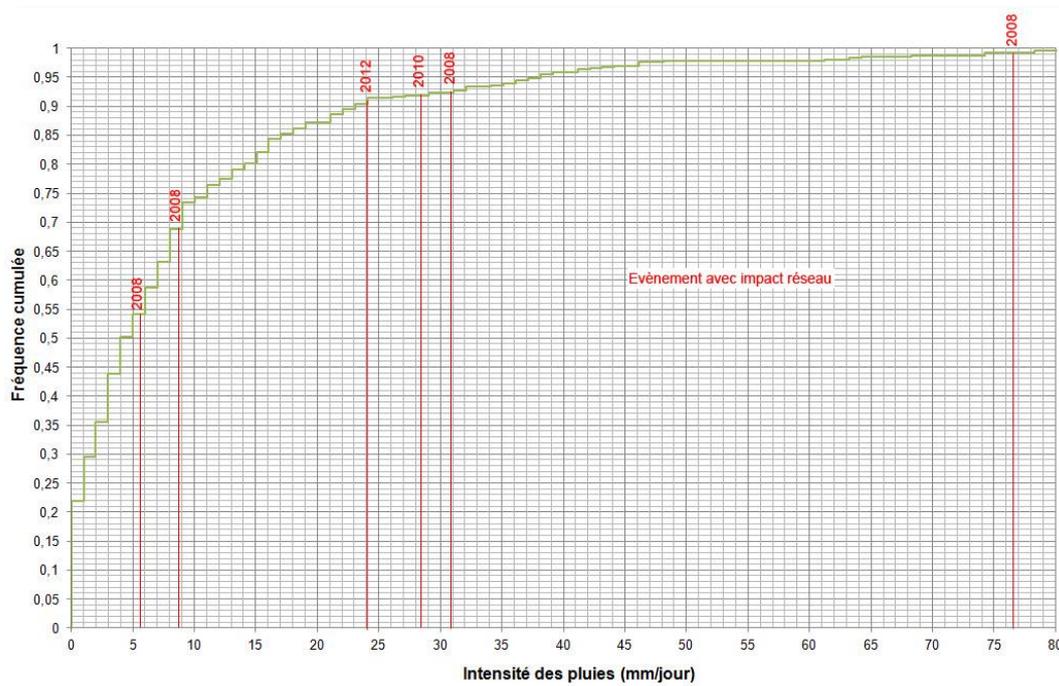


Figure 49. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc

Tableau 28. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc

Année (impact réseau)	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
2008	0.7	1,2	0.8	20 % Pluie évènement = 80% des jours de pluies les plus importants
2008	0.005	0.009	111.1	90% (99%) Pluie évènement = 10% (1%) des jours de pluies les plus importants
2008	0.005	0.009	111.1	90% (93%) Pluie évènement = 10% (7%) des jours de pluies les plus importants
2008	0.045	0.077	13	60% (69%) Pluie évènement = 40% (31%) des jours de pluies les plus importants
2010	0.002	0.003	333.3	90% (98%) Pluie évènement = 10% (8%) des jours de pluies les plus importants
2012	0.01	0.017	58.8	90% (91%) Pluie évènement = 10% (9%) des jours de pluies les plus importants

b) Malefosse

La courbe des fréquences cumulées le jour de chaque évènement permet de confirmer que les pluies enregistrées le jour des évènements dommageables ne se situent pas dans les valeurs extrêmes contrairement à celles des évènements sans impact (Figure 50). L'année

2001 est singulière puisqu'elle se positionne parmi les 70% des jours de pluies les plus importants, le temps de retour est très faible puisque inférieur à 2 ans (Tableau 29). La plupart des évènements dommageables se situent entre 30% et 40% des jours de pluies les plus importants avec un temps de retour moyen compris entre 7 et 17ans.

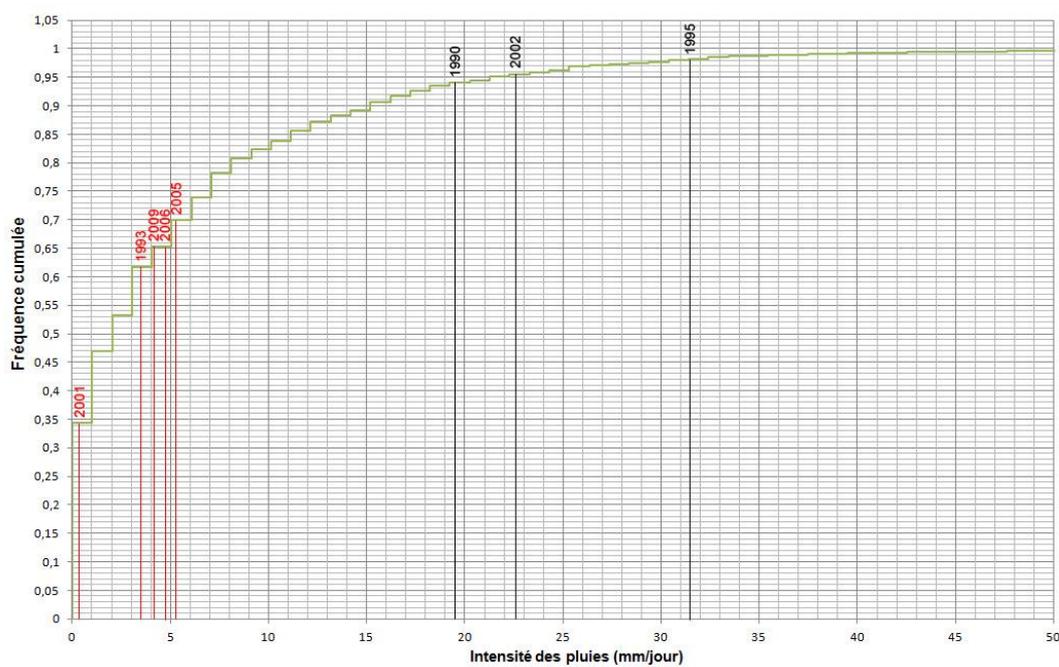


Figure 50. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement - Malefosse

Tableau 29. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Malefosse

Année (impact réseau)	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
1993	0.082	0.14	7.1	60% (62%) Pluie évènement = 40% (38%) des jours de pluies les plus importants
2001	0.342	0.58	1.7	30% (34%) Pluie évènement = 70% (66%) des jours de pluies les plus importants
2005	0.05	0.09	11.1	70% Pluie évènement = 30% des jours de pluies les plus importants
2006	0.038	0.06	16.7	60% (65%) Pluie évènement = 40% (35%) des jours de pluies les plus importants
2009	0.038	0.06	16.7	60% (65%) Pluie évènement = 40% (35%) des jours de pluies les plus importants

Les valeurs cumulées sur plusieurs jours confirment cette tendance (Figure 51) bien le cumul pluviométrique accentue les écarts. Les temps de retour des évènements dommageables les plus récents sont compris entre 23 et 33ans (Tableau 30).

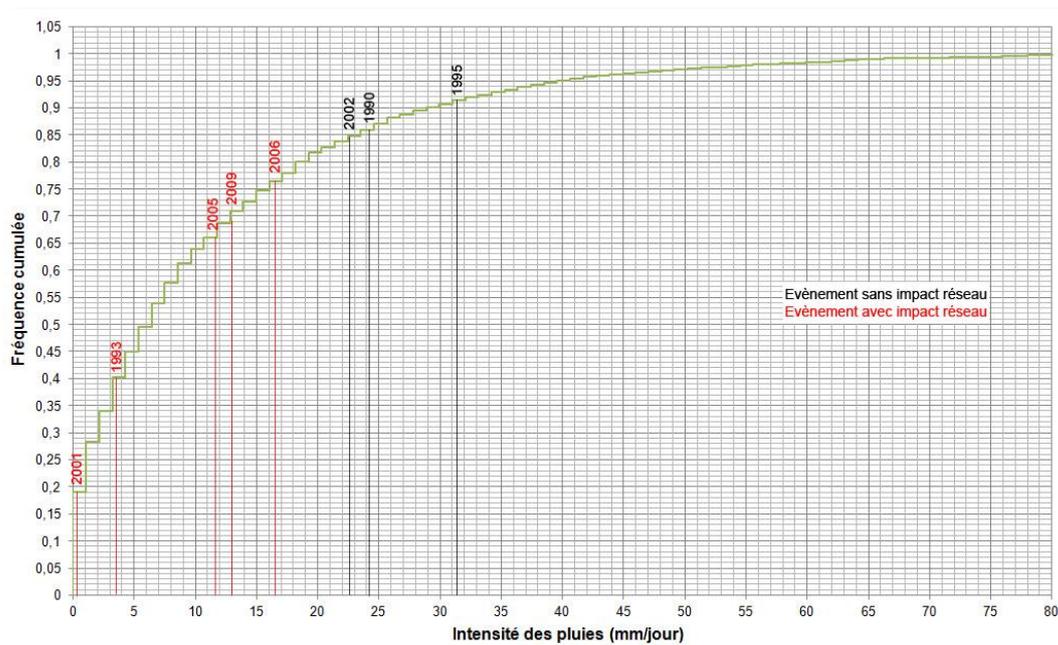


Figure 51. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) - Malefosse

Tableau 30. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Malefosse

Année (impact réseau)	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
1993	0.58	0.98	1.02	40% Pluie évènement = 60% des jours de pluies les plus importants
2001	0.19	0.32	3.13	10% (19%) Pluie évènement = 90% (81%) des jours de pluies les plus importants
2005	0.023	0.04	25	60% (66%) Pluie évènement = 40% (34%) des jours de pluies les plus importants
2006	0.02	0.03	33.3	70% (76%) Pluie évènement = 30% (24%) des jours de pluies les plus importants
2009	0.025	0.043	23.3	60% (69%) Pluie évènement = 40% (31%) des jours de pluies les plus importants

c) Le Rieu Sec

La courbe des fréquences cumulées le jour J permet de distinguer deux ensembles d'évènements dommageables contrairement à la distribution des évènements sans impact (Figure 52). 2 évènements se positionnent parmi les classes de 50% et 70% des jours de pluies les plus importants contre 3 évènements qui se positionnent parmi les 10% des jours de pluies les plus importants (Tableau 31). En conséquences les temps de retour sont très variables, 2 évènements sont inférieurs à 7ans, les autres sont centennaux ou supérieurs.

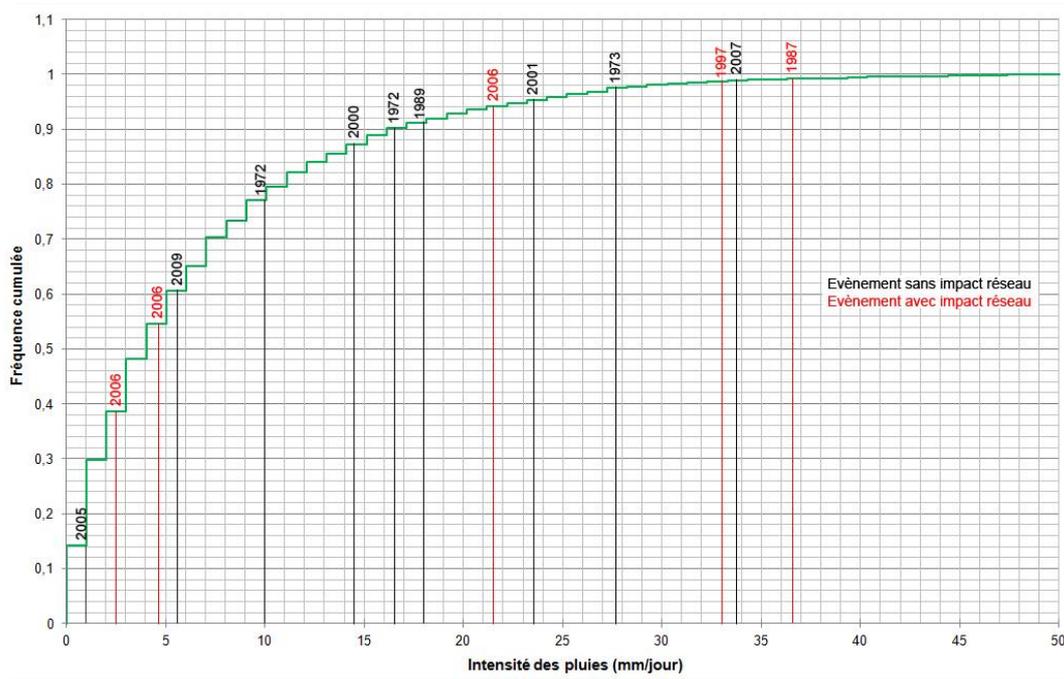


Figure 52. Fréquence cumulée des pluies par évènement – Rieu Sec

Tableau 31. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Rieu Sec

Année (impact réseau)	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
1983	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm 90% (99%)
1987	0.001	0.002	500	Pluie évènement = 10% (1%) des jours de pluies les plus importants
1989	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm 90% (98%)
1997	0.007	0.012	83.3	Pluie évènement = 10% (8%) des jours de pluies les plus importants 30% (38%)
2006	0.155	0.264	3.8	Pluie évènement = 70% (62%) des jours de pluies les plus importants 50% (55%)
2006	0.095	0.162	6.2	Pluie évènement = 50% (45%) des jours de pluies les plus importants 90% (93%)
2006	0.006	0.010	100	Pluie évènement = 10% (7%) des jours de pluies les plus importants
2006	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm

Bien que plus abondantes, les valeurs cumulées sur plusieurs jours observent la même tendance mais avec une nette augmentation des valeurs extrêmes (Figure 53). La plupart des évènements se positionnent parmi les 10% des jours de pluies les plus importants (Tableau 32). Les valeurs les plus faibles se situent entre les classes de 30% et 50% des jours de pluies les plus importants. En conséquences, les temps de retour sont relativement élevés, tous ont supérieurs à 20ans.

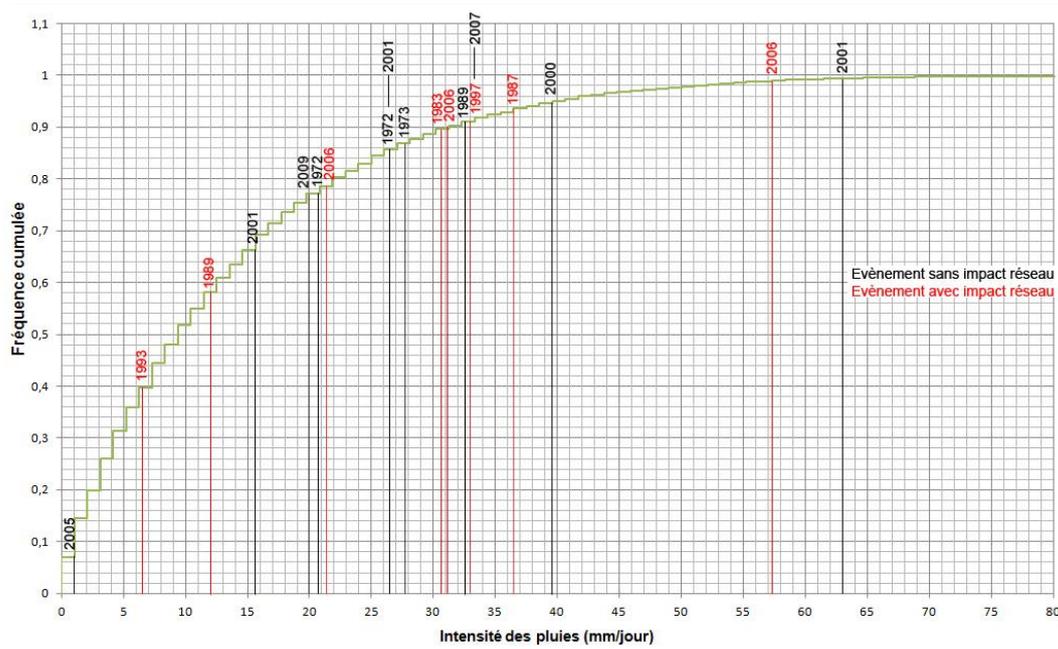


Figure 53. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec

Tableau 32. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec

Année (impact réseau)	Fréquence 214 jours	Fréquence 365 jours	Temps de retour annuel	Quantile
1983	0.009	0.015	66.6	90% Pluie évènement = 10% des jours de pluies les plus importants
1987	0.005	0.009	111.1	90% (93%) Pluie évènement = 10% (7%) des jours de pluies les plus importants
1989	0.03	0.05	20	50% (58%) Pluie évènement = 50% (42%) des jours de pluies les plus importants
1997	0.007	0.012	83.3	90% (98%) Pluie évènement = 10% (8%) des jours de pluies les plus importants
2006	0.002	0.003	333.3	90% (99%) Pluie évènement = 10% (1%) des jours de pluies les plus importants
2006	0.01	0.017	58.8	90% Pluie évènement = 10% des jours de pluies les plus importants
2006	0.015	0.026	38.5	70% (78%) Pluie évènement = 30% (22%) des jours de pluies les plus importants
2006	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm	Jour J 0mm

Synthèse et limites d'exploitation des données météorologiques

Ce travail exploratoire a permis de mettre en interaction le trio : lave torrentielle – précipitations – évènements dommageables au réseau routier, c'est un cas de figure très particulier encore peu présent dans la littérature scientifique (Keller et Atlz, 2014).

Nos résultats ont confirmé qu'en grande majorité, les évènements avec impact réseau enregistrent une intensité pluviométrique supérieure à 10mm. Si ce seuil ne peut être atteint le jour de l'évènement, il est dépassé lorsque l'on considère le cumul de pluies +72h avant cette date. Le propos reste cependant à nuancer puisqu'aucune véritable relation n'a pu être établie entre seuil pluviométrique et impact réseau. L'intensité pluviométrique n'est pas forcément synonyme d'impact sur le réseau, elle n'est pas non plus liée à l'intensité des dommages. En revanche, les pluies prolongées sur plusieurs jours semblent déterminantes pour l'endommagement du réseau routier. L'analyse fréquentielle a démontré que la plupart des pluies à l'origine des évènements ne sont pas des pluies extrêmes, à l'image du Rif Blanc dont les 2 derniers évènements dommageables ont un temps de retour pluviométrique inférieur à 2 ans. Quelques années sont toutefois exceptionnelles comme 2008 pour le Rif Blanc, 2001 pour Malefosse, 1987 et 2006 pour le Rieu Sec. L'analyse fréquentielle cumulée sur plusieurs jours ne semble pas toujours pertinente puisqu'elle tend à exagérer artificiellement les valeurs extrêmes, ce qui interroge sur la représentativité des résultats, eux-mêmes très dépendants de celle de la série de données météorologique.

Pour des investigations plus poussées, ces résultats pourraient être affinés par une analyse fréquentielle utilisant des lois d'ajustement statistique. Il est évident que la similitude entre le comportement statistique et la réalité des évènements pluviométriques peut être perturbé par les seuils définis (quantiles) ou bien par les variations locales des pluies captées, puisque les valeurs des stations météorologiques ne sont pas toujours représentatives de celles réellement perçues par le bassin-versant. De même, les précipitations ne sont pas des variables continues dans le temps, les hauteurs d'eau tombées en 24h n'ont pas de réalité physique. En effet, un même total peut intégrer 2 ou 3 averses. Seules les données horaires sur le Rif Blanc ont permis de prouver la succession d'évènements pluvieux relativement longs sur plusieurs jours à l'origine des évènements dommageables au réseau. Pour pallier au manque de représentativité à l'échelle locale, ce type de démarche pourrait être reproduit sur tous les bassins-versants avec impact réseau afin d'en dégager une tendance plus fiable et

généraliste. Cette approche pourrait être complétée par l'instrumentation des bassins-versants situés sur des tronçons routiers particulièrement vulnérables pour un suivi spécifique à plus long terme. Toutefois, si la relation existe entre l'évènement pluviométrique et le déclenchement d'une lave torrentielle, cette dernière peut simplement atteindre le réseau routier sans pour autant l'impacter. L'intensité pluviométrique n'est pas forcément liée ni à l'intensité volumique des matériaux mobilisés ni à la hauteur de la coulée capables d'obstruer un tronçon routier.

La réponse des bassins-versants étant aussi liée aux conditions géomorphologiques, les futures investigations pourraient intégrer certains paramètres de déclenchement comme la fonte nivale, la fonte du pergélisol et le stock de matériaux disponibles à la mobilisation. Dans les cas des évènements dommageables au réseau routier, l'analyse des distances d'arrêt et des hauteurs des dépôts est donc indispensable.

Chapitre 4 – La modélisation des écoulements torrentiels comme indicateur d'impact réseau

Le développement des SIG ces 20 dernières années a grandement amélioré les possibilités de modélisation numérique et favorisé de nouvelles approches pour l'évaluation de l'aléa lave torrentielle. Schématiquement, deux procédures d'analyse de l'aléa peuvent se distinguer: les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives (Guzetti et al., 1999). Une approche qualitative sous-entend en général une cartographie géomorphologique et/ou heuristique visant à articuler plusieurs couches d'informations thématiques. Cette méthode permet une certaine flexibilité et une visualisation rapide des résultats mais elle implique aussi un certain niveau de subjectivité. Les méthodes quantitatives s'orientent davantage sur une modélisation statistique et/ou géophysique, elles supposent une plus grande précision des résultats dont la lecture est cependant rendue plus complexe à interpréter.

L'objectif ici est de combiner ces deux types d'approches, en permettant une lecture efficace des impacts sur le réseau routier mais où les écoulements torrentiels sont calibrés à partir de paramètres géophysiques spécifiques à chaque bassin-versant.

1. Le choix d'un modèle numérique 2D

1.1. La diversité des modèles existants

Un modèle peut être défini comme la représentation du monde réel sous la forme d'un scénario suivant une séquence logique d'évènements prédéfinis et connus (Van Loon, 2004). Plus précisément, un modèle est une représentation simplifiée d'un objet d'étude à des fins de description, de compréhension, de prévision ou de planification (Fotheringham et Wegener, 2000). L'utilité d'un modèle repose donc sur sa capacité à schématiser la dynamique d'un processus selon des paramètres et des objectifs voulus, mais il ne peut se substituer à la réalité du phénomène naturel.

Pour pouvoir être correctement représentées, les laves torrentielles doivent être considérées comme des systèmes dynamiques tridimensionnels dans un contexte temporel complexe (Brunsdon, 1979). Sur ce sujet, la littérature offre un panel d'outils pour la

modélisation dynamique de propagation qui présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les modèles dynamiques peuvent être classés comme empiriques, analytiques et numériques. Ils sont basés sur des corrélations établies entre les paramètres d'entrée et de sortie, ils peuvent être utilisés à différentes dimensions (1D, 2D, 3D) et s'appliquer à plusieurs échelles d'analyse. Le choix d'un modèle repose donc sur un compromis entre sa faisabilité, la disponibilité des données requises et les objectifs visés.

Dai et al. (2002), Hürlimann et al. (2008), Zahra (2010) et Quan Luna (2012) proposent une revue de ces outils permettant de choisir objectivement la méthode appropriée à notre étude, résumée en Tableau 33.

La modélisation numérique 2D semblait être la méthode la plus adaptée à notre étude puisqu'elle remplit les conditions nécessaires à une cartographie de l'aléa vis-à-vis du réseau routier. La méthode devait pouvoir proposer :

- i. Des résultats qui couvrent l'ensemble de la zone d'interaction torrent/réseau routier. Dans le cas des techniques 1D, l'information est incomplète puisqu'elle ne renseigne pas l'extension spatiale des dépôts et la distance maximale de la coulée est moyennée. En revanche, l'approche 2D fournit immédiatement un résultat cartographique à l'échelle locale directement interprétable pour l'impact réseau. Le but était de connaître le seuil à partir duquel une lave torrentielle peut atteindre le tronçon routier exposé et l'emprise spatiale des matériaux sur la chaussée.
- ii. Différents volumes mobilisables peuvent être incrémentés afin de simuler différentes probabilités d'occurrence en se basant sur le principe de la relation intensité-fréquence. En sortie, nous devons connaître la hauteur des dépôts afin d'en déduire le degré de vulnérabilité physique du tronçon impacté.

Tableau 33. Différentes approches de modélisation dynamique des laves torrentielles

Méthode	Principes / Avantages	Inconvénients / Limites	Exemple de Modèle	Références
Empirique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permet d'estimer la distance d'arrêt maximale 2. Facilité d'application, utile en phase de sélection initiale 3. Méthode <i>angle reach</i> : régression multivariée basée sur des critères morphométriques et morphologiques 4. Méthode <i>mass-change</i> : estime le taux moyen des dépôts en divisant le volume de matériaux mobilisés par leur longueur 5. Les modèles incorporent les relations empiriques pour déterminer des enveloppes de dépôts par exemple 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calibré sur un grand nombre de bassins-versants sans tenir compte des spécificités locales 2. Ne tient pas compte explicitement du fonctionnement du processus en mouvement 3. Les volumes doivent être connus au départ auxquels cas ils sont ignorés 	<p>LAHARZ</p> <p>DFLOWZ</p> <p>TopFlowDF</p>	<p>Cannon, 1993</p> <p>Corominas, 1996</p> <p>Iverson et al, 1998</p> <p>Rickenmann, 1999</p> <p>Fannin et Wise, 2001</p> <p>Crosta et al, 2003</p> <p>Vallance et al, 2003</p> <p>Berti et Simoni, 2007</p> <p>Oramas Dorta et al, 2007</p> <p>Scheidl et Rickenmann, 2011</p>
Algorithme d'écoulement	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nécessite un MNT, facilité d'application 2. Modèle de direction des flux simple : l'énergie provenant d'une cellule amont est dirigée vers une des huit cellules voisine située en aval pour chaque pas de temps 3. Modèle de direction des flux multiple : plusieurs cellules voisines sont proposées dans le même pas de temps 4. Permet de mettre en évidence la trajectographie d'une lave torrentielle 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisé en tant qu'étape intermédiaire dans les configurations de modèles plus complexes 2. Ne tient pas compte explicitement du fonctionnement du processus en mouvement 	<p>D8 Algorithm</p> <p>FD8</p> <p>DEMON</p> <p>D-Infinity</p>	<p>O'Callaghan et Mark, 1984</p> <p>Quinn et al, 1991</p> <p>Costa-Cabral et Burges, 1994</p> <p>Tarboton, 1997</p> <p>Gamma, 1999</p>
Modèle analytique 1D	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calcule la dynamique de l'écoulement le long d'un profil en long présélectionné qui correspond au lit torrentiel. La masse en mouvement est résumée en un seul point 2. le déplacement de la masse est commandé par la force motrice de la gravité et les forces de résistance comme le coefficient de friction 3. Facilité d'exécution 4. Permet d'estimer les distances d'arrêt, la vitesse du flux et les phases d'accélération des matériaux en mouvement 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ne peut pas représenter l'enveloppe spatiale des dépôts ni les volumes clairement mobilisés 2. La distance d'arrêt maximale ne peut être qu'approchée puisqu'il calcule le déplacement relatif du centre de gravité de la masse en mouvement. 	<p>Sled Model</p> <p>GEO DMM</p> <p>DAN-W</p>	<p>Sassa, 1988</p> <p>Hungr, 1995</p> <p>Chen et Lee, 2003</p> <p>Chen et Lee, 2004</p> <p>Armento et al, 2008</p>

Méthode	Principes / Avantages	Inconvénients / Limites	Exemple de Modèle	Références
Modèle numérique 1D	<ol style="list-style-type: none"> Equations qui déterminent le comportement rhéologique sur un profil topographique Fournit une information sur la distance d'arrêt maximale, la profondeur de l'écoulement, la vitesse et les pressions exercées 	<ol style="list-style-type: none"> Ne peut pas représenter l'enveloppe spatiale des dépôts ni les volumes clairement mobilisés Contraintes d'application (disponibilité des données requises en entrée, complexité du fonctionnement) 	DAN	<p>Hungr, 1995</p> <p>Chen et Lee, 2004</p> <p>Savage et Hutter, 1991</p> <p>Denlinger et Iverson, 2001</p>
Modèle numérique 2D	<ol style="list-style-type: none"> Nécessite un MNT, des volumes en entrée, variables topographiques Equations qui déterminent le comportement rhéologique sur un plan Calcule la probabilité que chaque cellule soit affectée par l'écoulement Renseigne sur la trajectographie, l'extension spatiale des dépôts, la vitesse, la profondeur de l'écoulement, les pressions exercées Peut renseigner sur la hauteur des dépôts Meilleure représentation spatiale et de l'intensité du phénomène avec une visualisation des résultats sur un plan 2D (carte) voir 3D 	<ol style="list-style-type: none"> Contraintes d'application (disponibilité des données requises en entrée, complexité du fonctionnement du modèle, temps de calculs longs) Nécessite un MNT de haute résolution Nécessite la calibration des paramètres rhéologiques Utile à l'échelle locale mais trop complexe à mettre en place à l'échelle régionale 	<p>FLO-2D</p> <p>TITAN-2D</p> <p>DFEM Model</p> <p>FLATModel</p> <p>MassMov2D</p> <p>DAN-3D</p> <p>2 DAN-W</p>	<p>O'Brien et al, 1993</p> <p>Pitman et Le, 2005</p> <p>Rickenmann et al, 2006</p> <p>Medina et al, 2008</p> <p>Begueria et al, 2009</p> <p>Hungr et McDougall, 2009</p> <p>Aronica et al, 2012</p>

1.2. Principes de fonctionnement du modèle MassMov2D

1.2.1. Description du modèle

Parmi les codes numériques 2D existants, le choix s'est porté sur *MassMov2D* (Begueria et al., 2009a) conçu pour simuler les phases de propagation et d'étalement de mouvements gravitaires (glissements de terrain, laves torrentielles, lahars) guidés par la gravité sur une topographie complexe. *MassMov2D* est incrémenté dans un script *PCRaster* (<http://pcraster.geo.uu.nl>) sous forme de commandes prédéfinies. Ce langage de programmation est dit "environnemental" car sa syntaxe est conçue pour être facilement compréhensible et relativement intuitive (Gröndahl, 2008).

Disponible en Open Source, *MassMov2D* présente également l'avantage d'être relativement flexible dans son utilisation grâce à la variabilité des différentes conditions initiales et des conditions aux limites pouvant y être configurées (Mathieu, 2010). Par ailleurs, la performance de ce modèle a été testée dans plusieurs études (Gröndahl, 2008; Begueria et al., 2009b; Kuriakose et al., 2009 ; Zahra, 2010 ; Quan Luna, 2012). Ici, le modèle a servi à reproduire l'extension spatiale et l'épaisseur des dépôts sur la route.

Ce modèle numérique bidimensionnel considère la masse glissée comme un fluide monophasique (l'eau et les particules solides sont un mélange homogène) dont le comportement est contrôlé par la rhéologie (Savage et Hutter, 1989). Le modèle repose sur deux équations constitutives (variables de conservation de la masse et de la vitesse) auxquelles des équations numériques secondaires permettent de simuler différentes rhéologies. Ces dernières correspondent à la dynamique de l'écoulement sous l'effet de contraintes et de déformations qui lui sont appliquées. L'ensemble de ces équations conditionne l'écoulement du fluide sur une topographie représentée par un modèle numérique de terrain (MNT) qui définit aussi le domaine spatial de simulation. Les résultats sont directement interprétables sous la forme de cartes dans un environnement SIG.

1.2.2. Les conditions initiales et les paramètres d'entrée du modèle

Quatre lois rhéologiques associées aux différents paramètres physiques sont incrémentées par défaut dans le modèle pour simuler différents comportements d'écoulement, allant du plus granulaire au plus visqueux :

- i. *Pure Frictionnal* et *Voellmy Frictional* sont utilisées préférentiellement pour des matériaux granulaires ayant un comportement turbulent (Mangeney et al., 2005).
- ii. *Coulomb Viscous* s'applique à une large gamme d'écoulements. Elle intègre notamment une composante frictionnelle liée au frottement de la masse glissée contre la surface sur laquelle elle s'écoule.
- iii. *Bingham Viscous* est surtout utilisée pour un matériel constitué d'au moins 20% de particules fines (argiles et limons) permettant de lubrifier le contact entre les grains (Remaître, 2006 ; Gröndhal, 2008). La masse est alors considérée comme viscoplastique et nécessite un seuil au-delà duquel l'écoulement a lieu selon la valeur de contrainte appliquée (Begueria et al., 2009a).

A partir de ces lois rhéologiques, la masse en mouvement est définie en fonction des paramètres suivants (Tableau 34) :

- i. La densité de l'écoulement (kg.m^{-3}).
- ii. Le seuil d'écoulement (Pa), utilisé surtout pour les écoulements visqueux.
- iii. La viscosité dynamique (Pa.s) ou degré de cohésion de la masse, la valeur dépend de la vitesse d'écoulement dans la matière pour les rhéologies visqueuses.
- iv. L'angle de friction basal ($^{\circ}$), important pour la loi de Coulomb. Sa valeur dépend de la nature de la surface en contact avec la masse glissée, comme sa rugosité.
- v. L'angle de friction interne ($^{\circ}$), sa valeur dépend de la nature des grains au sein de la matrice boueuse.
- vi. Le taux de fluidité du matériau en mouvement (m.s) définit la vitesse de transition entre l'état solide et liquide de la masse glissée.
- vii. Le nombre d'itérations, c'est-à-dire le nombre d'étapes nécessaires au modèle pour répéter le processus, 1 itération = 1 seconde (nommée *timestep* dans le modèle). Chaque itération est réutilisée comme étape initiale pour la suivante, et ainsi de suite

jusqu'à la fin de la simulation. La carte finale correspond donc à la dernière itération, un exemple est disponible en Annexe 7.

Tableau 34. Paramètres rhéologiques utilisés pour le modèle MassMov 2D (source : notice explicative du modèle)

Parameter	Description
rheology	Define the rheological law. 1 : pure frictional / Voellmy frictional 2 : Bingham viscous / Coulomb viscous
density	Density of the flow (kg.m ⁻³)
yield stress	Apparent yield stress (Pa). For viscous flow
viscosity/Chèzy	Chèzy roughness coefficient (m.s ⁻²), for Voellmy rheology Dynamic viscosity (Pa.s), for viscous rheologies.
basal friction angle	Angle of friction between the flow and the base (°). For both frictional and Coulomb viscous rheologies.
internal friction angle	Angle of internal friction (°)
fluid rate	Upward velocity of transition from solid to fluid of the sliding mass (m.s ⁻¹).
timesteps	Number of time steps of the simulation (s)

En raison de la difficulté d'obtention de l'ensemble de ces paramètres, le modèle est conçu pour pouvoir utiliser ces lois rhéologiques comme telles. Néanmoins, il est possible d'ajuster plus finement les valeurs de ces paramètres physiques, en se basant sur des analyses granulométriques d'évènements passés par exemple (Zahra, 2010). Nous avons donc effectué un travail de synthèse bibliographique et d'observations de terrain en amont afin de rester dans une fourchette de valeurs raisonnables et réalistes propre à la dynamique d'écoulement de chaque torrent.

Outre les paramètres rhéologiques, le modèle nécessite également l'utilisation de plusieurs cartes en entrée afin de calibrer les simulations. Un jeu de carte explicatif est proposé par défaut dans la notice du modèle et illustré en Annexe 8, elles sont basées sur le glissement de Turnoff Creek en Colombie Britannique (Geertsema et al., 2006). Pour chacun de nos torrents, les cartes à renseigner au format raster sont :

- i. *DEM map* : la topographie du bassin-versant issue d'un MNT (m) à haute résolution. En effet, ce dernier doit être en mesure de refléter correctement la topographie de la zone d'écoulement. De sa précision dépend la qualité des résultats, il s'agit d'un compromis entre la qualité de la résolution spatiale et le temps de calcul requis pour la simulation. Le MNT doit correctement représenter la direction des flux, les chenaux d'écoulement préférentiels et les ouvrages routiers si nécessaire.
- ii. *Soil map* : l'épaisseur initiale de la masse à faire glisser (m). A partir du nombre de pixels renseignés et de l'épaisseur attribuée à chacun, on en déduit les volumes mobilisables pour l'écoulement. Cette carte doit localiser précisément les zones de contribution sur le bassin-versant.
- iii. *Distance map* : la distance depuis le pied de la masse glissée (m). La zone d'initiation est alors considérée comme un point à partir duquel la masse va se fluidifier.
- iv. *Boundary map* : les limites du domaine de simulation, ouvert (*true*) ou fermé (*false*) : ouvert le flux sort du domaine de simulation c'est-à-dire en dehors du MNT, fermé le flux est stoppé aux limites du domaine de simulation. Il est donc impératif de déterminer précisément le volume à faire glisser et le nombre d'itérations pour éviter de biaiser les résultats : une partie de l'écoulement pourrait ne pas être représenté (en système ouvert) ou bien s'accumuler aux limites du domaine de simulation (en système fermé).
- v. *Point map* : une carte de points le long du chenal d'écoulement permettant de mesurer ponctuellement les variables de sortie du modèle (hauteur et vitesse). Dans notre étude, ces points peuvent être placés au niveau des ponts routiers.

Pour l'utilisation de ce type de modèle numérique, il est important de considérer l'absence de données de pluies dans les paramètres d'entrée. Cette absence s'explique selon le principe suivant : ce type de modèle considère que le seuil pluviométrique nécessaire pour mettre la masse en mouvement est déjà franchi. Le modèle ne s'intéresse pas aux conditions initiales de déclenchement de l'évènement mais aux étapes qui suivent ce déclenchement, c'est-à-dire au mode d'écoulement du flux en lui-même.

1.2.3. Les formats de sortie du modèle

Les données calculées au cours de la simulation, disponibles sous-forme de cartes en sortie du modèle sont :

- i. Une carte finale (issue de la dernière itération) des hauteurs des dépôts (m) et de leur étalement.
- ii. Une carte finale (issue de la dernière itération) qui présente les vitesses de l'écoulement (m.s).
- iii. Des cartes intermédiaires (issues de chaque itération) des hauteurs, de l'étalement et des vitesses à chaque étape de l'écoulement. Compilées à la suite, ces cartes permettent de visualiser la totalité de la simulation de manière dynamique sous la forme d'une vidéo.

Ces cartes peuvent ensuite être transférées sous SIG (*Arcgis Map* en l'occurrence) à partir d'un jeu de caractères au format *ASCII*, où elles sont superposées avec des orthophotoplans, un fond topographique ou bien un MNT afin de mieux visualiser les résultats et finaliser la mise en forme des cartes.

En cas de création d'une carte de points en entrée du modèle, des valeurs de hauteur et de vitesse sont mesurées sur ces points pour chaque itération. Ces données peuvent ensuite être regroupées au sein d'un profil graphique.

2. Constitution des bases de données

2.1. Le domaine de simulation

Un MNT de chaque bassin-versant délimite le domaine de simulation et sert de support topographique aux équations d'écoulement du modèle *MassMov2D*. Mais faute de données disponibles adéquates, nous avons dû recréer un MNT à haute résolution pour le torrent du Rif Blanc et adapter les MNT existants pour ceux de Malefosse et du Rieu Sec.

2.1.1. Création du MNT sur le Rif Blanc

Le MNT utilisé pour le bassin-versant du Rif Blanc a été créé avec l'appui de Clément Virmoux, géophysicien (LGP) selon la technique *Structure From Motion* (SFM), méthode dérivée de la photogrammétrie. Cette technique était une alternative efficace vis à vis des levés topographiques obtenus par des scans laser terrestres difficiles à mettre en place sur le terrain très accidenté du Rif Blanc et vis à vis des scans laser aériens (type LIDAR) trop onéreux par rapport aux résultats attendus. La technique SFM permet de générer un modèle altimétrique numérique à haute-résolution à partir d'un jeu de photographies de la zone visée. Elle utilise comme donnée d'entrée des photographies aériennes ayant un taux de recouvrement important entre les images et différents angles de vue sur la zone à numériser (Westoby et al., 2012).

Nous avons utilisé huit images aériennes issues de la campagne 2008 de l'IGN pour cette reconstruction. A défaut de points de contrôle au sol, le processus de géoréférencement a été réalisé à partir de cartes topographiques. Ensuite, nous avons utilisé le logiciel *VisualSFM* (Wu, 2011) qui intègre plusieurs outils et algorithmes pour effectuer une reconstruction complète 3D. La première étape consistait à détecter les points-clés (les repères) dans chaque image, puis à identifier les éléments similaires entre les différentes images numériques à partir de l'algorithme *SIFT* (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 1999, 2004) (Figure 54).

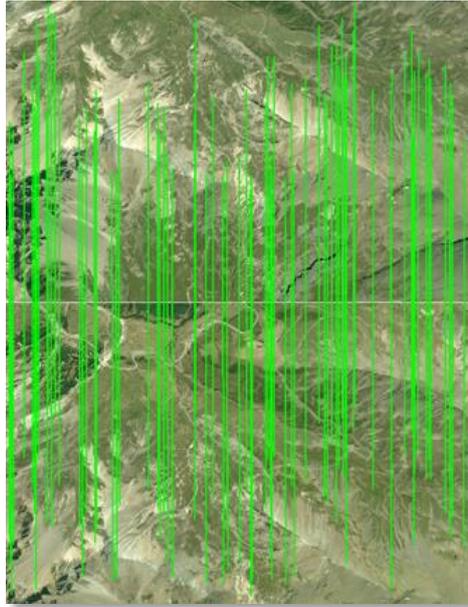


Figure 54. Points de correspondance entre les photographies aériennes, algorithme SIFT - capture d'écran VisualSFM

A partir de ces correspondances, l'algorithme *Multicore Bundle Adjustment* a permis de retrouver la position et l'orientation de l'appareil photo (donc de l'avion) (Wu et al., 2011 ; Wu, 2013). Sur la base de cette géométrie, une triangulation 3D a été appliquée pour créer un nuage de points clairsemés (Figure 55).



Figure 55. Triangulation 3D des photographies aériennes et création du nuage de points – capture d'écran VisualSFM

L'étape suivante consistait à densifier le nuage de points en utilisant les algorithmes *CMVS* (Clustering View for Multi-View Stereo) et *PMV* (Patch Base Multi-View Stereo) (Furukawa et Ponce, 2007 ; Fukurama et al., 2010). La reconstruction complète a été obtenue grâce au logiciel de reconstruction multi-vue *CMPMVS* (Jancosek et Pajdla, 2011) (Figure 56). Le logiciel a également corrigé les artefacts comme les surfaces transparentes, réfléchissantes ou faiblement texturées.



Figure 56. Reconstruction complète du modèle numérique d'élévation du versant nord-est de la vallée de la Guisane, incluant le bassin-versant du Rif Blanc – Capture d'écran *CMPMVS*

En sortie nous avons obtenu une maille 3D texturée transférée ensuite dans un environnement SIG (*Arcgis Map*) pour y générer un modèle numérique d'élévation et détourner les limites du bassin-versant du Rif Blanc. Le MNE obtenu peut être interprété comme un MNT en l'absence de couverture végétale arborée sur le Rif Blanc. Le MNT final d'une résolution de 1 mètre est un compromis entre la précision des résultats et des temps de calculs acceptables pour *MassMov2D*. Malgré la haute résolution obtenue, elle restait insuffisante pour visualiser correctement l'ouvrage hydraulique construit au-dessus du tunnel de la départementale 1091 à l'apex du torrent. La dernière étape consistait à creuser artificiellement le chenal dans le but de mettre en évidence l'ouvrage sur le MNT à partir de dimensions réelles mesurées sur le terrain (Figure 57). Cette étape était essentielle pour une meilleure représentation de l'écoulement au cours des simulations.

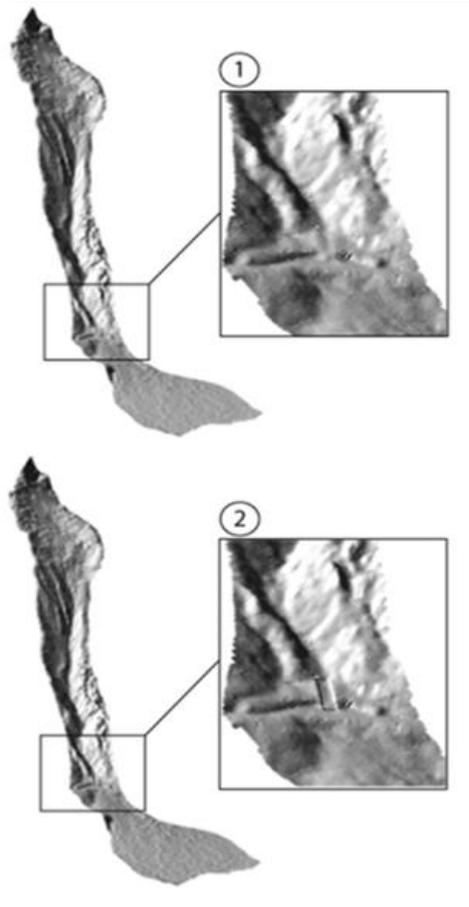


Figure 57. 1. MNT original du Rif Blanc avant creusement du chenal au niveau de l'ouvrage-réseau, 2. MNT après correction avec surcreusement du chenal au-dessus du tunnel routier de la D1091

2.1.2. Correction des MNT sur Malefosse et le Rieu Sec

Pour les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec, nous avons travaillé à partir de la *BDAIti* de l'IGN à 25m de résolution, faute de couverture photographique existante. A l'échelle locale cette résolution était insuffisante, nous avons donc opéré un post-traitement visant à affiner le MNT à 10m de résolution, au-delà la qualité serait trop dégradée.

Seulement, cette résolution bien qu'améliorée restait discutable pour visualiser correctement les chenaux empruntés par les laves torrentielles. Les premiers essais de simulation ont révélé un problème de non-écoulement du flux en raison d'un lissage excessif du réseau hydrographique. La carte de direction des flux calculée à partir du MNT sous *PCRaster*, a montré la mauvaise connexion entre les différents segments du réseau hydrographique, en particulier sur Malefosse (Figure 58). Le modèle *MassMov2D* ayant besoin

d'un maillage contigu, il ne pouvait pas interpréter ce dernier et stoppait l'écoulement avant la fin de la simulation.

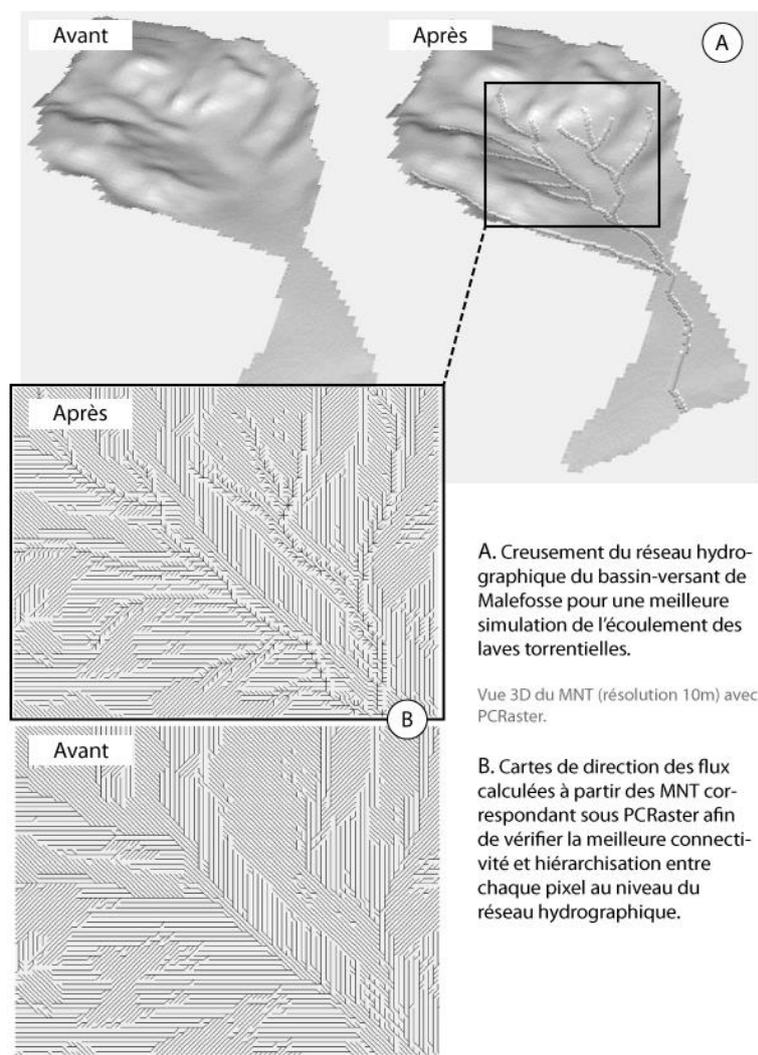


Figure 58. MNT de base et creusé et la carte des flux associée pour le bassin-versant de Malefosse

Pour résoudre le problème de la mauvaise représentation du réseau hydrographique, nous avons effectué un levé topographique des chenaux principaux sur le terrain. Digitalisés sous forme de polygones puis convertis en raster, nous avons superposé le raster obtenu avec le MNT afin de creuser les chenaux. La carte des flux a ensuite permis de vérifier la bonne continuité du réseau (Figure 58).

Cette étape s'est avérée indispensable pour le bon fonctionnement du modèle et permettre un écoulement réaliste depuis les zones sources.

2.2. Positionnement des zones de contribution et finalisation des cartes en entrée du modèle

Sur le Rif Blanc, les zones de contribution ont été identifiées à partir d'observations de terrain effectuées en 2012, des orthophoplans de l'IGN et des images du Conseil Général après les évènements de 2008. La principale source de matériaux mobilisables se situe en tête du chenal principal au niveau d'un tablier d'éboulis à 2 400m d'altitude, les secondes sont localisées plus en aval le long du chenal d'écoulement. Ces matériaux en transit sont issus de l'érosion directe le long du lit torrentiel mais aussi de glissements de terrain dont les altitudes sont comprises entre 2 200m et 2 050m. Après plusieurs tests, ce sont ces zones qui ont été retenues pour délimiter les surfaces initiales à faire glisser pour les simulations (Figure 59-B). Ces zones ont également permis de générer la carte des distances (Figure 59-C). Enfin nous avons choisi un système fermé pour toutes nos simulations (Figure 59-D).

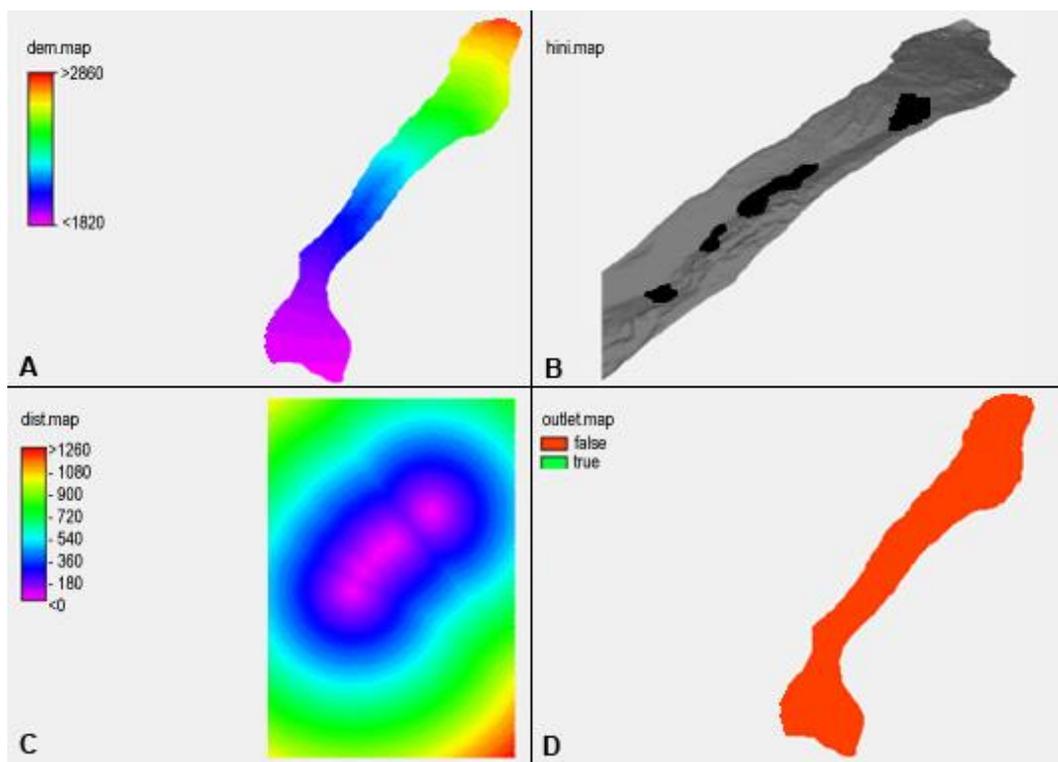


Figure 59. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant du Rif Blanc – capture d'écran PCRaster A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map

Les observations de terrain effectuées sur le torrent de Malefosse en 2011 ont démontré que la majorité des matériaux mobilisables se trouvent en transit dans les chenaux à une altitude de 1 700m environ et non en tête du bassin de réception. Raison pour laquelle nous avons choisi d’y positionner les zones sources pour les simulations (Figure 60-B). Comme précédemment, la sélection des zones sources a permis de générer la carte des distances (Figure 60-C) et le système fermé est sélectionné pour l’ensemble des simulations (Figure 60-D).

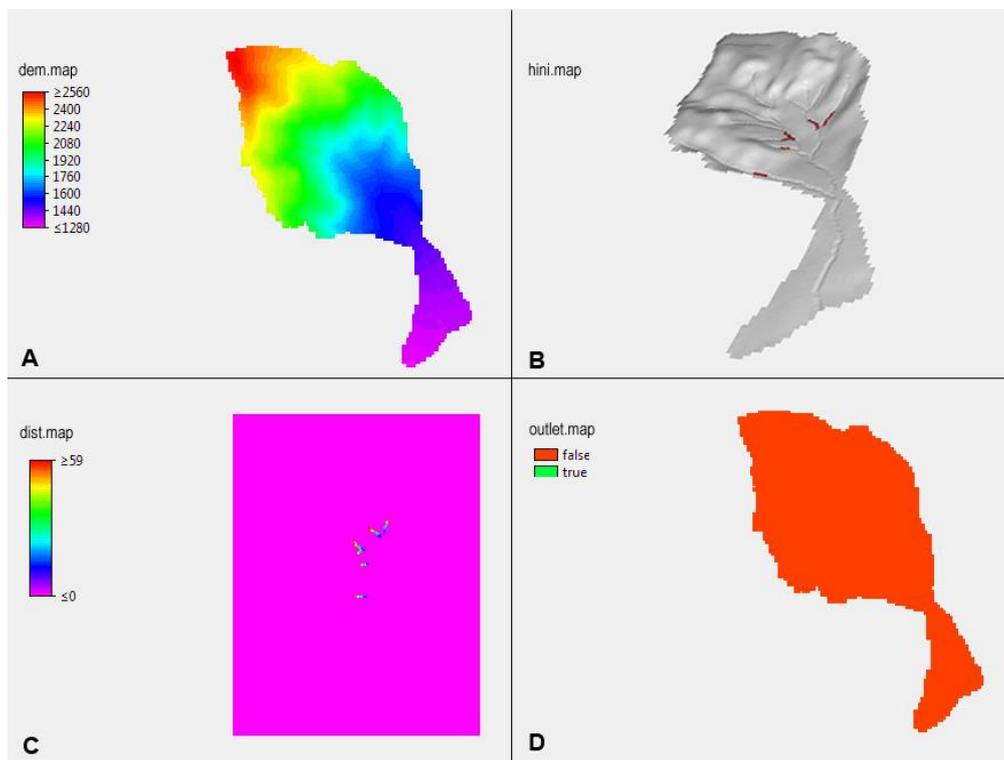


Figure 60. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant de Malefosse – captures d’écran PCRaster A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map

Pour le Rieu Sec, à défaut de pouvoir accéder au bassin de réception sur le terrain car trop escarpé, la position des zones de contribution a été estimée à partir des orthophotoplans de l’IGN. Il semblerait que la majorité des matériaux se trouvent entre 1 200m et 1 400m d’altitude en tête des deux chenaux principaux. Nous avons donc sélectionné ces zones pour les simulations (Figure 61-B). Comme précédemment, nous avons pu générer la carte des distances à partir des zones sources (Figure 61-C), et le système sélectionné est fermé (Figure 61-D).

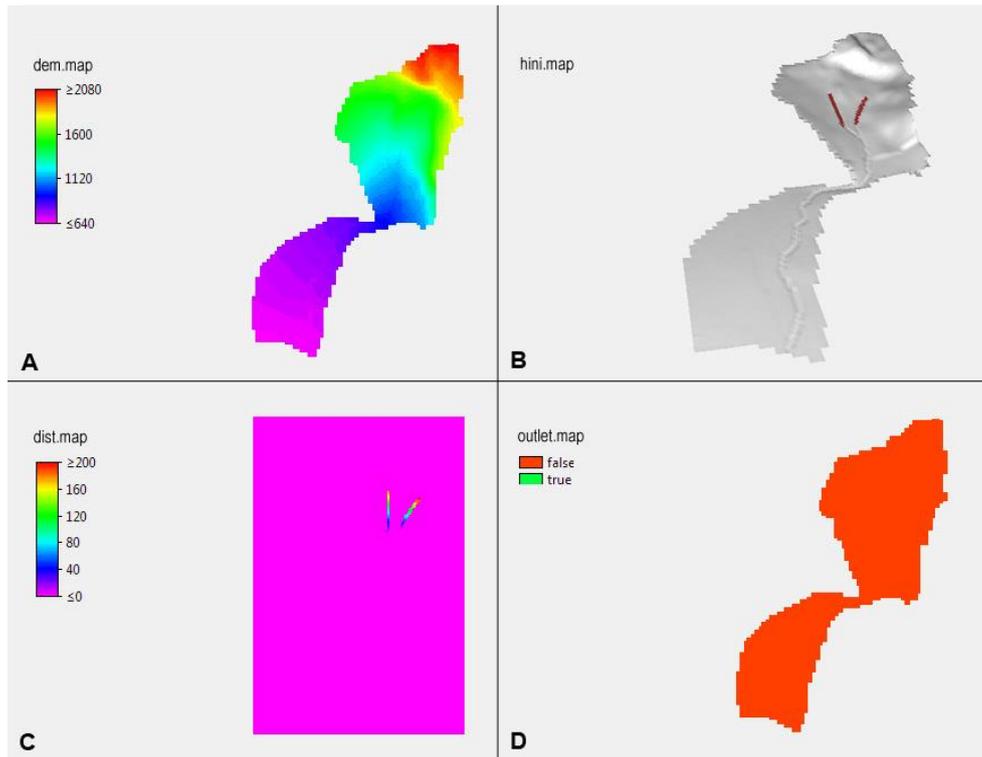


Figure 61. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant du Rieu Sec – captures d’écran PCRaster. A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map

Les volumes initiaux mobilisables ont ensuite été calculés en attribuant une valeur chiffrée (interprétée comme la hauteur en mètres par le modèle) à chaque pixel de la zone source délimitée sur le MNT. Avec une résolution de 10m, chaque pixel représente dans la réalité une surface de 100m². En connaissant le nombre de pixels définis en tant que “zone source”, et selon les valeurs de hauteur attribuées aux pixels, nous en avons déduit un volume. Ces calculs ont été effectués directement sous *PCRaster*. Nous restons cependant conscients que cette démarche comporte une certaine part d’incertitude pouvant potentiellement influencer les résultats en sortie du modèle.

Précisons qu’en entrée nous avons également généré des points de mesure par bassin-versant, localisés en amont des ponts routiers.

2.3. L'estimation des volumes et calage du modèle

2.3.1. Une appréciation difficile

Ce type de modèle de propagation soulève la question de l'estimation des volumes des laves torrentielles. Sujet épineux, car il est difficile de renseigner objectivement les valeurs de volume mobilisable des zones de contribution, les volumes mobilisés dans la zone de transport et les volumes déposés (Hürlimann et al., 2006). Très peu de bassins-versants des Alpes sont instrumentés pour de telles mesures d'autant qu'un même bassin-versant peut fournir des coulées de magnitude très variables selon un rythme irrégulier et discontinu : de nombreuses années sans évènement peuvent alterner avec des années ayant plusieurs évènements à la suite (Brochot et al., 2002). Il existe cependant quelques approches dans l'estimation des volumes résumées en Tableau 35.

Tableau 35. Méthodes d'estimation des volumes de lave torrentielle

Méthode	Principes / Avantages	Inconvénients / Limites	Références
Analyse probabiliste des données historiques	<ol style="list-style-type: none"> Valoriser les données d'archives, chronologie des évènements Relation fréquence/volume estimés Analyse fréquentielle sur un échantillon d'évènements 	<ol style="list-style-type: none"> Rareté des estimations quantitatives dans les bases de données. Limité aux données disponibles Valeurs souvent sous-estimées et/ou mal calibrées 	<p>Van Steijn, 1996 Johnson et al, 1990 Thénard, 2009</p>
Modèles sommaires	<ol style="list-style-type: none"> Équations empiriques et/ou géophysiques Relie le volume des laves à des paramètres hydrologiques et topographiques Facile d'application 	<ol style="list-style-type: none"> Résultats approximatifs puisque ne rend pas compte de la complexité du processus Résultats non transposables, valables uniquement pour le secteur concerné Calibré sur des évènements extrêmes 	<p>Zeller, 1976 Takei, 1984 Kronfellner-Kraus, 1985 D'Agostino, 1996 Rickenmann, 1997 Rickenmann, 1999 Gregoretto, 2000 Bianco et al, 2001 Gartner et al, 2008</p>
Estimations géomorphologiques	<ol style="list-style-type: none"> Basé sur l'étude des dépôts (localisation, forme), érodabilité des terrains 	<ol style="list-style-type: none"> Nécessite de lourdes investigations de terrain Subjectivité d'interprétation Ignorance des processus hydrauliques Manque de normalisation de la méthode 	<p>Hungr et al, 1984 Scheuringer, 1988 D'Agostino et Marchi, 2003</p>

Si trois méthodes se distinguent bien qu'elles aboutissent à des valeurs très disparates, elles ne permettent pas de dégager une vision cohérente ni de méthode généraliste (Brochot et al., 2002 ; D'Agostino et al., 2009). Toutefois, lorsque les bases de données sur les évènements sont riches, l'ajustement statistique d'un échantillon de volumes estimés semble assez fiable. Dans le cas contraire, le recours à des estimations plus qualitatives sont nécessaires pour estimer les volumes à intégrer au modèle.

2.3.2. L'estimation des volumes à partir d'une vidéo d'évènement : le Rif Blanc

Thénard (2009) a construit un indice dit de potentialité pour l'ensemble des bassins-versants de la vallée de la Guisane, au nord de Briançon. Il s'agit d'un indice calculé sur la base de paramètres morphométriques et historiques. Ainsi, le bassin-versant du Rif Blanc présenterait une potentialité moyenne à forte, c'est-à-dire que la capacité mobilisable en matériaux est relativement importante pour un seul évènement : de l'ordre de 15 000m³ à 20 000m³. Attention cependant, ces valeurs sont des estimations théoriques, elles ne sont pas ajustées avec la réalité des volumes au cours des évènements.

Lors de l'évènement du 4 juin 2012, nous avons eu la chance de disposer d'une vidéo filmée par les services du Conseil Général des Hautes-Alpes. D'une durée d'environ 4 minutes, elle montre l'arrivée et une partie de l'écoulement de la seconde coulée ayant eu lieu en milieu de matinée (environ 10h). Il est important de souligner que des vidéos d'évènement dans les Alpes tel que celui-ci sont très rares. A partir de cet enregistrement, il fût possible d'analyser les paramètres simples de l'écoulement (Okuda et al., 1980 ; Thouret et al., 2007 ; Okano et al., 2012). En premier lieu, nous avons calculé le nombre d'images par seconde sur toute la bande vidéo. Puis par image, nous avons estimé la section mouillée de l'écoulement par rapport aux dimensions réelles de la structure du déversoir. Ensuite, nous avons sélectionné un bloc rocheux suffisamment visible pour suivre sa trajectoire et ainsi calculer sa vitesse. Pour cela, nous avons évalué la distance parcourue (m) par rapport au temps écoulé c'est-à-dire le nombre d'images par seconde : entre deux points fixes (position 1 à l'instant T, position 2 à l'instant T+1) (Figure 62).



Figure 62. A. Position de la caméra, B. Extrait de la vidéo – évènement du 4 juin 2012 sur le Rif Blanc (source : CG05)

A partir des données de vitesse et de section mouillée, nous avons pu utiliser l'équation empirique de Rickenmann (1999) basée sur la relation entre le débit de pointe et les volumes mobilisés :

$$Q_p = WS \text{ (m}^2\text{)} \times \text{vitesse (m/s)}$$

$$Q_p = 0.1V^{0.83}$$

$$V = 10\,760$$

(Q_p = débit de pointe, WS = section mouillée et V = volumes)

Les volumes mobilisés par l'évènement ont ainsi pu être estimés à près de 11 000m³. Attention cependant, il s'agit des estimations volumiques de la seconde coulée, ces calculs ne prennent pas en compte l'intégralité des volumes mobilisés par l'évènement ni les volumes remobilisés de la première coulée.

En termes de loi rhéologique, au vu du comportement de la coulée sur la vidéo et des caractéristiques géomorphologiques du bassin-versant, la loi de *Coulomb Viscous* semblait la plus appropriée pour nos simulations.

Enfin, les observations faites sur le terrain quelques semaines après l'évènement (juin 2012) ont permis de relever les traces de hauteurs de dépôts autour de l'ouvrage hydraulique, du tunnel routier et de la départementale 1091 (Figure 63). Ces hauteurs ont servi de valeurs de référence pour les simulations dans *MassMov2D*, puisque pour être réalistes et

représentatifs de l'évènement, les résultats des simulations devaient correspondre au mieux aux observations de terrain. Précisons que le relevé des hauteurs de dépôts correspond aux traces observées sur la chaussée, les parois de l'ouvrage, et les berges du torrent, plus fidèles à la réalité de l'évènement et non aux épaisseurs de matériaux remaniés par les entreprises de déblaiement, encore présents sur le site lors des relevés.



Figure 63. Hauteurs de dépôts relevés (m) et longueur impactée sur la chaussée (en mètres linéaires) pour l'évènement du 4 juin 2012 sur le Rif Blanc

2.3.3. L'estimation des volumes à partir des données historiques : Malefosse

D'après un rapport de l'ETRM (Eaux, Torrents & Rivières de Montagne) en 2008, les volumes des laves torrentielles calculés pour le bassin-versant de Malefosse sont de l'ordre de 30 000m³ à 60 000m³ avec 28mm de cumul de pluies pour un évènement majeur. Cette information est la seule estimation chiffrée connue pour ce bassin-versant. C'est pourquoi nous avons considéré que pour un évènement de 60 000m³ décrit comme majeur dans l'étude de l'ETRM, les matériaux devaient très probablement atteindre le réseau routier.

D'après les mesures que nous avons effectuées en septembre 2011 au niveau du pont routier de la nationale 94, le tirant d'air de ce pont est de 4,5m (la hauteur comprise entre le lit torrentiel et le tablier du pont). Nous en avons donc déduit que la hauteur de l'écoulement doit être égale ou supérieure à cette valeur pour être en capacité d'impacter le réseau routier.

En ce qui concerne le choix de la loi rhéologique incrémentée dans le modèle, c'est celle de *Voellmy Frictional* qui a été retenue au regard des caractéristiques géologiques du bassin (en majorité des dolomites et calcaires dolomitiques), des dépôts observés dans le lit torrentiel et du rapport de l'ETRM. Sur ces bases, nous avons ajusté certains paramètres rhéologiques afin d'obtenir un résultat satisfaisant (ex : la valeur de l'angle de friction interne provient de l'étude de terrain réalisée par l'équipe Italienne du projet ARNICA). Ensuite, plusieurs jeux de paramètres ont été testés avec ce volume jusqu'à obtenir un processus d'écoulement conforme à l'étude de l'ETRM et aux informations décrites lors de précédents évènements sur ce torrent (Figure 64).

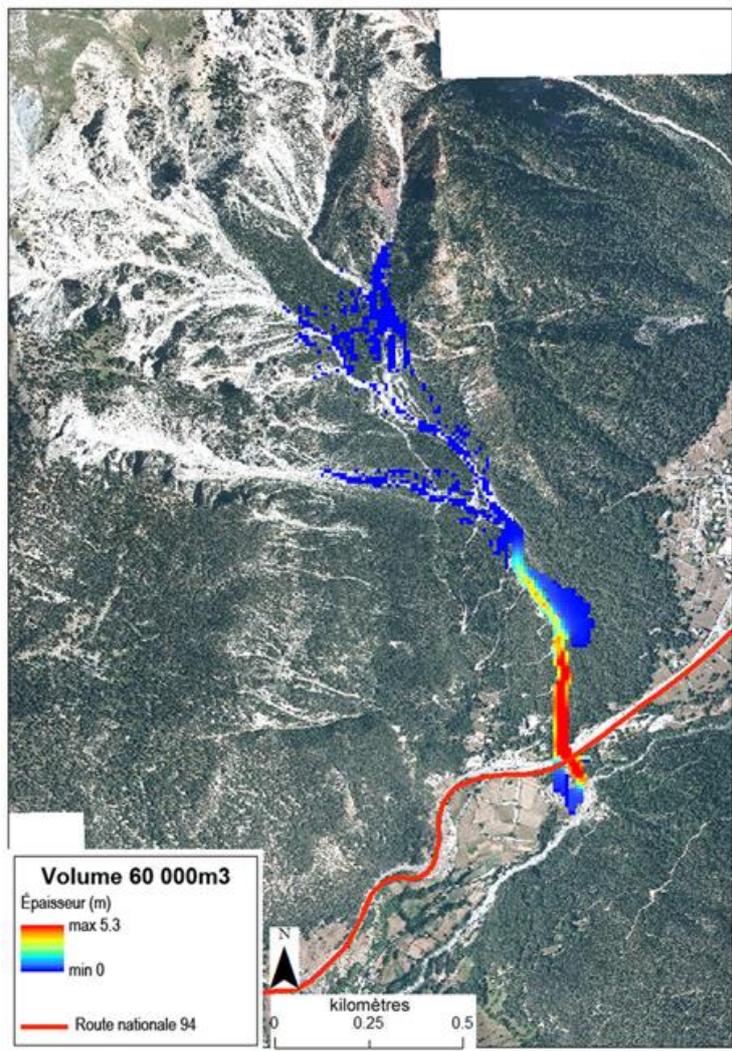


Figure 64. Résultat de simulation MassMov2D pour un volume de 60 000m³ - Malefosse

Avec ce volume en entrée, une lave torrentielle est largement capable d’atteindre à la fois le réseau routier mais également la rivière de la Haute-Durance située en aval et dont on sait que les crues majeures du torrent de Malefosse affouillent et déstabilisent largement la rive. La coulée simulée a également montré un étalement sur les bandes actives du chenal principal (Garitte et al., 2007). Les valeurs de volumes requises pour atteindre, puis pour impacter le réseau routier sont donc nécessairement inférieures à 60 000m³. Ce premier test a permis de calibrer nos simulations d’écoulement sous ce seuil maximal.

2.3.4. L'estimation des volumes selon les méthodes empiriques : Le Rieu Sec

Le Rieu Sec ne dispose d'aucune information fiable dans la bibliographie sur les volumes de ses laves torrentielles. La seule donnée chiffrée provient d'un rapport de génie civil pour le dimensionnement du pont de l'autoroute 43 qui traverse le torrent (GEOLINE, 2005). Ce rapport estime que la lave torrentielle de 1957 ayant impactée le réseau routier avait un débit d'environ 650-700 m³/s. De même, ce rapport calcule un débit de pointe de 800 à 900 m³/s pour une lave avec une fréquence de retour centennale. Nous avons donc déterminé les volumes mobilisables à partir de formules empiriques préétablies.

a) Relation débit de pointe/volumes, Rickenmann (1999)

$$Q_p = 0.1V^{0.83}$$

(Q_p =débit de pointe en m³/s et V = volumes)

Donc :

- $Q_p = 700$, $V = 43\ 000\text{m}^3$
- $Q_p = 800$, $V = 51\ 000\text{m}^3$
- $Q_p = 900$, $V = 58\ 000\text{m}^3$

La lave torrentielle de 1957 ayant impacté le réseau aurait donc eu un volume d'environ 43 000m³.

b) Calcul des volumes basé sur les précipitations selon le rapport de l'ETRM en 2008

Nous avons sélectionné un évènement sur le Rieu Sec ayant impacté le réseau routier et dont les valeurs de pluies relevées à la station météorologique de Saint-Martin, située au plus près du bassin-versant. Ainsi pour l'évènement de 1993, 35mm de précipitations ont été enregistrées.

$$\text{Volume d'eau ruisselé (m}^3\text{)} = (\text{Cr.BV})\text{Pmm}$$

(Cr= coefficient de ruissellement ;

BV= surface du bassin-versant en m² ;

Pmm= précipitations enregistrées en mm)

Donc :

➤ $(0.4 \times 1100)35 = 15\,400\text{m}^3$

Ensuite, la méthode estime que $\frac{2}{3}$ du volume d'eau ruisselé permet de former une lave.

Donc :

➤ Volume d'eau formant les laves (m³) = 10 267

Enfin, la méthode estime que suivant la concentration en matériaux, le volume de la lave torrentielle est 2x à 4x plus grand que le volume d'eau.

Donc :

➤ Fourchette de volumes probables mobilisables = $21\,000\text{m}^3 < V < 42\,000\text{m}^3$.

La lave torrentielle de 1993, ayant impacté le réseau routier aurait donc eu un volume de 42 000m³.

Ainsi, au regard de la concordance de résultats entre ces deux formules, l'évènement de 1993 avait un volume d'environ 42 000 m³. Cette valeur permet de caler nos simulations puisqu'une lave torrentielle avec ce volume est en mesure d'impacter le réseau routier.

Selon les mesures de terrain effectuées en mai 2011, le pont routier de la départementale 1006 dispose d'un tirant d'air de 4,5m. Par conséquent, nous avons considéré que la hauteur de l'écoulement doit être égale ou supérieure à cette valeur pour être en mesure d'impacter le réseau routier. Pour le moment, il n'a pas été possible de mesurer les dimensions du pont de l'autoroute 43. Enfin, la loi rhéologique retenue pour les simulations est *Coulomb Viscous* au vu des caractéristiques géologiques du bassin-versant et de l'observation des dépôts dans le chenal principal du torrent (marnes et calcaires en majorité).

3. Résultats cartographiques

Nos simulations visaient plusieurs objectifs : dans le cas du Rif Blanc, au vu de la richesse des données acquises sur le dernier évènement en 2012, nous avons établi un scénario reproductif de cet évènement dans le but de fournir des éléments de réponse à la vulnérabilité structurelle. Dans le cas de Malefosse et du Rieu Sec, des scénarii prédictifs visaient à connaître les seuils volumiques d'atteinte et d'impact sur le réseau routier par les laves torrentielles. Chaque carte de sortie du modèle a été superposée avec les orthophotoplans de l'IGN afin de mieux visualiser les résultats. Les cartes s'intéressent prioritairement aux hauteurs des dépôts au niveau du réseau routier. Afin de représenter les écoulements en totalité, du lancement jusqu'à l'arrêt des matériaux, le modèle a été calibré sur 600 *timesteps*, soit 10 minutes par simulation.

3.1. Scénario reproductif d'un évènement dommageable au réseau routier : le 4 juin 2012 sur le Rif Blanc

Les volumes calculés pour la seconde coulée du matin du 4 juin 2012, ont permis de disposer d'une fourchette de valeurs réaliste pour les simulations. Pour autant, il faut souligner que le modèle ne pouvait pas inclure la remobilisation potentielle des matériaux lors de la première coulée. Plusieurs scénarii ont été modélisés : nous avons retenu un intervalle de 10 000m³ à 15 000m³ pour cet évènement.

Pour un scénario avec volume en entrée de 10 000m³ (Figure 65), la coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval jusqu'à impacter la départementale 1091. Aucun volume ne reste en transit dans le chenal sauf en amont du déversoir. La fluidité du matériel en mouvement semble donc correcte. La distance d'arrêt maximale est située à quelques dizaines de mètres au-dessous de la chaussée, en partie supérieure du cône de déjection. En termes d'étalement spatial, il apparaît nettement que la coulée est fortement contrainte par les ouvrages hydrauliques : elle s'étale peu mis à part en rive gauche du torrent. Au niveau du réseau routier même constat, la coulée s'étale peu sur la chaussée sauf en rive gauche du torrent. L'extension maximale des dépôts semble légèrement inférieure aux observations de terrain mais le rôle des ouvrages hydrauliques est bien représenté.

Concernant les hauteurs des dépôts, une épaisseur maximale de 4,5m est atteinte : en partie inférieure du chenal, sur le déversoir, en rive gauche du torrent, au niveau de l'avaloir et sur une partie de la chaussée. Ce constat démontre clairement que les ouvrages hydrauliques jouent certes un rôle dans le freinage de la coulée mais ils sont incapables d'absorber l'ensemble des volumes de matériaux mobilisés. Les hauteurs simulées sont proches des hauteurs relevées sur le terrain, mais l'extension maximale des dépôts est sous-représentée.

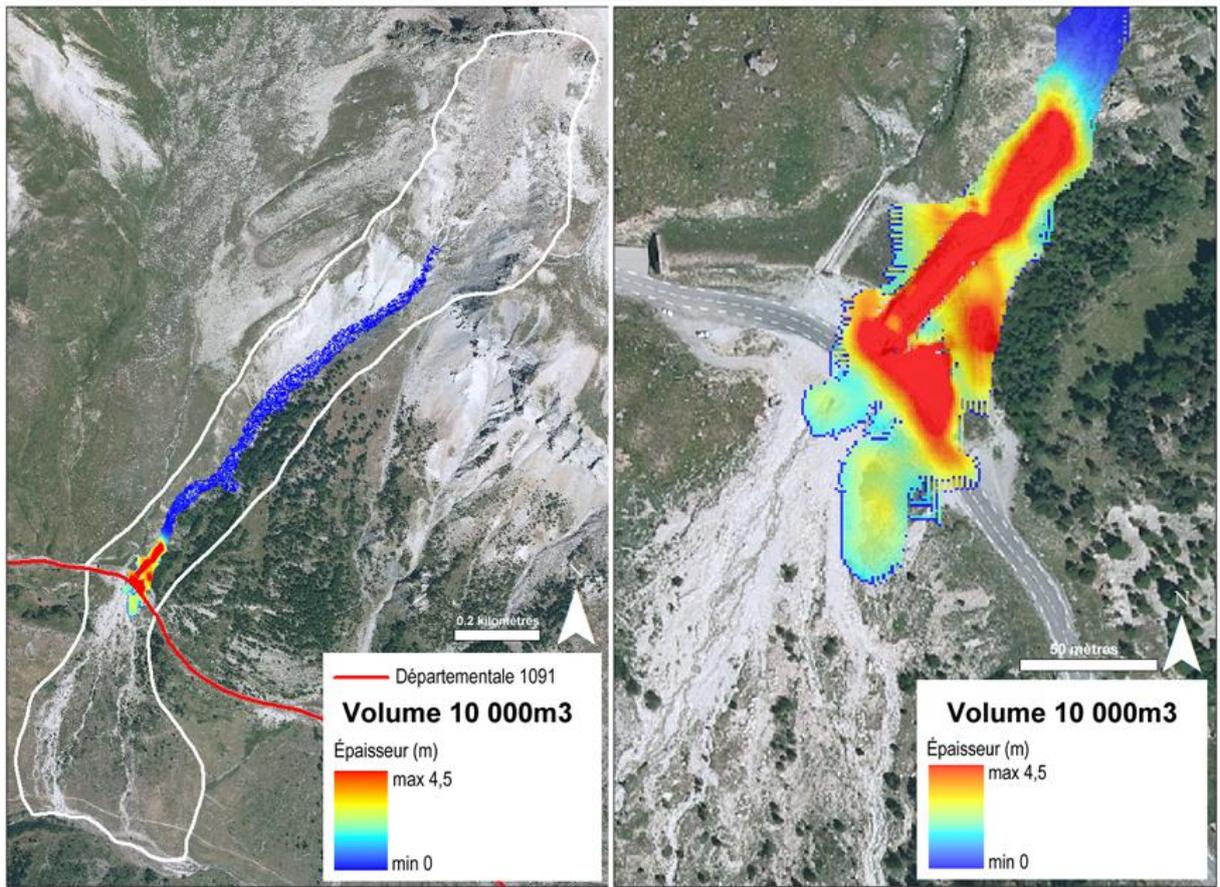


Figure 65. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 10 000m³

Pour un scénario avec volume en entrée de 15 000m³ (Figure 66), la coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval jusqu'à impacter la départementale 1091. Aucun volume ne reste en transit dans le chenal sauf en amont du déversoir. Il est cependant étonnant de constater que La distance d'arrêt maximale est située à environ une centaine de mètres au-dessous de la chaussée, en partie supérieure du cône de déjection. Ce paramètre évolue peu entre les deux scénarii, les ouvrages hydrauliques jouent donc un rôle certain dans le freinage de la coulée et dans une certaine mesure de piège à matériaux. En termes

d'étalement spatial, la surface est plus étendue vis-à-vis du scénario précédent bien que la coulée reste fortement contrainte par les ouvrages hydrauliques. Le débordement au niveau de l'avaloir est clairement visible sur la chaussée. La surface de recouvrement sur la chaussée est très proche des observations de terrain en rive droite du torrent mais l'emprise des matériaux est trop importante en rive gauche. En termes de hauteurs de dépôts, les valeurs maximales sont identiques aux valeurs observées avec le scénario précédent mais leur répartition spatiale est différente : en rive gauche du torrent par exemple, l'épaisseur des dépôts atteint jusqu'à 4m contre 1m relevée sur le terrain. En revanche en rive droite, les hauteurs de dépôts sont très similaires à celles relevées sur le terrain et sont en mesure de pénétrer dans le tunnel. Pour ce scénario, les résultats semblent donc légèrement surestimer les valeurs réelles.

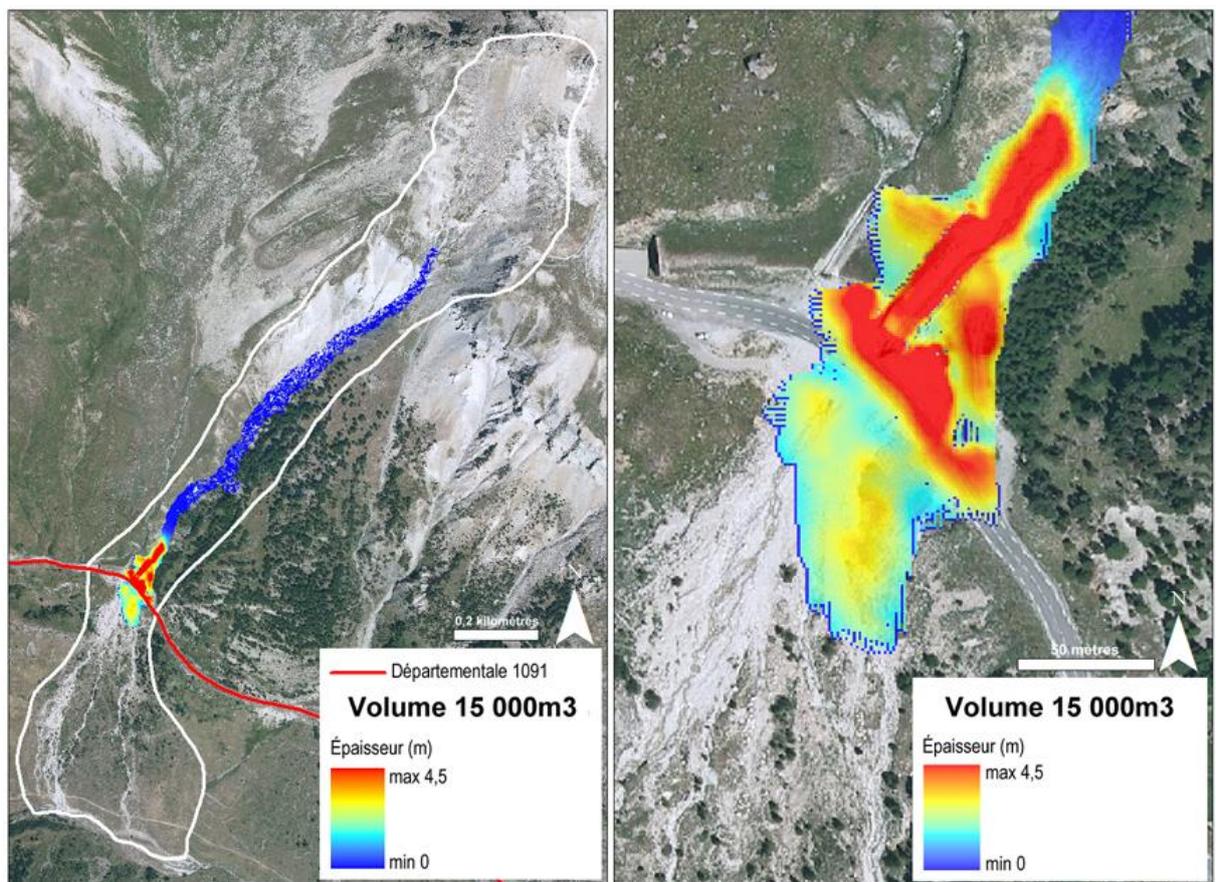


Figure 66. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 15 000m³

A partir des résultats de ces simulations, nous avons opéré plusieurs tests afin d'ajuster les deux scénarii : un compromis entre l'extension maximale et les hauteurs de dépôts.

Ainsi un scénario avec un volume de 11 000m³ semble être le plus fidèle à la réalité (Figure 67). La distance d'arrêt est également peu étendue sur le cône de déjection. Le replat topographique offert par la route provoque l'accumulation des matériaux, d'autant plus marquée par le débordement de l'avaloir. L'extension spatiale des dépôts sur la chaussée est globalement satisfaisante, excepté en rive droite du torrent, pour lequel l'étendue des matériaux n'atteint pas les limites constatées sur le terrain. Les hauteurs de dépôts sont proches des épaisseurs relevées sur le terrain quoique légèrement surestimées en rive gauche comme pour les scénarii précédents.

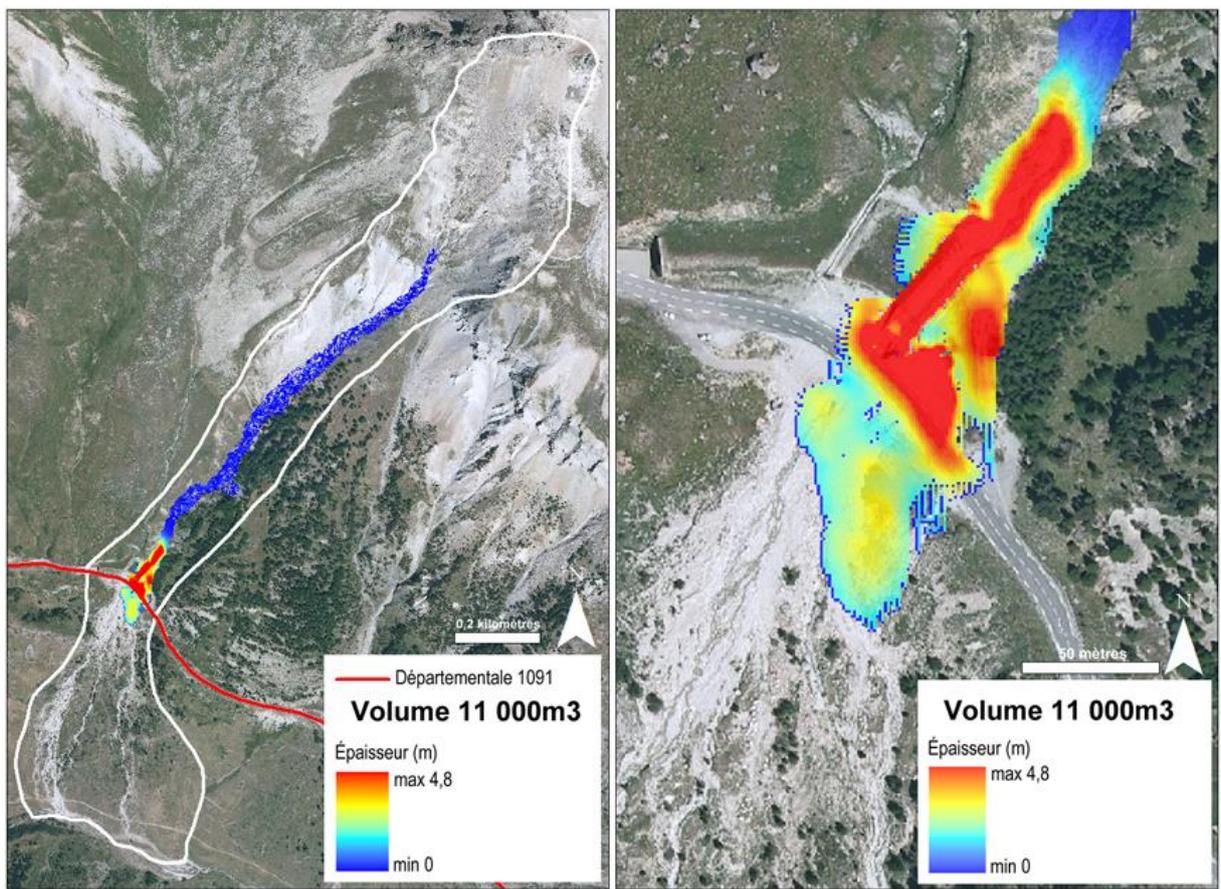


Figure 67. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 11 000m³

En complément des cartes des hauteurs de dépôts, nous avons enregistré les valeurs de hauteurs et les vitesses de déplacement de l'écoulement pour chaque scénario sur deux points de mesure de part et d'autre de l'ouvrage hydraulique : dans le chenal avant le déversoir (point 1) et sur la chaussée routière près de l'avaloir (point 2). Ces mesures

permettent de constater l'effet de l'ouvrage hydraulique sur le comportement des coulées (Figure 68).

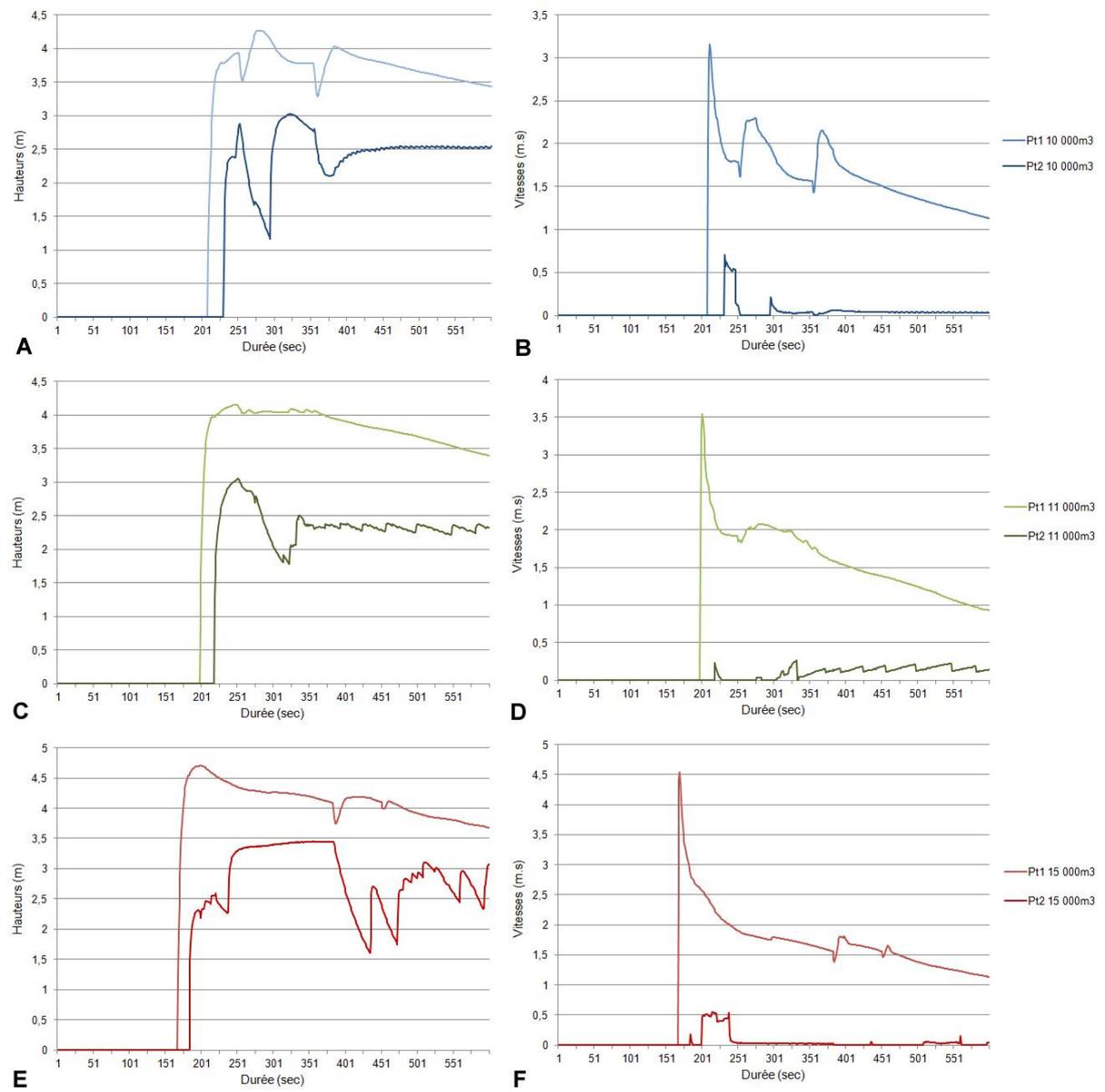


Figure 68. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A-C-E) et des vitesses de déplacement (B-D-F) enregistrées avant le déversoir (Pt1) et au niveau de la chaussée de la départementale D1091 (Pt2) – Rif Blanc

Les hauteurs observées au point 1 quel que soit le volume en entrée (Figure 68 A-C-E) montrent que les valeurs maximales sont atteintes très rapidement dès le début de l'écoulement, à noter que ces valeurs dépendent fortement de nos paramètres de calage. La charge volumique se concentre donc dans le front des coulées. En revanche, les valeurs de hauteurs sont nettement inférieures au point 2 après avoir franchi l'ouvrage hydraulique. Ce

qui confirme le rôle de piège à matériaux de la structure. De même les courbes sont fortement écrêtées à 300 secondes pour les volumes de 10 000m³ et 11 000m³, mais pas pour 15 000m³. Cette chute des hauteurs est sans doute causée par l'avaloir qui absorbe une partie des volumes avant débordement et étalement sur la chaussée. En revanche à 15 000m³, les volumes sont trop importants, le débordement est immédiat. Dans tous les cas, l'avaloir n'est visiblement pas suffisant pour contenir la coulée puisque les épaisseurs de matériaux se stabilisent autour de 2,5m sur la chaussée.

Les vitesses de déplacements sont également maximales en front de coulée au niveau du point 1 (Figure 68-B-D-F). Ensuite, moins le volume initial est important et plus les "bouffées" successives sont marquées au cours de l'écoulement. Au point 2, nous constatons que les vitesses sont très faibles, ce qui démontre la capacité de freinage du flux par les ouvrages. Le propos est cependant à nuancer puisque à ce niveau les coulées s'étalent sur la chaussée et donc perdent de la vitesse, sans oublier l'encombrement progressif des matériaux au pied de l'ouvrage qui ralentit considérablement le flux (confirmé à la vidéo).

Ces simulations ont démontré que la configuration des ouvrages hydrauliques tels que le déversoir et l'avaloir constituent des facteurs techniques de vulnérabilité aggravants vis-à-vis d'un endommagement structurel du réseau. En effet, au regard des sorties du modèle, les ouvrages apparaissent clairement sous-dimensionnés pour un écoulement torrentiel de cette intensité, malgré une certaine capacité de freinage et de retenue des matériaux. Il est évident que la structure n'est pas en mesure d'absorber un tel flux, qui plus est en présence de blocs rocheux non simulés ici. Le replat topographique offert par la route permet également l'étalement linéaire des matériaux débordés. De même l'extension spatiale des dépôts est en capacité d'atteindre les flancs du tunnel et par conséquent les fenêtres d'ouverture. L'obstruction combinée de la chaussée et du tunnel est donc facilitée. La coupure du réseau est alors totale contrairement aux objectifs prévus initialement qui visaient justement à utiliser la galerie comme moyen de substitution en cas d'obstruction de la départementale D1091.

Ce type d'évènement est donc suffisant pour endommager la chaussée et pour obstruer le tunnel de déviation. Un évènement torrentiel d'intensité moyenne sur le torrent du Rif Blanc suffit donc à paralyser totalement la circulation routière.

3.2. Scénarii prédictifs d'atteinte et d'impact au réseau routier : Malefosse

En utilisant le même jeu de paramètres que ceux servant à caler le modèle sur le torrent du Rif Blanc, nous avons simulé des évènements prédictifs afin de déterminer les seuils volumiques d'atteinte et d'impact de la nationale 94. L'atteinte du réseau sous-entend une distance d'arrêt localisée au niveau du pont routier, l'impact du réseau sous-entend une hauteur de matériaux suffisante pour endommager la structure et obstruer la chaussée.

Ainsi, les résultats montrent qu'avec un volume de matériaux mobilisables supérieur ou égal à 40 000m³ l'extension maximale des dépôts est probablement en mesure d'atteindre le pont de la nationale N94 (Figure 69). La coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval, mais sans surprise plusieurs sections de matériaux restent en transit dans le chenal principal. Ce fait est probablement dû à l'efficacité des seuils RTM qui freinent la coulée et stockent une grande partie des volumes. La coulée semble relativement bien contrainte dans le lit torrentiel malgré quelques étalements latéraux sur le cône de déjection. Les épaisseurs maximales sont de l'ordre de 3,4m en partie médiane de la zone de transport et elles sont inférieures à 2m au niveau du pont routier.

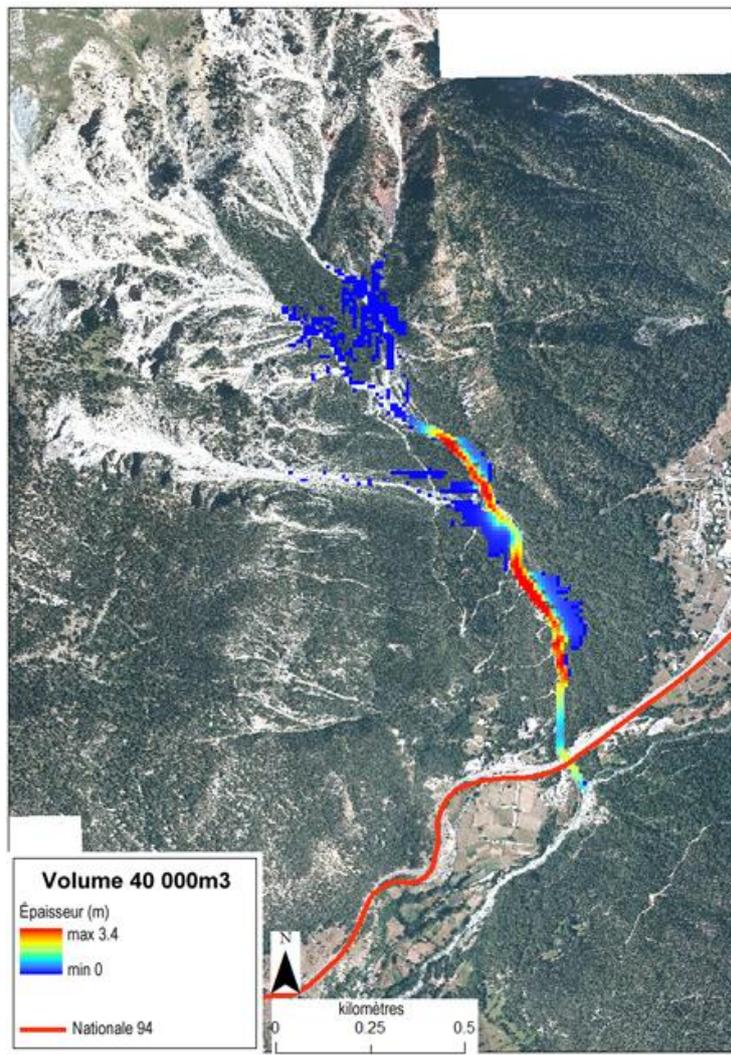


Figure 69. Hauteurs de dépôts sur Malefosse avec un volume minimum requis de 40 000m³ pour atteindre la nationale N94

Le seuil volumique requis pour impacter le pont de la nationale 94 se situe donc entre 40 000m³ et 60 000m³ selon les paramètres définis dans le modèle.

Les résultats des simulations ont démontré que le seuil volumique dommageable est atteint à partir d'un scénario de 47 000m³ de matériaux mobilisables (Figure 70). La coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval mais les seuils RTM ne sont plus en capacité de retenir la charge de matériaux qui encombrant alors la partie inférieure du lit torrentiel, particulièrement au niveau du pont de la nationale 94. L'étalement latéral est faible et peu étendu, les volumes étant majoritairement concentrés dans le chenal. A partir de ce seuil, les hauteurs de dépôts de l'ordre de 5m sont supérieures au tirant d'air de l'ouvrage (4,5m), ce qui peut provoquer des dégâts physiques sur le pont et/ou entraîner une coupure

du réseau routier. Les valeurs ainsi obtenues par nos simulations sont en adéquation avec la fourchette de volumes citée dans le rapport de l'ETRM (2008).

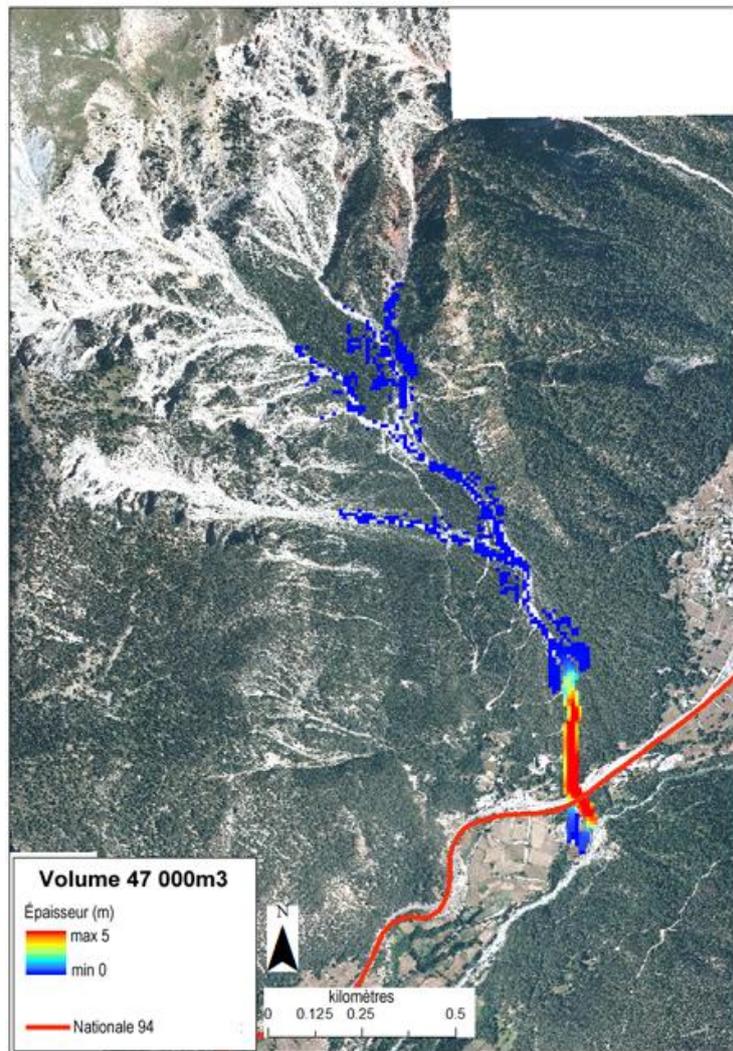


Figure 70. Hauteurs de dépôts sur Malefosse avec un volume minimum requis de 47 000m³ pour impacter la nationale N94

A partir d'un point de mesure situé au niveau du pont de la route nationale 94, les simulations ont renseigné ponctuellement les valeurs de hauteur de l'écoulement (m) et les vitesses de déplacement (m.s) pour chaque itération (600 *timesteps*). Ces valeurs ont été calculées pour les volumes de 47 000m³ et 60 000m³ (Figure 71).

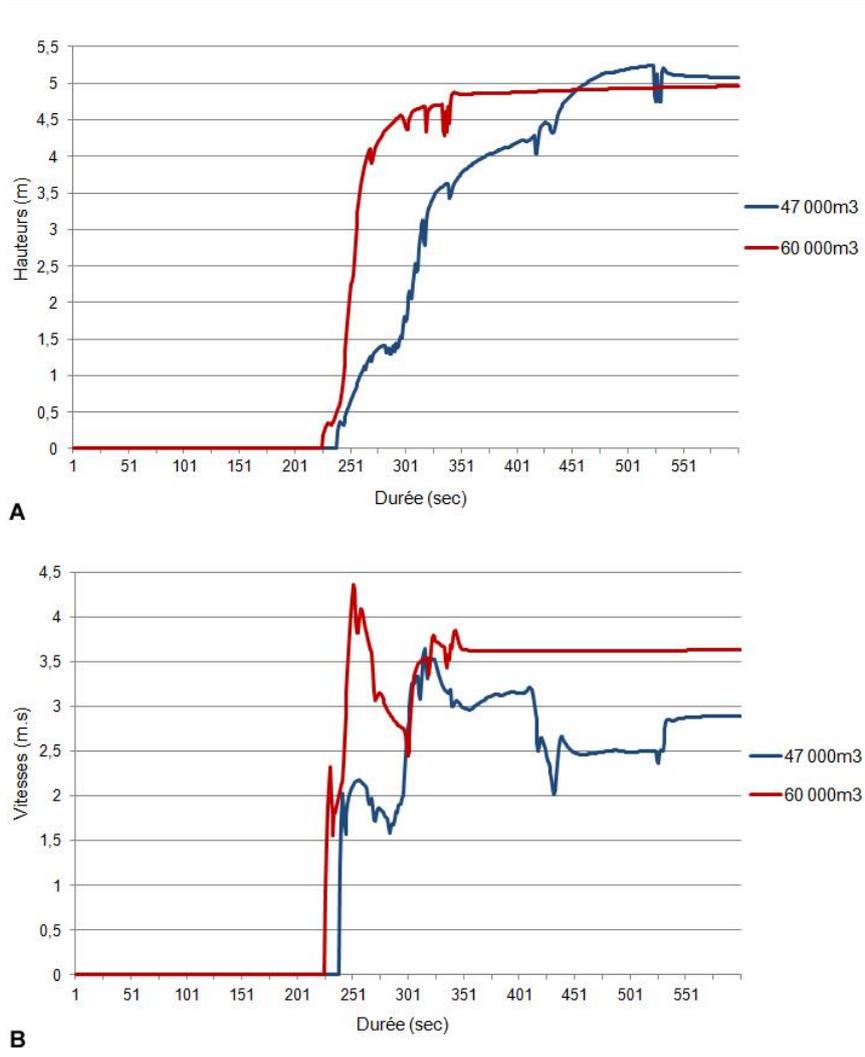


Figure 71. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A), et des vitesses de déplacement (B) enregistrées au niveau du pont de la nationale N94 - Malefosse

Les graphiques montrent que le flux atteint l'ouvrage routier au bout de 225 secondes pour un volume de 60 000m³. Les valeurs maximales de hauteur (Figure 71-A) sont atteintes très rapidement, ce que nous avons interprété comme le front de la coulée puis les valeurs restent constantes tout au long de la simulation. L'épaisseur de la coulée est très rapidement supérieure au tirant d'air du pont qu'elle dépasse au bout de 300 secondes. Les vitesses de déplacement (Figure 71-B) sont plus irrégulières, elles pourraient traduire la succession des "bouffées" successives au cours de l'écoulement.

Pour un volume de 47 000m³, la coulée atteint le pont un peu plus tardivement, au bout de 240 secondes. les valeurs de hauteur (Figure 71-A) sont plus progressives au cours de la simulation et les valeurs maximales sont atteintes tardivement. La coulée met plus de temps avant d'impacter l'ouvrage puisqu'elle dépasse la hauteur du tirant d'air à partir de 425

secondes. Les vitesses de déplacement (Figure 71-B) sont plus lentes et montrent d'avantages de "bouffées" successives.

3.3. Scénarii prédictifs d'atteinte et d'impact au réseau routier : Le Rieu Sec

En suivant la même méthode que pour Malefosse, nous avons défini les volumes minimums mobilisables pour atteindre et impacter le réseau routier sur le torrent du Rieu Sec en utilisant les mêmes paramètres ayant servis à caler le modèle.

Les résultats ont montré que le seuil volumique requis pour que l'extension maximale atteigne au moins la départementale D1006 doit être supérieur ou égal à 21 000m³ (Figure 72). La coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval. Deux zones d'étalement latérales sont visibles en partie médiane du chenal d'écoulement. Une petite partie des volumes reste en transit en sortie de la zone d'ablation, mais la grande majorité se situe à l'amont des ponts routiers avant les bassins de stockage d'eau. Les épaisseurs maximales relevées sont de l'ordre de 4,4m et nulles au niveau des ouvrages routiers. Les hauteurs ne sont donc pas suffisantes pour être en capacité d'impacter ces derniers.

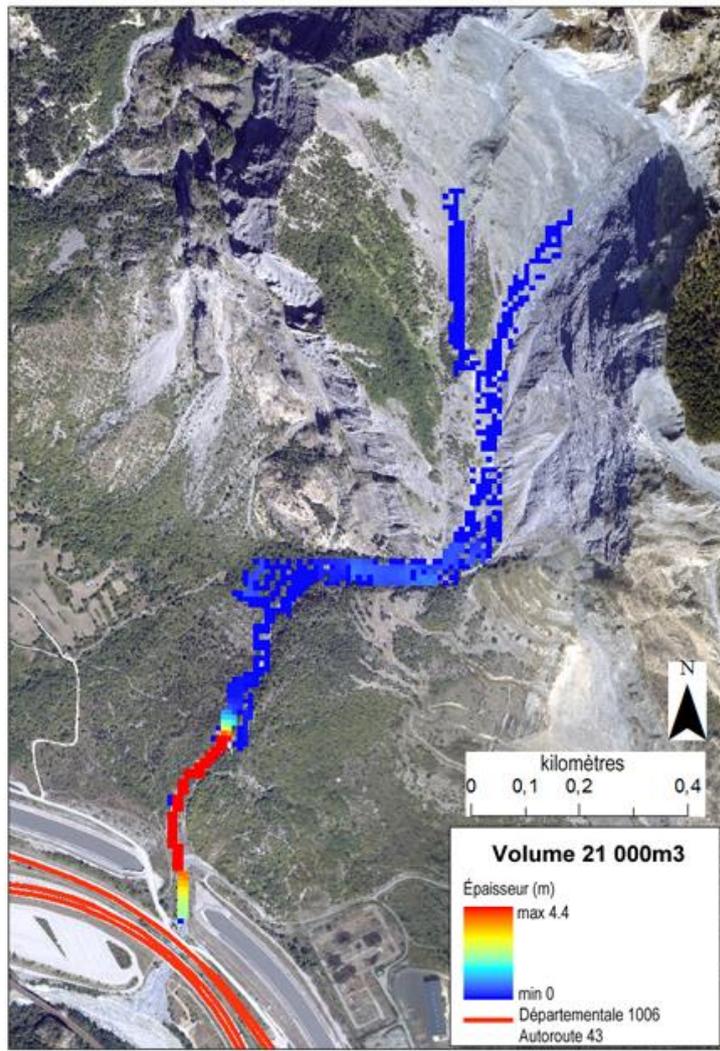


Figure 72. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec avec un volume minimum requis de 21 000m³ pour atteindre la départementale D1006

Le second scénario démontre qu'un volume de matériaux mobilisables supérieur ou égal à 42 000 m³ est en mesure d'impacter le réseau routier au niveau du pont de la départementale D1006 (Figure 73). La coulée se détache bien des zones initiales et se propage vers l'aval. Aucun volume ne reste en transit dans le chenal mais l'étalement latéral en rive droite du torrent semble plus étendu. L'épaisseur maximale 7,2m est observée en partie inférieure du chenal, surtout au niveau des ponts routiers. Ainsi à partir de ce seuil volumique, les hauteurs de dépôts sont très largement supérieures au tirant d'air du pont de la départementale 1006 (4,5m). Une lave torrentielle est donc en capacité d'impacter la structure, occasionner des dommages physiques voir entrainer une coupure du réseau routier. En revanche, nous ignorons si l'épaisseur de dépôts est suffisante ou non pour

impacter le pont autoroutier ni quelques peuvent être les conséquences physiques d'une telle quantité de matériaux au niveau des piliers de soutènement.

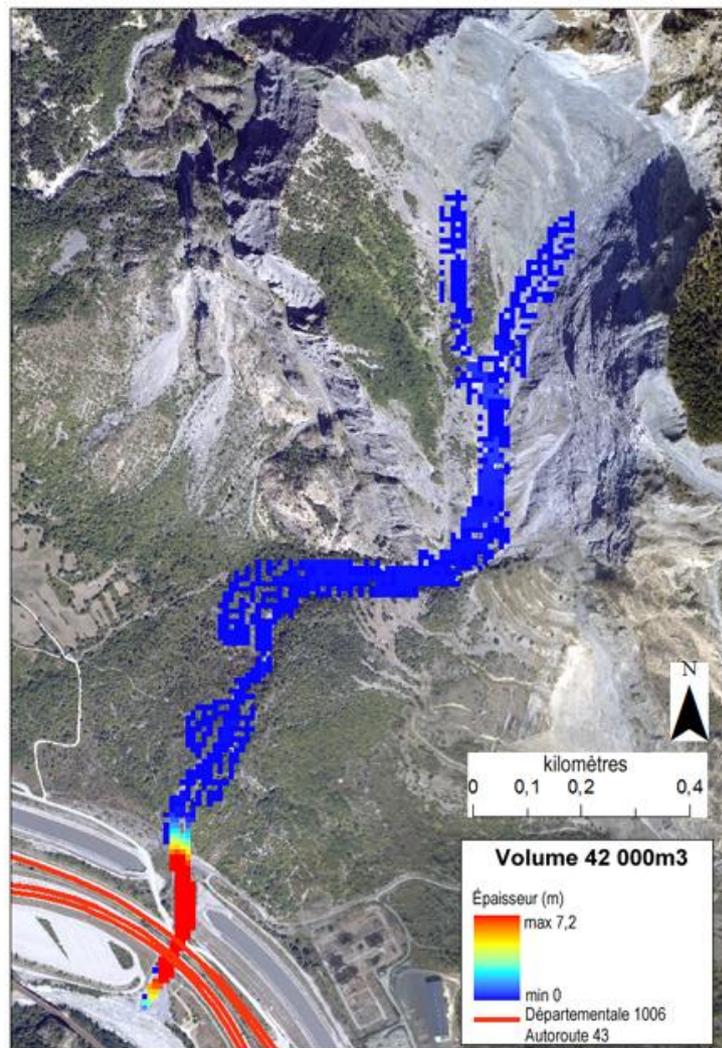


Figure 73. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec avec un volume minimum requis de 42 000m³ pour impacter la départementale D1006

Rappelons toutefois que ce torrent contrairement à celui de Malefosse est très peu entretenu. Il n'existe peu ou pas d'ouvrages RTM dans le lit torrentiel et les dessous des ponts sont très engravés par les matériaux et les blocs issus des précédentes laves torrentielles. L'espace disponible pour permettre l'écoulement entre le pont et le fond du chenal est donc très variable selon le degré d'engravement du lit du torrent, comme en témoigne les photographies suivantes (Figure 74). Pour ces raisons, il faut considérer que les valeurs estimées dans le cas présent ne sont valables que pour un faible engrèvement du lit par des

dépôts. Dans le cas contraire, les tirants d'air sont bien évidemment réduits et par extension les hauteurs minimum requises pour impacter le réseau routier.



Figure 74. A. Engravement du lit torrentiel du Rieu Sec sous les ponts de la départementale D1006; B. Et de l'autoroute A43 (2011- sac à dos pour échelle)

Enfin, nous avons simulé une lave torrentielle avec une fréquence de retour centennale de $58\,000\text{m}^3$, comme décrit dans le rapport de l'ETRM (Figure 75). Il semblerait que les hauteurs des dépôts observées au niveau des ouvrages de franchissement routiers ne soient pas véritablement plus élevées. Seule l'extension spatiale des dépôts est plus importante avec un léger débordement hors du lit torrentiel.

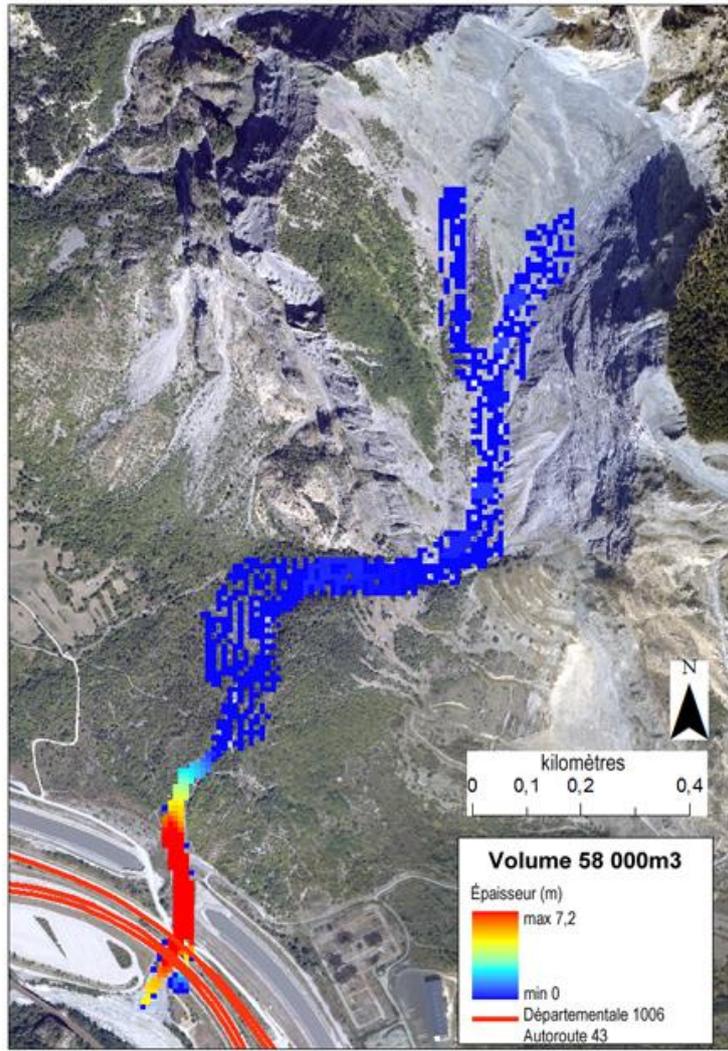


Figure 75. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec pour une lave torrentielle centennale de 58 000m³

Suivant la même démarche que pour le torrent de Malefosse, deux points de mesure ont été placés au niveau du pont de la départementale D1006 (point 1) et de l'autoroute A43 (Point 2), afin d'obtenir ponctuellement tout au long de la simulation les valeurs de hauteur (m) et de vitesse de déplacement (m.s). Ces valeurs ont été calculées pour les volumes de 42 000m³ et 58 000m³ (Figure 76).

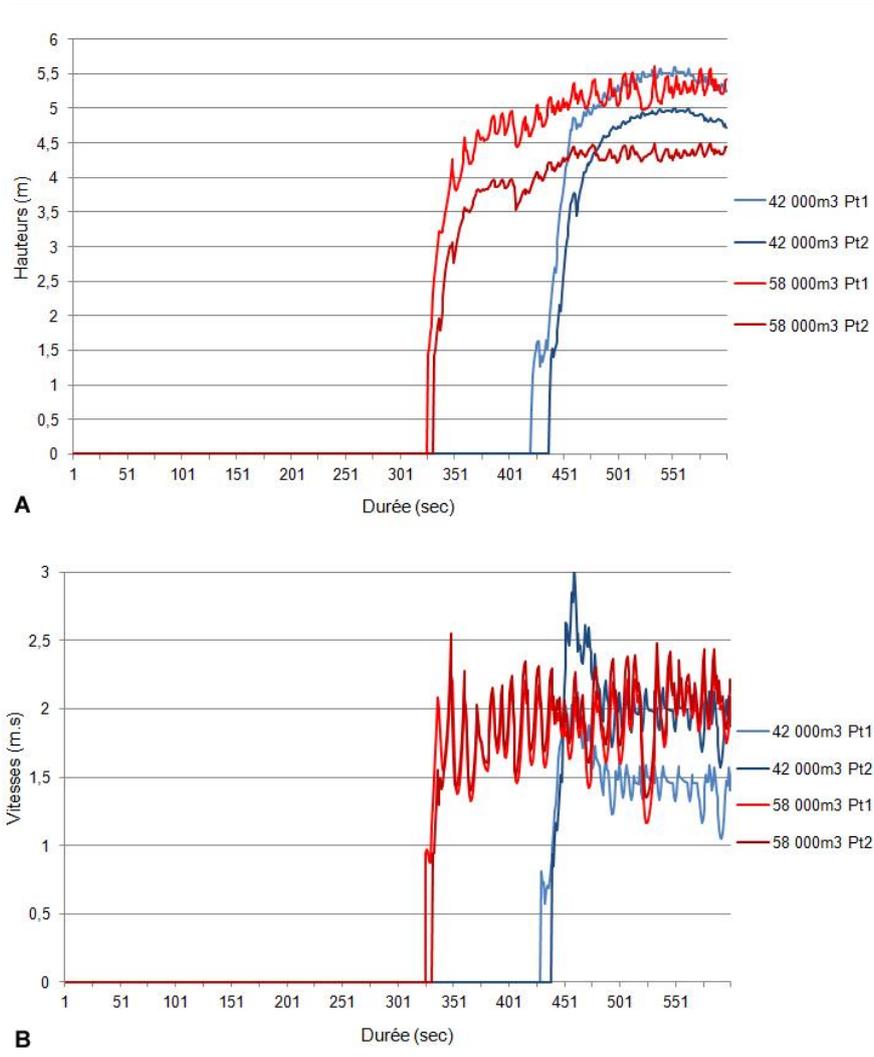


Figure 76. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A) et des vitesses de déplacement (B) enregistrées au niveau du pont de la départementale D1006 (Pt1) et du pont de l'autoroute A43 (Pt2) – Rieu Sec

Les tendances observées sont relativement similaires pour les deux volumes, à la différence que pour un volume de 42 000m³, l'écoulement met 100 secondes de plus pour atteindre les ponts routiers. Dans les deux cas, dès l'atteinte du réseau par le front de la coulée, la hauteur du tirant d'air de la départementale 1006 est très rapidement dépassée (Figure 76-A). En termes de vitesses de déplacement (Figure 76-B), les valeurs sont très proches entre les deux points de mesure pour un volume de 58 000m³, mais l'écart se creuse pour un volume de 47 000m³. Les deux courbes surprennent par leur forte oscillation que nous avons également interprété comme des "bouffées" successives, peut-être exagérées par la résolution du MNT.

Conclusion et limites

Les simulations numériques opérées dans le modèle de propagation *MassMov2D* ont permis de fournir des éléments de réponse à la vulnérabilité structurelle du réseau routier pour le torrent du Rif Blanc (Utasse et al., 2013). Ainsi grâce à un scénario reproductif de l'évènement du 4 juin 2012, les facteurs aggravants de vulnérabilité ont pu être mis en évidence : les ouvrages hydrauliques conçus pour permettre l'écoulement des eaux sont sous-dimensionnés et ce même pour une lave torrentielle d'intensité moyenne. Les fenêtres d'ouverture du tunnel routier sont des voies d'obstruction pour les matériaux et le replat topographique de la chaussée permet l'étalement spatial des dépôts. Des scénarii prédictifs d'évènements ont également permis d'estimer les seuils volumiques requis pour que l'extension maximale des dépôts puisse atteindre les réseaux routiers du torrent de Malefosse et du Rieu Sec. De même, les simulations ont permis d'estimer les seuils volumiques nécessaires pour qu'une lave torrentielle soit en mesure d'impacter le réseau routier sur ces deux torrents. Le Rieu Sec étant tributaire du niveau d'engravement de son lit torrentiel pour définir ce seuil.

Cependant, nous avons rencontré plusieurs limites au cours de cette méthode :

- i. Cette technique se heurte au calcul des volumes mobilisables. En effet, la bibliographie informe de manière très sporadique sur les volumes au cours d'un évènement. Le recours à la vidéo, aux formules empiriques et/ou statistiques permettent une estimation globale des volumes mais les méthodes sont encore balbutiantes. Il est très difficile d'obtenir des valeurs réelles quantifiées et vérifiées des volumes de matériaux mis en mouvement par les laves torrentielles sans une instrumentation lourde et prolongée dans le temps.
- ii. Les valeurs des différents paramètres rhéologiques peuvent être affinées au moyen d'investigations de terrain tel que des sondages géophysiques complétés par des analyses granulométriques des dépôts post-évènements.
- iii. La précision des résultats est limitée et fortement contrainte par la qualité de la résolution utilisée, compte tenu de l'échelle locale de l'étude. C'est particulièrement le cas pour les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec. Mais en raison de contraintes logistiques et techniques, il n'a pas été possible d'obtenir une donnée plus

précise, raison pour laquelle nous avons choisis de redessiner le réseau hydrographique afin de remédier au manque de précision du MNT. A posteriori de ce travail, l'acquisition d'un MNT à haute résolution comme sur le Rif Blanc pourrait donc permettre d'affiner les résultats présents.

- iv. Nous restons conscients que la précision des résultats est influencée par les paramètres d'entrée du modèle tel que le positionnement des zones sources et le calage du modèle. De même, le modèle modélise la coulée depuis les zones sources en tête de bassin mais ne prend pas compte la remobilisation possible des matériaux situés dans le chenal.
- v. Bien que les résultats présentés semblent réalistes au vu des évènements ultérieurs, il est évident que la solution du surcreusement de l'ouvrage hydraulique pour l'un et du lit torrentiel pour les autres, conduit inévitablement à encaisser involontairement l'écoulement au cours de la simulation. Néanmoins, le creusement du réseau hydrographique tend seulement à exagérer la hauteur des berges du chenal et non sa largeur. Ainsi, les hauteurs relevées au niveau des ponts routiers ne sont pas ou très peu perturbées par cette modification. C'est pourquoi, la valeur de référence était celle du tirant d'air des ouvrages pour définir le seuil d'impact.
- vi. Insistons sur le fait que ces valeurs sont également conditionnées par le degré d'engravement du lit des torrents. Cette notion est particulièrement valable pour le torrent du Rieu Sec dont l'entretien n'est pas systématique. En effet, plus l'engravement est important et plus l'espace entre le tablier du pont et le fond du chenal est étroit, ce qui accroît la vulnérabilité du réseau routier.

Chapitre 5 – Les acteurs institutionnels du risque-réseau : Décryptage des protocoles de gestion de crise

En France, la législation en matière des risques abonde, mais le décalage entre cette législation et son application réelle est une donnée importante pour la gestion des risques (Montredon et Granet-Abisset, 2007). En outre, les relations entre les différents acteurs constituent des éléments déterminants dans la création de la vulnérabilité institutionnelle (Sierra et Metzger *in* Janeau et al., 1997). En effet, la réactivité des acteurs face à un évènement reflète leur capacité à remédier à l'endommagement et détermine le temps à mobiliser pour revenir à une situation normale sur le réseau routier.

Ce chapitre s'applique donc à mieux comprendre les processus décisionnels et opérationnels de la gestion de crise routière. La méthode se base sur deux approches distinctes : 1) l'analyse de la gestion de crise théorique telle qu'elle est présentée par les sources gouvernementales dans la bibliographie ; 2) l'évènement dommageable du 4 juin 2012 dans les Hautes-Alpes sur le torrent du Rif Blanc était l'opportunité de rencontrer les différents acteurs territoriaux en charge de l'intervention sur le réseau routier. L'objectif est d'identifier les rôles et missions des gestionnaires au moment de la crise et de mieux connaître la planification des actions. Cette partie de l'étude a été réalisée avec l'appui de Jessica Veyron, étudiante de master 1 de l'Université de Lyon III, dans le cadre du projet ARNICA (Veyron, 2012).

1. Le contexte théorique de la gestion de crise routière

Le cas particulier de la gestion de crise appliquée aux réseaux de transport implique de rappeler succinctement le protocole de gestion des risques en France et son application en phase de crise.

1.1. Rappels sur l'organisation des acteurs institutionnels et la gestion d'un risque naturel en France

La gestion des risques en France repose sur une politique partagée entre les services publics tels que les Ministères et les Préfets, les Collectivités Territoriales (le Maire, le Conseil Général, le SDIS, etc.) et les professionnels concernés. L'État au sens large joue un rôle central en termes de : prévention, préparation, éducation, planification des secours, réparation et retour d'expérience. Les services de l'État interviennent donc sur chaque phase de la gestion des risques (Figure 77).

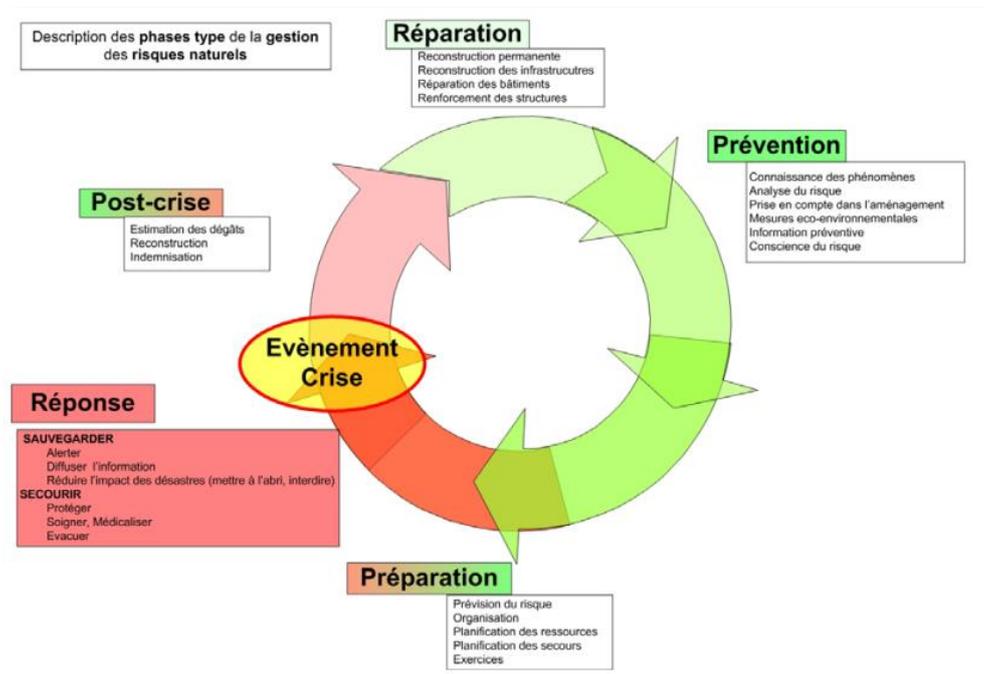


Figure 77. Phases génériques de la gestion des risques (Tacnet et Burnet, 2007)

Au cours des phases de la gestion des risques, la "crise" intervient lorsque les effets de l'évènement dépassent les capacités normales de réaction des structures chargées d'y faire face ou lors d'une défaillance du système. 3 étapes distinctes jalonnent la crise : sa

préparation, sa gestion et sa réparation. La 1^{ère} a pour but d'anticiper et de planifier les actions (mesures de sauvegarde, organisation des secours, mise en œuvre des moyens nécessaires), la 2^{nde} correspond à la mise en application des procédures prévues (commandement, gestion opérationnelle) et la 3^{ème} suppose le retour à la normale et sa capitalisation au moyen d'un retour d'expérience.

La gestion de crise est prise en charge par l'État selon une organisation administrative ascendante (« *bottom up* ») : chaque échelon territorial gère la crise à son niveau ne faisant appel à l'échelon immédiatement supérieur que lorsque l'envergure de la crise dépasse son territoire, comme l'illustre la chaîne de commandement du plan ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) en Figure 78. Elle suppose également la mise en place d'organisations temporaires supplémentaires (« *task forces* ») dédiées uniquement à la gestion de la crise.

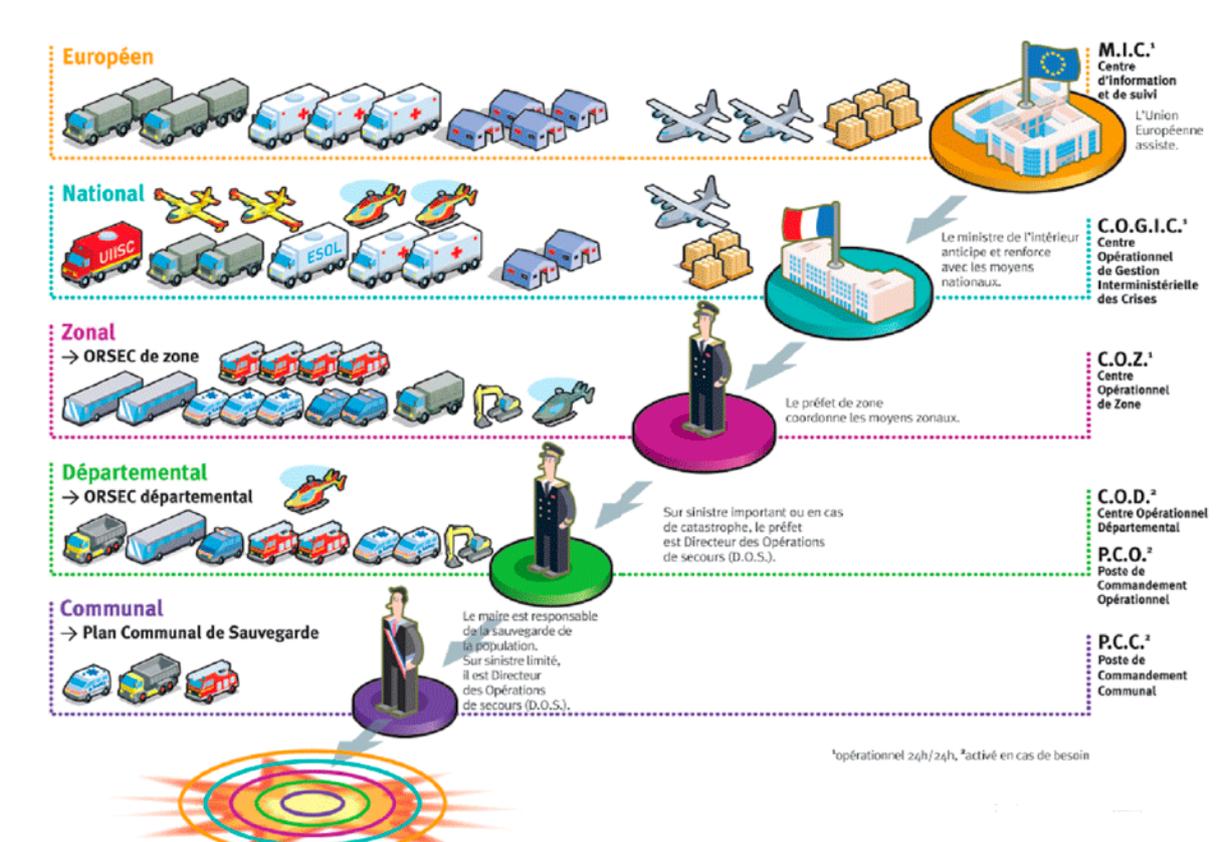


Figure 78. Chaîne de commandement du plan ORSEC (Ministère de l'Intérieur, 2012)

Le projet INTERREG ALCOTRA/PRINAT (2000-2006) a permis de dresser un organigramme des acteurs institutionnels (Darolles, 2005) ainsi que les conflits territoriaux et sociaux-culturels rencontrés par les politiques publiques en matière de gestion des risques naturels (Montredon et Granet-Abisset, 2007). Ces travaux ont été complétés par une comparaison organisationnelle des acteurs entre les 3 pays frontaliers alpins (France, Suisse et Italie) (Peltier, 2005). L'ensemble de ces études a fait apparaître la richesse des moyens techniques et logistiques mis à disposition pour la gestion des risques naturels, mais ils ont également souligné la complexité d'application réelle des plans de gestion, la multiplicité des intervenants et le manque de coordination due aux différentes manières d'appréhender la gestion du risque entre les services. Peltier (2005) cite « *l'impossible tableau des acteurs de la gestion des risques* ». Le rapport présenté par l'École Nationale d'Administration (2000) évoque aussi une certaine logique concurrentielle, une différence d'interprétation et d'application des réglementations entre les départements. Sur ce propos, Lagadec (1991, 1995) et Morel et al. (2009) proposent des supports d'aide à la décision pour la planification des actions à destination des acteurs locaux.

En termes de gestion de crise, Tacnet et Burnet (2007) proposent une représentation simplifiée de répartition des rôles décisionnels et opérationnels par groupe d'acteurs formels et informels (Figure 79). L'organigramme souligne la responsabilité du Maire au niveau communal pour l'organisation des secours et l'application des mesures de sûreté exécutées par le SDIS (Services Départementaux d'Incendie et de Secours). L'outil opérationnel à disposition du Maire est le PCS (Plan Communal de Sauvegarde) mis en application selon la réglementation du PPRN en vigueur (Plan de Prévention des Risques Naturels) (Besson, 2005). Le Maire est secondé ou remplacé par les services préfectoraux pour le pilotage des actions si la crise dépasse son rayon d'action. Dans ce cas, l'outil opérationnel à disposition correspond alors au plan ORSEC adapté au niveau d'urgence.

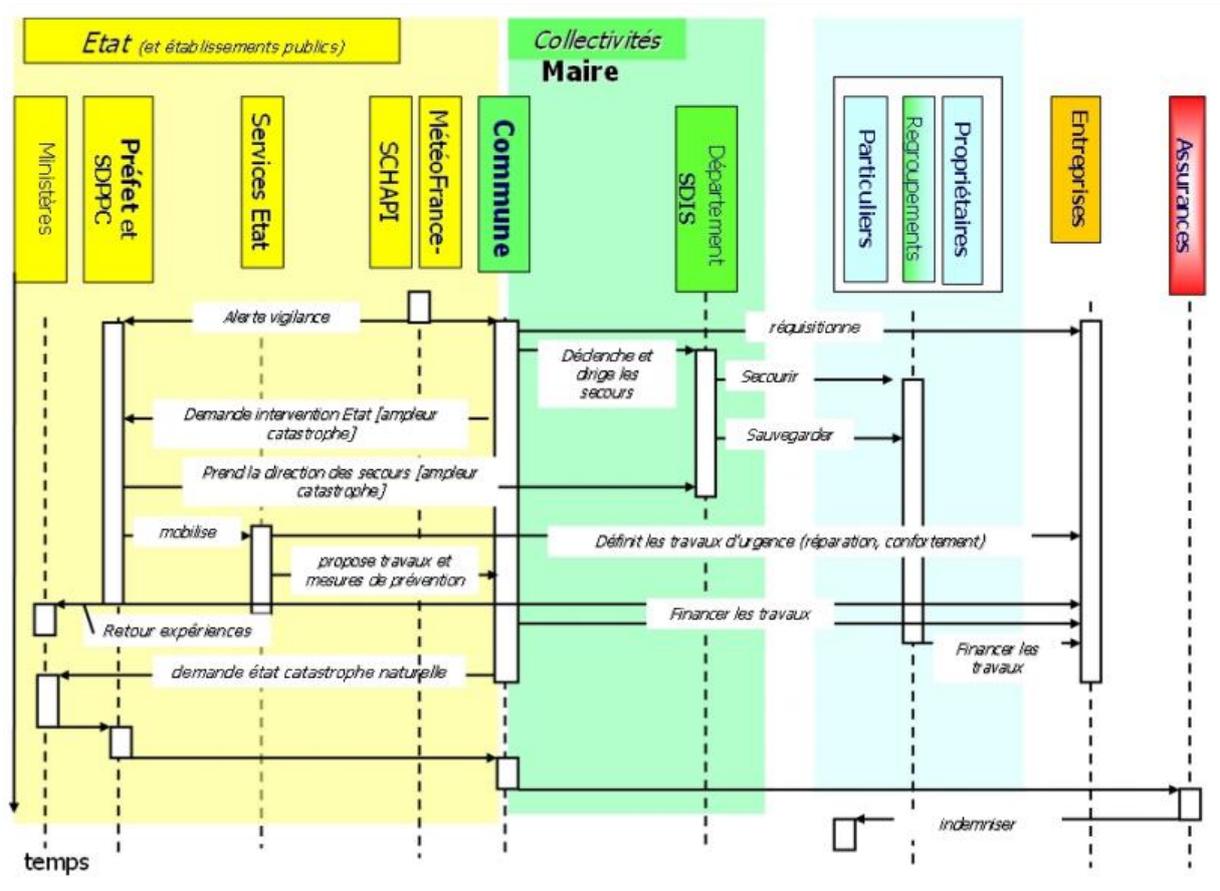


Figure 79. Représentation du circuit de gestion de crise (Tacnet et Burnet, 2007)

Néanmoins, la gestion de crise est largement axée sur l'aménagement du territoire (par extension le bâti) et/ou la sauvegarde des populations, non sur les réseaux dont les responsabilités et les intervenants sont différents. En effet, la problématique des réseaux n'est pas explicitement citée dans les politiques de gestion. Pour appuyer ce propos, le CGEDD (Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable) a publié récemment un des premiers rapports officiels traitant de la vulnérabilité des réseaux d'infrastructures exposés aux risques naturels dont un volet concerne les réseaux de transport (rapport n° 008414-01, Durville et al., 2013). Cette étude soulève plusieurs lacunes :

- i. Si l'impact des risques naturels est assez bien pris en compte au niveau des collectivités locales grâce à l'existence des PPRN, les réseaux d'infrastructures en revanche « ne font pas l'objet de dispositions spécifiques » dans ces plans.
- ii. Les PCS « traitent surtout de la sécurité des personnes et assez peu des réseaux ». Le rapport préconise « d'associer plus étroitement les collectivités territoriales,

chacune dans son champ de compétence, à la gestion des crises résultant d'aléas naturels et affectant les réseaux de transport ».

- iii. Enfin, « *Il n'existe pas réellement de véritable étude des enjeux de la vulnérabilité des réseaux. Une telle étude reste à mener* ».

Sur cette base, la compréhension des mécanismes d'action lors d'une gestion de crise routière face à un risque naturel suppose l'analyse approfondie de l'organisation des acteurs institutionnels, étayée à partir de rapports gouvernementaux.

1.2. La gestion des situations de crises routières : complexité organisationnelle et planification supposée des actions

L'article 6 de la *loi sur la modernisation de la sécurité civile* (2004) impose un certain nombre d'obligations et de continuité du service pour les réseaux et les infrastructures en cas d'évènement naturel majeur. Il y est précisé que les gestionnaires responsables doivent réaliser des diagnostics et mettre en œuvre des mesures de réduction de la vulnérabilité afin de garantir un fonctionnement minimum en cas de crise (rapport sur le rôle des acteurs de la prévention des risques naturels ; MEDAD, 2008). Mais aucune circulaire spécifique à la gestion de crise routière adaptée aux différents aléas naturels n'a pu être identifiée. Seul le rapport de l'ANENA (Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches) réalisé en 2013 rappelle que les routes relèvent de statuts différents, elles supposent donc deux niveaux de responsabilité en cas de crise : 1) la police générale (le Maire ou le Préfet) et 2) la police spéciale qui relève du gestionnaire de réseau (le Conseil Général, le Maire, le Préfet ou le privé). Le rapport recommande que l'association des gestionnaires à l'élaboration du PCS soit incontournable. La planification des actions entre ce groupe d'acteurs suppose alors de :

- i. Localiser les tronçons menacés.
- ii. Etablir un plan de fermeture échelonné dans le temps.
- iii. Maintenir un réseau minimal et des voies d'accès pour les services de sécurité.
- iv. Réfléchir aux modalités d'affichage des restrictions de circulation et de la signalisation d'urgence.
- v. Préparer l'information pour les habitants concernés.

Cependant, le rapport déclare que bien souvent « *les gestionnaires des réseaux départementaux qui, du fait de leur bonne connaissance du terrain, sont les premiers à proposer aux Maires les mesures de restriction (...) voire en situation d'urgence décident de leur fermeture ; ce sont également eux qui, une fois le risque de menace extérieure levé par décision du Maire (ou du préfet), décident de leur réouverture* ». A titre d'exemple, le protocole officiel de coordination pour la gestion du trafic de la route D1091 (2010) repose essentiellement sur la communication entre les services des Conseil Généraux des Hautes-Alpes et de l'Isère. Plus exactement, lors d'évènements "*non programmés*" (dont les aléas naturels) les interlocuteurs sont : le Poste de Commandement de Circulation ou PCC du service de la Direction des Routes et les Directions Territoriales des secteurs concernés.

Enfin, une circulaire ministérielle émise en décembre 2011 à destination des services préfectoraux, est la plus complète à ce jour quant à la gestion des situations de crise routière qu'ils soient "*programmés*" ou non et ce quelle que soit l'origine de la perturbation. En premier lieu, le rapport fait la différence entre la gestion du trafic en situation dite "*normale*" et en situation dite "*perturbée*".

En situation normale, l'exploitation du réseau et le maintien de sa viabilité reviennent aux gestionnaires routiers : 1) les Directions Interdépartementales des Routes ou DIR pour le réseau routier national non concédé, 2) les Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes ou SCA pour le réseau routier national concédé, 3) les réseaux gérés par les collectivités territoriales sont : 3.1) sous la responsabilité des services techniques départementaux, c'est-à-dire le Conseil Général pour le réseau routier départemental, 3.2) sous la responsabilité des services techniques des villes et donc du Maire pour les voies communales. L'information aux usagers est du ressort des gestionnaires mais elle peut aussi être relayée par le CRICR "*Bison Futé*" (Centre Régional d'Information et de Coordination Routière). Enfin la synchronisation des actions entre les gestionnaires routiers et les services préfectoraux est assurée par les DDT (Direction Départementales des Territoires).

Le rapport informe ensuite qu'en situation de crise routière de niveau départemental, la DDT est l'interlocuteur privilégié du Préfet de département en termes d'expertise et d'appui technique, la DDT coordonne les missions entre les acteurs en particulier les gestionnaires de réseau. Puis en cas de nécessité, le Préfet active et gère directement le Centre Opérationnel Départemental (COD) en présence du Conseil Général et de la DDT. Le même type de

démarche est adapté à l'échelon territorial zonal. La mobilisation des moyens publics disponibles et la réquisition des moyens privés reviennent au Préfet de département. En revanche, l'assistance immédiate aux populations est prise en charge par les communes concernées et le SDIS.

Ces rapports révèlent les rôles prépondérants du Préfet de département, du gestionnaire de réseau, de la DDT et du Maire en matière de gestion de crise routière. Mais s'il est relativement aisé d'obtenir des informations sur l'organisation des services administratifs et des services ministériels, il n'en est pas de même pour les agents directement responsables des activités opérationnelles (Veyron, 2012). Les rapports trahissent un manque de transparence dans la planification des actions en raison de la complexité des relations entre les acteurs et des procédures préétablies peu explicites. Si la gouvernance du territoire reste en accord avec la subdivision spatiale des unités administratives françaises, les rapports ne précisent pas à partir de quel moment l'on considère que la crise routière dépasse les limites d'un échelon territorial. En effet, contrairement au bâti, la structure d'un réseau routier et sa fonction sont multiscalaires, un réseau chevauche plusieurs unités administratives, ce qui rend difficile la pleine mesure de l'ampleur de la crise.

Pour plus de clarté, nous avons synthétisé l'ensemble des informations au sein d'un organigramme théorique de gestion de crise routière adaptée à un événement naturel à l'échelle départementale (Figure 80).

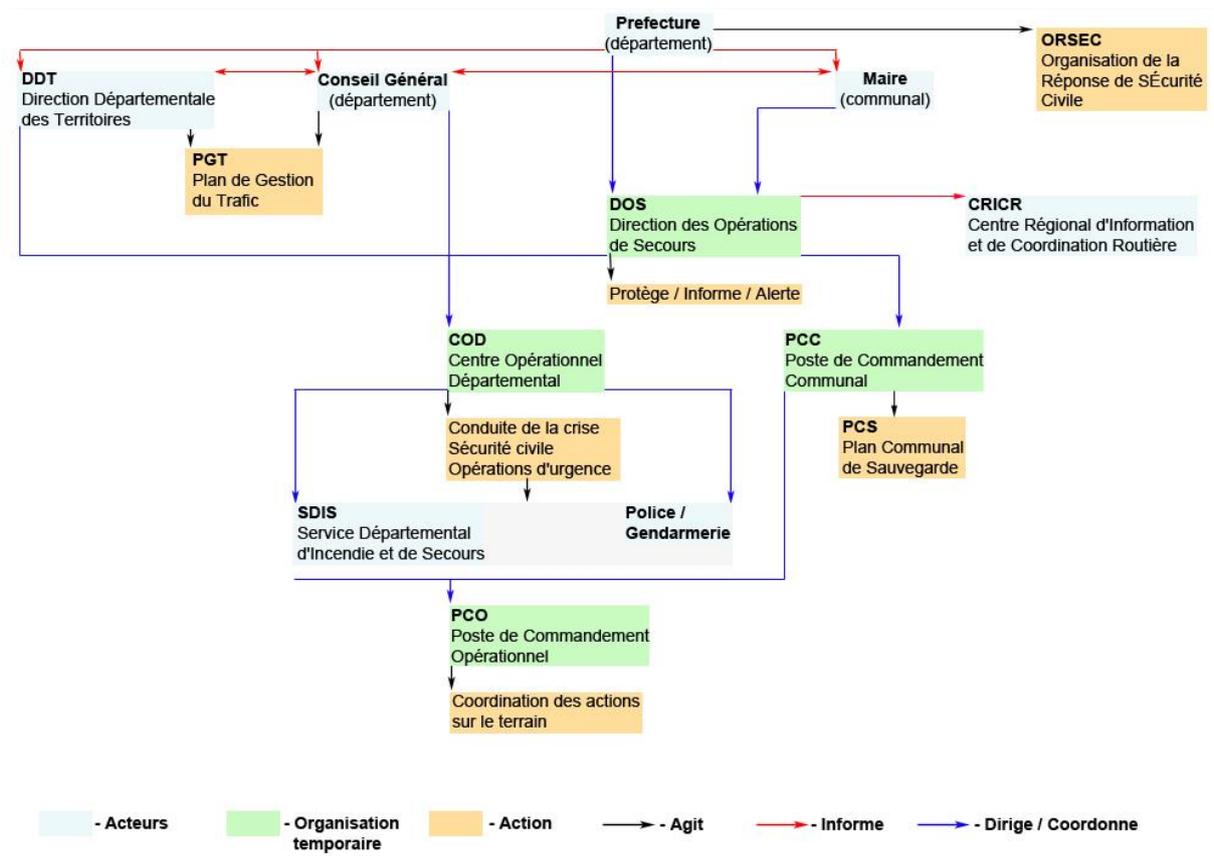


Figure 80. Organisation décisionnelle supposée par les collectivités territoriales en cas de dangers naturels impactant le réseau routier en France

Quelle que soit l'échelle spatiale impliquée, les services publics restent au cœur du processus décisionnel bien que la gestion complète de la circulation semble surtout être sous la responsabilité de la préfecture de département (Veyron, 2012). Ce type de régime de gestion de crise se base également sur la création d'organisations temporaires dont les actions sont consacrées à la résilience du système. Ces groupes de travail réunissent temporairement les parties prenantes de chaque service : Le DOS est le plus souvent dirigé par le Maire, le Préfet en a la charge lorsque l'évènement dépasse l'échelon communal et/ou nécessite la mise en place du plan ORSEC. Il décide des orientations stratégiques et valide les actions proposées par le COD. Le COD rassemble les représentants de l'ensemble des services déconcentrés de l'Etat et les collectivités territoriales. Il conduit les actions pour régler la situation de crise. Le PCO est situé au plus près du sinistre, il est chargé de coordonner les différents acteurs sur le terrain et les opérations selon les axes stratégiques définis par le COD. Le PCC doit répondre aux problématiques communales dans le cadre du PCS en liaison avec le COD et/ou le PCO.

Ce type de graphique fournit certes des informations sur la hiérarchie des autorités et leurs stratégies d'action mais peu de détails sont donnés sur le temps nécessaire à la planification des actions ou sur l'organisation des missions exécutives. Malgré les nombreuses informations provenant des sources gouvernementales, le processus d'alerte, les modes de communication (entre les services, la population), les modes d'intervention réels sur le réseau et le temps nécessaire à la résorption de la crise restent insuffisants (Donze, 2007).

Enfin, le RTM, « opérateur » spécialisé auprès de l'ONF n'apparaît pas dans les organigrammes de gestion de crise. Pourtant il a pour mission d'enregistrer les événements et d'apporter un concours « *technique et méthodique aux organismes sur tous les risques naturels* » (ONF, 2012).

1.3. Diagnostic préventif et plans de gestion de trafic

En situation perturbée, l'administration se distingue par deux phases : la préparation de la crise et sa gestion. Le point important de la phase préparatoire consiste à l'élaboration et à l'actualisation d'un PGT (Plan de Gestion du Trafic) désigné comme « *l'instrument majeur de prévention et de gestion des crises routières* ». Il s'agit de mesures d'exploitation d'urgence (délestage du réseau principal, itinéraires alternatifs, interdictions de circulation, information au public et aux professionnels des transports routiers, etc.) pouvant s'appuyer sur le plan ORSEC. Au niveau départemental, cette charge revient aux gestionnaires routiers assistés par les DDT et sous autorité du Préfet de département. A l'échelle interdépartementale, c'est le Préfet de Zone qui valide le PGT assisté de la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), en liaison avec le CRICR.

Soulignons que bien souvent, la surveillance des conditions de circulation reste à la charge du gestionnaire de réseau. C'est pourquoi, le Conseil Général, actuel gestionnaire du réseau départemental, dispose d'une échelle d'intensité reposant sur une grille de notation visant à estimer la vulnérabilité du réseau départemental en cas d'évènement naturel non programmé. Ainsi dans la rubrique *Enjeux Généraux*, une valeur est attribuée à l'ensemble du linéaire routier selon la catégorie administrative, la valeur stratégique pour le territoire et selon l'allongement de la distance de parcours en cas de déviation (Tableau 36). Pour autant

les critères de notation se focalisent sur la valeur économique du linéaire affecté et moins sur les contraintes d'accessibilité.

Tableau 36. Critères de notation des enjeux généraux en vue d'estimer le degré de vulnérabilité du réseau départemental (CG05, 2011)

Enjeux généraux			Points
Catégorie RD			
Itinéraire stratégique	Grand Axe Economique (GAE)	MJA \geq 5000 VL	7
		5000 < MJA < 3000 VL	6
		MJA \leq 3000 VL	5
	Réseau d'Intérêt Touristique Majeur (RITM)	MJA \geq 2000 VL	6
		MJA \leq 2000 VL	5
Réseau structurant	Réseau primaire Périurbain (RPP)		5
	Réseau de Désenclavement du Milieu Rural (RDMR)		4
Réseau secondaire	A Vocation Touristique Saisonnière (RSVTS)		3
	De desserte Locale (RSDL)		2
Délaissé servant de parking			1
Délaissé			0
Déviaton - allongement de la distance de parcours			
Déviaton impossible avec contraintes de desserte locale			3
Déviaton impossible sans contrainte particulière			2
\geq 30 km			2
30 km < d < 10 km			1
\leq 10 km			0
Plus-value déviaton impossible PL et/ou transport scolaire			1
Note maximale			10

Dans la rubrique *Enjeux Détaillés*, les critères de notation servent à identifier les enjeux routiers liés directement à l'endommagement physique (Tableau 37). Cette grille vise surtout à anticiper les conditions de circulation locales que ce soit au niveau de la fluidité du trafic, des possibilités de stationnement que des conditions accidentogènes. La situation la plus défavorable correspondant à l'interruption de circulation dans les deux sens.

Le facteur humain est également pris compte puisque le critère de visibilité évalue la distance de freinage d'un véhicule et le temps de réaction de l'utilisateur face à l'obstacle. De même, ce critère prend en compte le temps nécessaire au conducteur pour s'adapter à la situation d'urgence afin de modifier sa trajectoire. En revanche, les critères visant à évaluer l'endommagement des matériaux restent mineurs.

Tableau 37. Critères de notation des enjeux détaillés en vue d'estimer le degré de vulnérabilité du réseau départemental (CG05, 2011)

Enjeux détaillés	Points
Circulation³ : nombre maximal de véhicules pouvant être engagés dans la zone menacée par un aléa	
>= 40 VL (100 ml)	4
20 VL (50 ml) < N < 40 VL (100 ml)	3
40 VL (10 ml) < N < 20 VL (50 ml)	2
<= 4 VL (10 ml)	1
Plus-value créneau de dépassement	1
Stationnement – arrêt	
Présence d'une zone de stationnement, d'un parking ou d'une aire d'arrêt signalée	2
Présence d'un délaissé pouvant servir d'arrêt ou de stationnement	1
Présence d'un arrêt de car	1
Pas de stationnement, d'arrêt possible dans la zone menacée	0
Visibilité⁴ : distance d'arrêt ou d'adaptation du comportement (évitement)	
Insuffisante : pas le temps de s'arrêter ou d'éviter un obstacle (d <= 50-75 ml)	2
Médiocre : juste le temps de modifier son comportement (50-75 ml < d < 130-150 ml, à 90 km/h)	1
Bonne : arrêt possible (d >= 130-150 ml à 90 km/h)	0
Cyclistes et Piétons	
Présence de cyclistes (surlageur cyclable ou multifonctionnelle, itinéraire vélo CG) et/ou de piétons (cheminements, passages piétons, zones urbanisées à proximité...)	1
Passage de cyclistes et/ou piétons non favorisé (pas d'aménagement spécifique, pas d'itinéraire reconnu), ce qui n'exclut toutefois pas leur présence	0
Ouvrages d'art	
Présence d'ouvrage (soutènement, pont, muret...) pouvant être détruit	1
Présence d'ouvrage pouvant être endommagé	0,5
Note maximale	10

Effectuées au cours d'une étude préliminaire, ces informations permettent d'apprécier qualitativement la vulnérabilité d'un linéaire routier, éléments que nous détaillerons en chapitre 6.

2. Méthodes d'investigation

Les méthodes d'investigation se concentrent sur la préparation des entretiens auprès des groupes d'acteurs formels de la gestion de crise mais aussi sur l'analyse préalable des données d'archives sur les événements mise à disposition par les acteurs informels.

2.1. Les acteurs informels

En complément des sources gouvernementales, les acteurs informels tels que les médias peuvent présenter un réel intérêt pour l'acquisition d'informations moins conventionnelles sur la zone impactée et sur l'estimation des dommages. Souvent présents pendant ou après la crise, les propos rapportés permettent de « *changer d'angle* » et d'obtenir une lecture différente des événements (Veyron, 2012).

Dans le cas présent, la presse écrite locale reste la plus accessible, les informations doivent cependant être interprétées avec réserve, comme l'illustre la Figure 81.



Figure 81. Coupure de presse, édition du Dauphiné Libéré du 13 juillet 2008

En effet, l'article issu d'un journal quotidien rapporte les dégâts occasionnés sur le réseau routier lors d'un évènement du Rif Blanc avec photographie à l'appui. Certes il fournit des informations importantes sur : le déroulement des opérations, les contraintes imposées aux usagers, il révèle le Conseil Général comme acteur clé et renseigne sur le coût probable des travaux. Mais des erreurs sont transmises au public puisque la route endommagée n'est pas la RN94 mais la RD1091, son changement de statut n'a pas été pris en compte. De même l'origine du phénomène n'est pas clairement identifiée, seuls les mots « débris », « rochers », « crue » et « intempéries » informent sur le type d'aléa. Lors de l'évènement de 2010 illustré en Figure 82, le même journal permet de connaître : l'heure de l'évènement, les surfaces linéaires endommagées, il renseigne sur la provenance des services de secours mobilisés, il relate la présence du Conseil Général sur les lieux et le temps approximatif de la coupure. La photographie atteste du lieu et permet de visualiser l'ampleur des dommages. Mais le phénomène et son déclenchement ne sont pas clairement identifiés : « coulée de boue », « coulée intervenue sans raison apparente ».



Figure 82. Coupure de presse, édition du Dauphiné Libéré du 1er juin 2010

Enfin en 2012 (Figure 83), l'article indique précisément le lieu, les heures de perturbation routière, quelques informations sont fournies sur le déroulement des opérations et les principaux services mobilisés. L'article renseigne également sur les conditions météorologiques probablement à l'origine de l'évènement et le nombre de coulées. Mais la photographie ne fournit aucune information tangible.

CIRCULATION La RD 1091 momentanément coupée hier après-midi

Coulée de boue dans le Lautaret

LE MONÉTIER-LES-BAINS

La circulation routière a dû être interrompue hier sur la RD 1091. Une coulée de boue a entravé la chaussée vers 11 h 45 sur la route du col du Lautaret, au niveau du tunnel du Rif blanc, commune du Monétier-les-Bains. Les gendarmes ont bloqué l'accès à partir du hameau du Lauzet, le temps que les services techniques du conseil général des Hautes-Alpes ne dégagent la chaussée.

À 17 h 15, l'axe a rouvert en alternat.

En raison de fortes pluies dans la nuit de dimanche à lundi, une première coulée de boue s'était produite au même endroit vers 5 h du matin, mais la circulation routière avait pu se poursuivre. □



Entre 12 h et 17 h hier, la circulation a été coupée sur la RD 1091 après une coulée de boue au niveau du tunnel de Rif blanc Le DU/Pascal MARTEL.

Figure 83. Coupure de Presse, édition du Dauphiné Libéré du 5 juin 2012

Les trois articles évoquent la réouverture progressive de la route sous-forme d'alternat de circulation. En revanche, ils ne précisent pas quelles sont les autorités compétentes responsables de la gestion des évènements. Le déroulement des opérations reste flou puisque qu'aucun article n'est standardisé dans la manière de restituer les informations. Selon Veyron (2012), ils offrent toutefois un aperçu des évènements mais basé davantage sur un avis personnel et son ressenti.

Les médias audio tels que les radios n'ont pas été pris en compte du fait qu'il n'existe pas d'enregistrement disponible aux dates des évènements.

En complément des renseignements journalistiques, nous avons recueillis un certain nombre d'informations davantage orientées sur le recensement des évènements grâce aux archives municipales et départementales. Les associations privées tels que la Société Géologique et Minière du Briançonnais (SGMB) et la Cinémathèque d'Images de Montagne (CIM) permettent également d'enrichir les données au moyen d'ouvrages et de films orientés sur les risques naturels. Mais ces documents, surtout destinés à la valorisation du patrimoine ne se sont pas révélés probants dans l'objectif de mieux connaître le processus de gestion de crise routière.

2.2. Travail préparatoire et attendus des entretiens auprès des acteurs de la gestion de crise

Deux missions de terrain ont été effectuées en vue de rencontrer les différents acteurs territoriaux: la première antérieure à l'évènement s'est déroulée en mai 2012. La seconde s'est déroulée en juin 2012 soit une dizaine de jours après l'évènement du Rif Blanc. Bénéficiant de cet évènement dommageable très récent, la seconde mission a permis d'analyser la gestion de crise à l'instant T , sur la base d'un recueillement d'informations détaillé puisque encore vives dans les esprits. Le fait de nous rendre sur place et de rencontrer les agents préalablement identifiés devait nous permettre de réajuster notre vision de la gestion de crise (Veyron, 2012). Aussi ces rencontres devaient permettre : 1) de décrypter les modes de gestion opérationnelle tel que les stratégies et les mesures réellement adoptées, 2) de préciser les rôles et missions de chaque groupe d'acteurs précédemment identifiés, 3) de mieux comprendre les relations entre les acteurs et les enjeux sous-jacents 4) de renseigner sur la capacité de résilience du territoire affecté.

2.2.1. Enquête par entretien semi-directif

Selon Berthier (2010), l'enquête au sens littéral est « *une technique de collecte d'informations par interrogation systématique des sujets d'une population déterminée* ». Cette méthode présente l'avantage : d'évaluer les effets d'une ou de plusieurs actions et de connaître le comportement et l'état d'esprit adoptés par les administrés lors d'une situation de crise. C'est aussi l'opportunité de tester les hypothèses de départ (Thompson, 1980).

Nous avons privilégié une enquête plutôt qualitative que quantitative basée sur une structuration minimum et un nombre réduit d'enquêtés que nous détaillerons ensuite. Les questions étaient préparées pour chaque étape de la gestion de crise, en suivant un fil directeur sans pour autant être standardisées. Seules les questions les plus cruciales étaient imposées pour collecter des données sur certains points essentiels. Bien que défini à l'avance, le thème restait ouvert afin de bénéficier de la libre expression du répondant.

Parmi les techniques d'enquête existantes, nous donc avons choisi de réaliser des entretiens semi-directifs permettant une interaction plus spontanée et moins formelle avec

les personnes interrogées (Mei, 2013). En effet, les discours recueillis ne sont pas provoqués ni fabriqués par la question mais construits par le processus interlocutoire (Blanchet et Gotman, 2000). A partir d'un guide d'entretien partant du général vers le particulier, la validité dudit entretien suppose une bonne compréhension des questions posées et la clarté des réponses formulées (Suchman et Jordan, 1992). Exercice rendu parfois difficile dans le cadre de protocoles techniques complexes à décrypter et les différences d'interprétations inhérentes aux fonctions occupées par l'enquêteur et les personnes interrogées. La flexibilité permise dans la conduite d'entretien semi-directif apporte également des éléments intéressants hors du domaine de compétence des enquêtés.

2.2.2. Entretien avec les acteurs clés

Nous avons suivi la méthode d'obtention des échantillons représentatifs dite en tirage par groupe : les sondés partagent un lien professionnel, ce qui évite la dispersion des sujets à interroger. Leur diversité réside dans la fonction occupée par les personnes, ce qui apporte des informations spécifiques par corps de métier et/ou service (Blanchet et Gotman, 2000). Précisons cependant que pour certaines institutions, nous n'avons pu rencontrer qu'un seul représentant. Nous avons également limité les sondés au département des Hautes-Alpes en cohérence avec le secteur impacté.

Les modes d'accès aux interviewés étaient directs puisque la grande majorité des acteurs ont été contactés au préalable par téléphone ou par email. En revanche, lors des entretiens sur place, nous avons parfois été mis en relation avec d'autres services au sein de la même institution lorsque la personne du service initialement contactée ne pouvait répondre à certaines questions.

Les enquêtes de terrain ont été réalisées sur une courte période en fonction de la disponibilité des professionnels. Nous avons donc dû opérer un choix dans l'ordre des entretiens, selon le corps de métier et selon l'échelon territorial. Cette difficulté a été en partie comblée par nos recherches préliminaires, nous permettant d'identifier les missions de chacun et d'anticiper les possibles lacunes lors des entretiens (Veyron, 2012).

En mai 2012, les entretiens ont été effectués auprès des élus locaux, des représentants des services d'intervention civile et des acteurs informels, en juin 2012, nous avons été reçus par les gestionnaires de réseau et par le service RTM (Tableau 38).

Tableau 38. Organismes rencontrés lors des entretiens

Date de l'entretien	Organisme contacté	Service ou personne enquêté	
Mai 2012	Mairies de Briançon et de Môtérier-les-Bains	Les responsables des services techniques et du service voiries	
	Brigade de Gendarmerie de Haute Montagne (BGHM) de la commune de Saint-Chaffrey et le Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne (PGHM)	Le Major commandant	
	Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS)	Les sapeurs-pompiers de garde du Groupement Nord du SDIS de Briançon	
	Archives municipales	Le service des archives municipales de Briançon	
	Pays du Grand Briançonnais (PGB)	La chargée de mission des risques naturels	
	Société Géologique et Minière du Briançonnais	Le président	
	Cinémathèque d'Images de Montagne (CIM)	-	
	Journal Le Dauphiné Libéré	Le service publication et communication	
	Juin 2012	Conseil Général des Hautes-Alpes	Service Entretien et Exploitation de la route Service Eau et Environnement Service Ingénierie des Investissements
		Agence Territoriale Nord	Le responsable du Pôle Route
Direction Départementale Technique		Service Sécurité et Risques Service Défense et Gestion de Crise	
Office National des Forêts (ONF)		Service de Restauration des Terrains de Montagne (RTM)	

En revanche, nous n'avons pas pu rencontrer ni les services de la sous-préfecture ni les services de la préfecture en raison d'absence de disponibilité. Nous n'avons pas pu rencontrer d'entreprises de transport routier circulant dans le département. Enfin, nous n'avons pas pu rencontrer la DIR Méditerranée, responsable du réseau routier national pour le sud-est de la France.

2.2.3. Questions posées et hypothèses de départ

Nous avons établi plusieurs hypothèses afin d'ajuster notre diagnostic de la gestion de crise routière lors des entretiens :

- i. Le maintien d'une organisation verticale des autorités selon les échelons administratifs français.
- ii. Les opérations sont sous la responsabilité des services locaux appuyées par les services départementaux.
- iii. La mobilisation des ressources humaines et matérielles pourrait être spécifique aux interventions dues à des événements naturels, en particulier lors des avalanches et dans une moindre mesure aux laves torrentielles.
- iv. Les parties prenantes sont très dépendantes de la viabilité du réseau routier et de son entretien, particulièrement lors de la saison touristique.
- v. La probabilité d'enclavement d'une partie du territoire est une préoccupation importante pour les acteurs locaux.

Puis les entretiens ont porté sur les étapes clés de la gestion de crise (Tableau 39). Au travers des questions posées, nous cherchions également des éléments de réponse sur la perception des acteurs liée à la réalisation d'un événement naturel et à la manière dont ils en traitent les dommages et leurs conséquences. Les entretiens devaient également révéler si la gestion de crise routière revêt une dimension multiscalaire, en clair si les actions se concentrent uniquement à la résorption des dommages structurels sur le lieu d'impact ou bien si elles portent sur l'ensemble des perturbations fonctionnelles engendrées sur le réseau routier.

Tableau 39. Thèmes abordés lors des entretiens auprès des acteurs-clés

Thèmes	Questions
Alerte	Comment les acteurs sont informés de l'évènement ? Quels sont les systèmes d'alerte ?
Chaîne décisionnelle	Leurs rôles respectifs en termes de prise de décision / d'intervention
Modes d'intervention	Le temps de mobilisation sur place après le déclenchement de l'évènement Quels sont les moyens mobilisés sur le terrain pour la gestion de la circulation et du déblaiement ?
Communication	Quels sont les canaux d'information mis à disposition du grand public et des professionnels routiers vis-à-vis des perturbations ?
Coopération	Existe-il des protocoles de coopération pour la gestion du trafic routier entre les différents gestionnaires routiers ? Existe-il des accords spécifiques avec les départements limitrophes et les pays frontaliers ?
Solutions alternatives	Quelles sont les déviations possibles et conseillées par les services en cas de coupure du réseau ? Comment sont-elles mises en place ?
Archivage/ Retour d'EXpérience	Les données de l'évènement sont-elles archivées après résorption de la crise, comment et par qui ? Existe-il un REX ?

Certaines informations étant sensibles, nous avons conscience que tous les documents n'étaient pas communicables ou que les acteurs puissent refuser de partager leur expérience personnelle. De même, les entretiens requièrent de déchiffrer les enjeux relationnels sous les stratégies officielles, comme les passifs politiques et les remaniements administratifs qui peuvent entraîner des conflits entre les services.

Ces étapes préliminaires de recueil d'informations nous ont permis de cibler les acteurs clés de la gestion de crise routière et de clarifier la lecture de la chaîne décisionnelle territoriale (Veyron, 2012). A sa suite, l'enquête de terrain post-évènement doit permettre de confirmer ou d'infirmer cette organisation et de préciser les modes de gestion opérationnels de la crise routière.

3. La gestion de crise routière selon les acteurs opérationnels : l'exemple du 4 juin 2012

3.1. Chronologie de l'évènement torrentiel du 4 juin 2012

3.1.1. Compte-rendu général des entretiens

A l'écoute des différents intervenants, l'évènement torrentiel sur le Rif Blanc a lieu le matin du 4 juin 2012 avec une première coulée vers 5h-5h30 du matin puis une seconde vers 10h30. Celles-ci provoquent la coupure de la D1091 par recouvrement et obstruction de la chaussée, le tunnel adjacent est également comblé par environ deux mètres de matériaux, rendant toute circulation impossible.

L'évènement est signalé par un appel privé auprès de la gendarmerie dans la demi-heure qui suit l'évènement. L'appel est ensuite relayé par le SDIS vers le cadre de permanence qui transmet à son tour l'information au responsable du local technique du Conseil Général des Hautes-Alpes en vue d'une intervention d'urgence. L'équipe technique est intervenue environ 30 minutes après le 1^{er} appel pour une sécurisation immédiate de la zone via la mise en place d'une signalisation mobile de part et d'autre de la coupure. Puis, la gendarmerie a eu pour rôle la gestion et le contrôle de la circulation locale depuis les secteurs de la Grave et du Lauzet. Pendant ce laps de temps, l'information a été transmise auprès des autres services du Conseil Général qui en ont informé à leur tour la DirMed et le Conseil Général de l'Isère.

La gestion de l'information auprès du grand public s'est diffusée grâce à l'utilisation de PMV (panneaux à message variable) et le site web en temps réel « *InfoRoute* » du Conseil Général des Hautes-Alpes. Toutefois, nous ne disposons pas d'informations sur son heure de diffusion. Les poids lourds ont été informés depuis Grenoble et/ou Lyon. L'application de la procédure de déviation a été mise en place par les Conseils Généraux des Hautes-Alpes et de l'Isère, l'itinéraire de substitution passe prioritairement par la ville de Gap pour l'axe Grenoble-Briançon.

Sur place, les opérations de déblaiement ont été effectuées par l'équipe technique assistée d'entreprises locales de travaux publics expressément mobilisées par le Conseil Général. Lors de l'intervention, la seconde coulée a de nouveau entraîné la coupure du réseau. Les opérations ont ensuite visé à dégager prioritairement le tunnel permettant le

rétablissement partiel de la circulation vers 17h. La durée totale de la coupure est estimée entre 8h et 9h. L'alternat de circulation via des feux de signalisation s'est prolongé pendant près d'une semaine, le temps des travaux de réfection.

Les coûts de déblaiement (enlèvement de la boue, dérivation du torrent) et de remise en circulation sont estimés à 25 000 euros dont 16 000 euros uniquement dédiés au déblaiement selon les services du Conseil Général des Hautes-Alpes.

Il est rapporté que la coupure du réseau a sensiblement posé des problèmes immédiats pour une entreprise de travaux publics située à Villar-D'Arène en raison de l'impossibilité d'accès pour les camions sur le chantier. L'entreprise enregistre des coûts d'immobilisation du matériel roulant et un manque à gagner dû au prolongement des travaux. Des plaintes ont également été enregistrées par des professionnels du tourisme en ce début de période estivale.

3.1.2. Reconstitution du processus décisionnel et des modes d'intervention lors de la gestion de crise routière

L'entretien auprès des acteurs immédiatement après l'événement nous a permis de comparer les modes de gestion de la crise routière avec les informations fournies par les sources gouvernementales. Outre l'identification des acteurs clés, cette étape a permis de reconstruire l'enchaînement des processus décisionnels et d'intervention lors d'un événement lave torrentielle dommageable au réseau routier départemental (Figure 84). Elle répond également à la question de la responsabilité des actions entre les acteurs, les canaux de communication employés ainsi que leur degré de réactivité face à la survenue d'un événement non programmé.

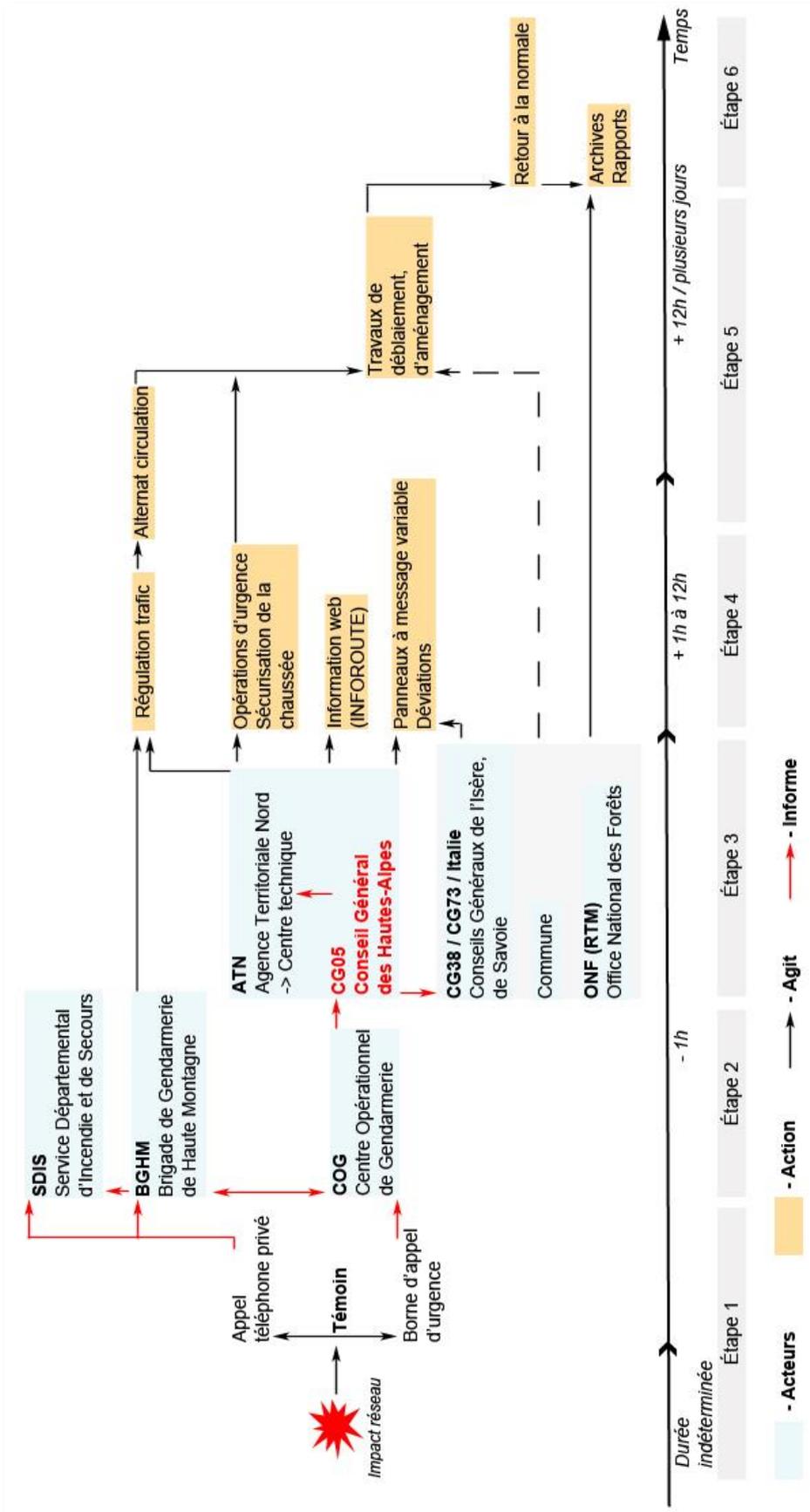


Figure 84. Gestion de la crise selon les acteurs d'un événement lave torrentielle impactant le réseau routier départemental

L'alerte est le plus souvent donnée par un témoin (un usager par exemple), soit depuis un téléphone portable, soit depuis une borne d'appel d'urgence. Dans le cas il s'agissait de la 1^{ère} option. L'appel est ensuite orienté vers les numéros d'appel d'urgence publique, tel que le SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) ou la Gendarmerie.

Cependant le SDIS (basé à Gap) ne demande à ses équipes d'intervenir sur le terrain qu'en cas d'atteinte physique aux personnes et aux biens, comme ce fut le cas en 2008 où un véhicule et ses occupants se sont retrouvés piégés dans la coulée. Dans ce cas, l'information fût relayée auprès du Centre d'Incendie et de Secours situé sur la commune affectée. Pour le Rif Blanc localisé sur la commune de Monétier les Bains, il s'agit du CIS (Centre d'Incendie et de Secours) de la station de Serre Chevalier.

Pour toutes les autres situations, l'information est centralisée par le COG (Centre Opérationnel de Gendarmerie). Implanté dans les chefs-lieux de chaque département (ici Gap), leur rôle est d'assurer une veille téléphonique permanente en ce qui concerne les «*domaines (...) de l'ordre et de la circulation routière*» ainsi que des «*services d'urgence*» et d'appuyer «*l'intervention des unités de terrain*» (Ministère de l'Aménagement et du Développement Durable, 2008). La procédure est enclenchée sur le terrain par la Brigade de Gendarmerie, en l'occurrence la BGHM qui a pour mission de baliser le périmètre de la chaussée impactée et de mettre en place un service de régulation du trafic routier. Le COG se charge également de transmettre l'information aux acteurs concernés.

En parallèle, le CG05 (Conseil Général des Hautes-Alpes), responsable du réseau routier départemental est directement intégré dans le processus décisionnel. Organe central de la gestion de crise, son rôle est multiple :

- i. Il informe et délègue la procédure d'intervention à l'Agence Territoriale Nord (zone du Briançonnais). Cette organisation territoriale représente l'antenne locale en appui des services du Conseil Général. Il existe trois agences au sein du département réparties par zone géographique (Nord, Centre et Sud). Leur mission est « *d'assurer la coordination, la veille technique et la correspondance avec les directions thématiques du siège du Conseil Général à Gap (infrastructures, bâtiments, transports, etc.). (...) Elle a également pour rôle de coordonner les Maisons Techniques sur le terrain* » (Site du Conseil Général des Hautes-Alpes). Les Maisons Techniques quant à elles (situées sur les communes de La Grave et de Briançon pour la vallée de la Guisane) ont pour compétence la surveillance régulière du réseau grâce à des équipes de patrouilles

mobiles. Elles interviennent par exemple pour le déneigement des routes, l'entretien et la réparation de la chaussée et/ou des ouvrages d'art (ponts, murs de soutènement, systèmes d'évacuation des eaux pluviales, etc.). Elles sont donc parmi les premières informées en cas de dysfonctionnement du réseau routier, mais également les premières à intervenir sur le site pour sécuriser et viabiliser la route endommagée. Elles interviennent également dans la mise en place de la régulation de la circulation routière aux côtés de la gendarmerie. En interne, tous ces intervenants sont en étroite relation de manière permanente. Le déblaiement des voies est assisté par des entreprises de BTP dépêchées sur place par un système d'appel d'offre proposé par le Conseil Général.

- ii. Le CG05 met à disposition auprès du public un service d'information et de diffusion en temps réel de la situation routière du réseau départemental via le site web *InfoRoute*. Disponible sous plusieurs supports de communication pour toucher le maximum d'utilisateurs, ce service intègre différents outils comme les caméras routières fixes et les panneaux à messages variables ou PMV. Outre un rôle informatif, ce dispositif a pour but la prévention et l'anticipation auprès des usagers du réseau routier. Visiblement, dans le cas du Rif Blanc l'information des PMV s'est affichée depuis les villes de Grenoble et de Briançon. Ce service de signalisation automatique existe également en correspondance avec l'Italie, sous le nom d'*Infomobile* et disponible dans la langue des deux pays.
- iii. Dans le même temps, le CG05 contacte ses homologues limitrophes de l'Isère et de la Savoie pour la gestion interdépartementale du réseau via des protocoles de collaboration préétablis. Bien que la communication entre ces organismes soit effective quel que soit l'importance de l'évènement, cette démarche s'applique en particulier lors de la mise en place des itinéraires de contournement en cas de coupure du réseau principal. L'équivalent du service *InfoRoute* en Isère est appelé *ItinIsère*. Le CG05 informe également la DirMed (La Direction Interdépartementale des Routes Méditerranée) de la situation. De même, le Maire de la commune concernée est averti de la situation.
- iv. A la suite de l'évènement, le CG05 établit une « *fiche évènement* » ayant pour but d'archiver et de répertorier le phénomène physique ainsi que les conséquences provoquées par celui-ci. Le CG05 à l'image de certains services d'Etat peut également

effectuer une campagne de photographies aériennes dans le but de conserver une mémoire visuelle de l'évènement.

Enfin, le service RTM (Restauration des Terrains de Montagne), branche de l'ONF est alerté au cours de l'évènement bien qu'il intervienne plus généralement sur des phases de pré et post-évènement. Informés en interne, les agents territoriaux peuvent se rendre sur les lieux pour étudier l'activité torrentielle et préparer d'éventuels travaux d'ouvrage. Les observations techniques sont collectées en vue de l'archivage d'une fiche descriptive synthétique de l'évènement torrentiel.

Cet organigramme met en avant le rôle central et prépondérant du Conseil Général en tant que gestionnaire de réseau dans la chaîne opérationnelle mobilisée pour le département des Hautes-Alpes. Le CG05 intervient systématiquement dans chacun des thèmes abordés au cours des entretiens que ce soit pour la gestion de crise, la maintenance du réseau routier et la gouvernance du territoire associé à ce réseau. Ce constat biaise l'idée d'une organisation verticale des services de l'Etat, puisque l'on note l'absence des acteurs habituellement au cœur de la gestion de crise, comme le Maire et le Préfet. Il en va de même pour le service de Restauration des Terrain de Montagne habituellement en charge d'établir un rapport technique de l'évènement. Ce constat peut s'expliquer par les lois de décentralisation de 2004-2005 qui transfèrent les compétences aux collectivités pour l'aménagement du territoire et le service de transport.

3.2. Planification des actions en vue d'assurer la continuité du service

3.2.1. Étude de cas : l'alternat de circulation

Dans le cas du torrent du Rif Blanc, la configuration particulière de la route départementale D1091 permet en général d'éviter une coupure totale du trafic routier. Lors d'une perturbation majeure, le tunnel adjacent doit en théorie permettre de maintenir un certain niveau de circulation. Le passage dans la galerie étant en sens unique, il nécessite la mise en place un système d'alternat de la circulation par feux tricolores, le trafic est donc fortement ralenti mais pas totalement interrompu (Figure 85). La condition sinequanone à cette alternative étant l'accessibilité et la sécurisation du tunnel.

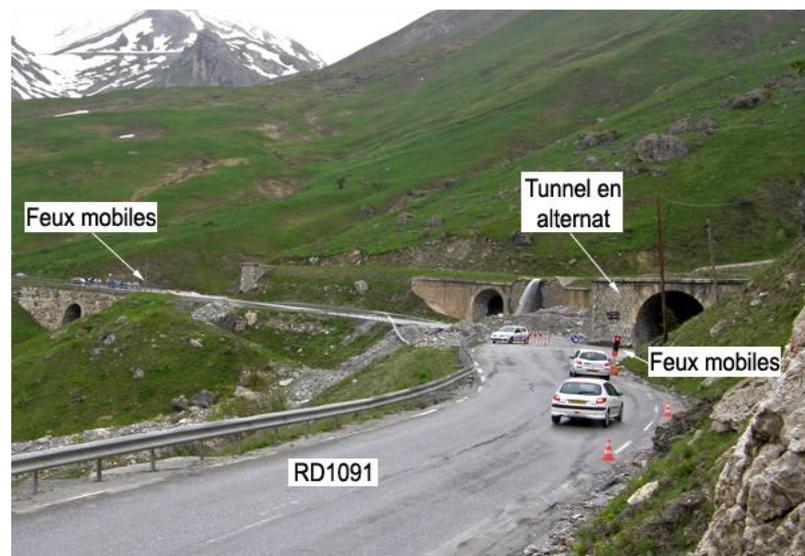


Figure 85. Circulation en alternat sur la route départementale D1091 au tunnel du Rif Blanc lors de l'évènement du 4 juin 2012 (photo : CG05)

Toutefois, au regard des évènements passés, dans plus de la moitié des cas la coulée a envahi la galerie du tunnel routier (rappelons que les hauteurs relevées sur place étaient supérieures à deux mètres le 4 juin 2012), le rendant impraticable. Cette obstruction par les matériaux est facilitée par la présence des fenêtres d'ouverture du tunnel le long de la chaussée principale. Les objectifs de substitution prévus initialement par les gestionnaires de réseau sont donc inefficaces dans ce cas de figure. Pour cette raison, les services du CG05 déblaient en priorité la galerie de cet ouvrage afin de résorber au plus vite l'impact et rétablir

même partiellement le trafic routier. Ce cas de figure s'est illustré lors du dernier évènement : la circulation a été rétablie dans le tunnel environ 8 heures après la coulée mais l'alternat de circulation a duré près d'une semaine, le temps d'effectuer les travaux de déblaiement et de réaménagement de la chaussée principale. Temps jugé «*relativement long*» par l'Agence Territoriale Nord. L'alternat de circulation via le tunnel apparaît donc comme une solution transitoire puisqu'il rallonge le temps de retour à la normale. Sa faible capacité d'accueil peut également présenter un frein important la fluidité du trafic.

3.2.2. La mise en place des déviations

En cas de réalisation de l'évènement non programmé, comme lors du 4 juin 2012, les procédures de déviations sont mises en place selon le plan de gestion de trafic préétabli sans pour autant que le terme soit explicitement cité au cours des entretiens. La procédure est fonction de scénarii de coupure sur différents points stratégiques du réseau départemental, un extrait du descriptif est illustré en Tableau 40.

Tableau 40. Rubriques de présentation des procédures de déviation de la RD1091 (CG05, 2011)

Critères d'activation	Critères de suspension	Critères de désactivation
Coupure de D1091 Itinéraire de déviation viable	Saturation de l'itinéraire de déviation	Circulation rétablie sur la D1091
Départements concernés	Itinéraires empruntés	Commentaire
<ul style="list-style-type: none"> Hautes-Alpes Isère 	<ul style="list-style-type: none"> Dans le sens Briançon vers Grenoble, délestage par Embrun par la RN94 puis Gap via la N85 Dans le sens Grenoble vers Briançon, délestage par Gap via la N85 puis N94 	Importance de la localisation du « fait générateur », mesure interzonale Nécessite une bonne connaissance de l'itinéraire de délestage Points sensible VH : Col Bayard et entre La Mure et Corps RN85 : Limitation gabarit dans la descente de Laffrey Correspondance partielle aux mesures RA64, RA65 et RA66 du Palomar RAA
Message de Communication		
La D1091 est coupée entre Grenoble et Briançon dans les deux sens de circulations. Le CRICR Méditerranée et le CRICR RAA demandent aux automobilistes en direction de Grenoble d'éviter ce secteur. <u>Pour le sens Briançon - Grenoble :</u> <ul style="list-style-type: none"> Pour les usagers se situant dans le Queyras, Guillestrois ou Embrunnais et désirant rejoindre le département de l'Isère, il est conseillé d'emprunter la RN94 en direction de Gap puis la RN85 en direction de Grenoble. <u>Pour le sens Grenoble - Briançon :</u> La D1091, entre Grenoble et Briançon, est coupée en direction de Briançon. <ul style="list-style-type: none"> Pour cela, il faut suivre la signalisation mise en place qui consiste à rejoindre Briançon par la N85 via La Mure et Gap. 		

Le Conseil Général oriente ensuite ses choix de déviation à partir d'une échelle d'intensité des perturbations fonctionnelles occasionnées sur son réseau, chaque niveau

d'intensité étant le reflet de la situation du réseau (Tableau 41). Pour un niveau atteint est attribué un itinéraire selon l'origine de la coupure.

Tableau 41. Échelle d'intensité des perturbations du réseau (adapté du CG05)

Echelle de perturbations du réseau	Situation du réseau	Itinéraire proposé
0	Situation Normale	IT.1
Niveau 1	Situation dégradée : - Perturbations IT.1 (travaux, alternat de circulation, bouchons, conditions météo défavorables, etc.)	IT.1 / IT.2
Niveau 2	Situation dégradée : - Coupure IT.1	IT.2
Niveau 3	Situation dégradée : - Coupure IT.1 - Perturbations IT.2 (incident, bouchons, travaux, etc.)	IT.3
Niveau 4	Situation dégradée : - Coupure IT.1 - Perturbations IT.2 / IT.3 (incident, bouchons, travaux, etc.)	IT.4

Ainsi, dans le cadre des conventions établies avec le Conseil Général de l'Isère et la DirMed, le Conseil Général des Hautes-Alpes oriente prioritairement les automobilistes et les entreprises de transport à emprunter les itinéraires de contournement passant par Gap, en cas de coupure du réseau sur l'axe Grenoble-Briançon au niveau de la route départementale D1091 (Figure 86). Cette déviation est valable aussi bien pour un évènement naturel que pour des travaux sur les voies. Ce choix est fonction de la durée de la perturbation et du volume de trafic en circulation capable d'être supporté par cet itinéraire. Elle maintient également une certaine continuité entre les zones urbaines. La cartographie des déviations permet de visualiser rapidement les répercussions qu'entraîne la coupure de réseau sur le territoire et le changement d'échelle de perturbations qu'elle implique.

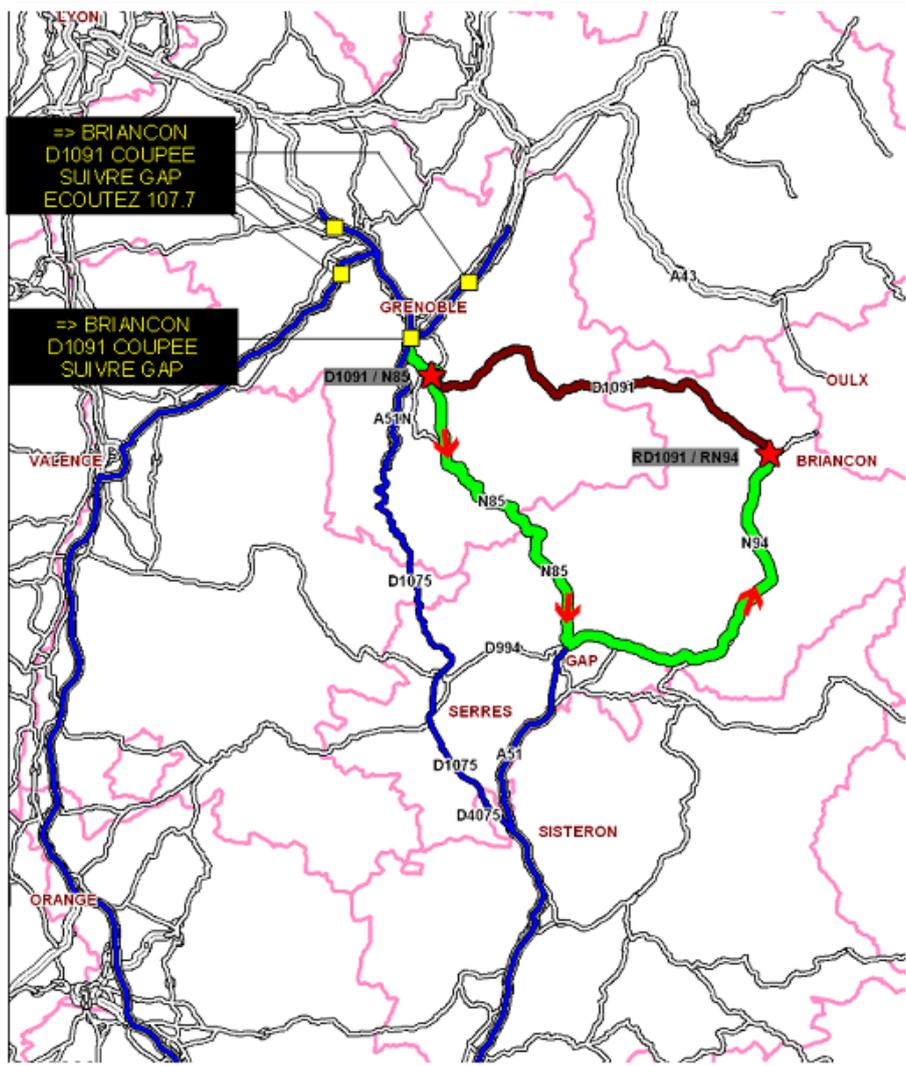


Figure 86. Exemple de carte de déviation en cas de coupure de la route départementale D1091 entre Grenoble et Briançon (CG05, 2011)

Les autres itinéraires sont d'avantage conseillés en cas de perturbations sur le premier réseau de délestage (surcharge du réseau, travaux, incident supplémentaire, etc.) ou lors d'une situation de crise majeur. Il intervient en cas d'une coupure du réseau supérieure à 4h et plus particulièrement pour les usagers en direction de Lyon, Chambéry et Annecy.

Les entretiens ont révélé que le Conseil Général ne propose pas aux usagers de passer par la vallée de la Maurienne en Savoie et/ou l'Italie. Ce constat peut s'expliquer par des raisons administratives mais aussi bien pour des raisons économiques en raison du surcoût tarifaire supporté par les usagers (en particulier le passage du tunnel du Fréjus). De même, il semble logique que le CG05 tienne à conserver le flux routier sur son territoire en vue de maintenir l'attractivité économique qui en découle et limiter ainsi un éventuel manque à gagner déjà lésé par la perturbation du réseau principal.

En ce qui concerne la circulation des poids lourds, les axes de déviation proposés par le CG05 s'attardent principalement sur les limites de gabarits et de tonnage imposées initialement sur certains secteurs, probablement dus à une topographie difficile et aux conditions locales de circulation. Les secteurs sensibles sont : 1) le col Bayard entre la Mûre et Corps, la descente de Laffrey, 2) le col de Lus La Croix Haute, 3) la rampe d'Argentière-la-Bessée.

3.3. Discussion et limites

3.3.1. Éléments de réponse aux hypothèses de départ

La reconstitution de l'évènement a permis de fournir des éléments de réponse aux hypothèses suggérées avant les entretiens sur les modes de gestion opérationnelle employés lors d'une crise routière (Utasse et al., 2015) :

- i. Les groupes d'intervention et de sûreté de la route endommagée ont été assurés par les services de la gendarmerie et du Conseil Général, non par les services de secours. En outre, le processus décisionnel et les responsabilités opérationnelles ne suivent pas forcément l'organisation verticale des autorités administratives.
- ii. Les entretiens ont mis en évidence que les moyens matériels et humains déployés sur place et l'information auprès des usagers ne sont pas spécifiquement adaptés à ce type d'évènement. La procédure est identique pour tout type d'avarie sur le réseau routier. Pourtant l'ensemble des acteurs admettent l'importance du réseau routier, mais ils reconnaissent concentrer prioritairement leurs travaux sur les torrents en zones urbanisées.
- iii. Selon les gestionnaires, l'enclavement du territoire en cas de coupure de réseau apparaît moins comme une crainte réelle que comme une situation exceptionnelle provoquée par un évènement occasionnel, et donc résorbé dans un laps de temps relativement court.

- iv. L'information est transmise sur plusieurs plates-formes et signalée depuis les pôles urbains de Grenoble et de Briançon afin de toucher un maximum d'utilisateurs. Pour autant, on note l'absence totale d'information et de communication sur le risque de lave torrentielle auprès du grand public, tel que les infrastructures touristiques, pourtant la frange de la population la plus représentée en été. Seul le torrent du Verdarel situé plus en aval dans la vallée dispose d'un parcours pédestre pédagogique. Sur ce propos, les infrastructures touristiques comme la station de Serre-Chevalier située à proximité n'a pas été prévenue directement de l'évènement.
- v. La cohérence géographique et la coordination opérationnelle apparaissent essentielles pour les gestionnaires de réseau. A ce titre, il existe une coopération France-Italie pour la gouvernance du réseau mais aucune ne semble être d'usage entre les différentes administrations françaises.
- vi. S'il existe des rapports d'évènements écrits selon un protocole standardisé (Annexe 9), aucune véritable notion de Retour d'Expérience n'a été évoquée. Ces fiches descriptives ne reprennent pas en détails la planification des actions ni les modes d'intervention de chaque groupe d'acteurs. Pour autant, chaque groupe d'acteur tend à donner de plus en plus d'importance aux éléments d'archives. Beaucoup considèrent qu'ils sont à un tournant, que « *le rapport au territoire est différent* » et qu'il faut « *s'inspirer de ce qu'on fait les Anciens dans des moments comme aujourd'hui* » (responsable services techniques de Monétier-les-Bains, 2012).
- vii. L'évènement dommageable semble être perçu différemment d'une institution à une autre. Au cours des entretiens, le mode de restitution de l'évènement et la manière d'appréhender le risque étaient directement liés aux fonctions occupées par les personnes interrogées.
- viii. Certains considèrent que leur domaine de compétence devrait s'exercer en priorité sur ce type de situation d'urgence par rapport à d'autres services d'intervention, mais tous ont une parfaite connaissance des autres acteurs locaux et de leur rôles respectifs. Ils ont conscience de s'inscrire dans un environnement multi-acteurs et de la nécessité de travailler ensemble pour faire évoluer des situations territoriales (Veyron, 2012). Dans le domaine des risques naturels, cette volonté s'illustre par la

diffusion d'un guide pratique sur les torrents de montagne et l'harmonisation des définitions techniques relatives aux aléas.

3.3.2. Limites organisationnelles

Malgré une volonté de développement des échanges et de partenariat du Conseil Général des Hautes-Alpes envers les Conseils Généraux des départements limitrophes et surtout avec l'Italie, la problématique d'une gestion commune à l'échelle du massif alpin pose encore des soucis d'organisation et de communication selon les personnes interrogées. Pour exemple, les échanges restent encore très limités entre les gestionnaires des routes départementales et des routes nationales, c'est-à-dire entre le Conseil Général et la gestion d'État (DirMed). Il semblerait que cette communication repose d'avantage sur un réseau informel et sporadique des services techniques grâce à l'ancienneté et aux échanges entre les agents avant la refonte des services administratifs. Mais les conflits d'intérêts et le cloisonnement des services à l'échelle des gestionnaires nuisent à la mise en place de réels projets coopératifs. La crainte présomptive d'ingérence d'un service sur un autre contraint les acteurs à peu communiquer leurs informations. Sur ce propos, le Pôle Route du Conseil Général est informé par la DirMed des évènements survenus sur la route nationale N94 mais n'a pas accès au « *fond du dossier* ». Les agents déclarent collaborer par observation mutuelle sur le terrain malgré des divergences d'opinion, sans pour autant « *aller vraiment plus loin* ».

Le rapport de l'EP Loire (2006) rappelle par ailleurs que l'organisation des services publics connaît des mutations importantes depuis une quinzaine d'années en matière de réseaux. Elles se traduisent par : 1) la séparation de la propriété de l'infrastructure de la gestion du service 2) la privatisation partielle/totale des entreprises publiques, l'ouverture à la concurrence, les obligations de rentabilité 3) le transfert de compétences des administrations d'État déconcentrées vers les administrations des collectivités locales 4) le développement timide de l'intercommunalité.

Le rapport d'études de l'EP Loire (2006) poursuit en précisant que « *ces évolutions se traduisent par un accès plus difficile à l'information : données évolutives, complexité et manque de lisibilité des responsabilités, confidentialité accrue (...)* Elles jouent également sur

les capacités individuelles et collectives à maîtriser les risques, par la disparition de réseaux informels internes ayant prouvé leur efficacité en matière de connaissance, prévention des risques et de gestion de crise ».

La communication sur l'évènement constitue également un point de discussion entre les acteurs ; d'autant que les professionnels du tourisme, les entreprises de transport voir certaines communes exercent une pression accrue vis-à-vis de la qualité et la flexibilité du service routier. Selon l'Agence Territoriale Nord, ils « *réagissent vite au moindre phénomène* » mais « *comprennent quel est leur intérêt* », ils apprécient notamment les moyens mis en place pour résorber l'impact. Seulement, communiquer sur les risques naturels auprès du public peut potentiellement être sujet à polémique pour l'image du territoire alpin, espace sur lequel le tourisme représente un « *secteur économique de premier plan* » (Convention Interrégionale 2000-2006 pour les Massifs des Alpes). Les acteurs du tourisme s'inquiètent notamment de la « *mauvaise publicité* » que pourrait susciter ce type d'information auprès de leur clientèle. Ils se montrent donc très sensibles à cette volonté de sensibilisation et aux modes d'information transmis au public (Veyron, 2012).

Autre constat, le rôle du Maire pourtant considéré comme un acteur central en cas de survenue d'une catastrophe naturelle à l'échelle communale en France, n'apparaît pas dans l'organigramme de gestion de crise. Ce constat s'explique pour plusieurs raisons :

- i. Les routes concernées ici sont sous la responsabilité exclusive du Conseil Général depuis les lois de décentralisation, la commune gère uniquement le réseau routier communal ou plus rarement le réseau départemental lorsqu'il traverse une commune, sous l'égide de l'intérêt communautaire (EP Loire, 2006).
- ii. En principe, le Maire a pour rôle de déclencher l'arrêté *catastrophe naturelle* dit *CatNat* permettant de mettre en œuvre les procédures d'intervention et la direction des opérations par les services communaux et préfectoraux tels que le PCS et le plan ORSEC (Ministère du développement et de l'Aménagement Durable, 2008). Dans la réalité, ce dispositif est très peu utilisé pour les laves torrentielles, sauf dans le cas d'une agglomération directement touchée avec une atteinte directe au bâti et/ou aux personnes.
- iii. Le Maire est responsable de l'organisation des actions de secours à la population sur sa commune. Dans le cas présent, seuls des biens matériels ont été touchés, le Maire

n'est donc pas l'autorité compétente dans l'exercice des missions durant la gestion de crise.

Enfin, dans un document du Conseil Général visant à l'amélioration de l'ouvrage d'écoulement en place sur le torrent du Rif Blanc datant de juin 2012, il apparaît que le coût des travaux d'aménagement est estimé à 10 000 euros. Rappelons que le coût total des dégâts physiques du dernier évènement était de 25 000 euros. Ainsi, au regard du rapport coût-bénéfices, il semble plus intéressant de revoir le dimensionnement des ouvrages de protection et d'évacuation des eaux torrentielles plutôt qu'opter pour une réparation systématique des dégâts. A ceci s'ajoute des indemnités réclamées par une entreprise Briançonnaise lésée par la perturbation du réseau. Le service Infrastructure et Routes du Conseil Général maintient cependant que la gestion de l'activité torrentielle est « *plus curative que préventive* », les coupures étant « *ponctuelles donc ce n'est pas trop grave* ». Selon le service Route et Gestion de crise, l'agrandissement de la buse du Rif Blanc est « *trop cher* » alors que « *le déblaiement n'est pas cher et rapide* ». Néanmoins, nous restons conscients de ne pas disposer de tous les éléments nécessaires à la réalisation d'une évaluation économique pertinente sur cet évènement.

3.3.3. Les conséquences indirectes de l'évènement

L'évènement du Rif Blanc permet d'établir que les dommages subis ne sont pas seulement circonscrits à la zone où le phénomène s'est produit, mais qu'ils se manifestent à une plus grande échelle au sein maillage routier alpin, pas seulement d'un point de vue spatial, mais également temporel.

Outre la réaction des gestionnaires de réseau pour remédier à l'endommagement, les déviations mises en place à la suite à l'interruption du trafic sur le réseau principal génèrent inévitablement une baisse de la qualité du service de transport, proportionnelle à la durée de la coupure et au temps que dure la réhabilitation du réseau principal. Les conséquences des itinéraires de contournement se traduisent par une augmentation des coûts de transport par l'allongement du temps de parcours et de la distance kilométrique. Le réseau perd en

flexibilité, en fiabilité ainsi qu'en termes de ponctualité. De même, il est possible que l'itinéraire de contournement ne soit pas adapté face à une surcharge ponctuelle d'usagers sur la route. L'ensemble de ces facteurs freinent la reprise d'une activité normale de la circulation sur le réseau et donc sa résilience. Plusieurs points se doivent donc d'être soulignés.

Dans le cas du Rif Blanc, le temps de coupure de la route départementale D1091 ne dépasse guère quelques heures en raison de la présence de l'ancien tunnel routier attenant à la route principale. Dégagé en priorité, il permet de maintenir un certain niveau de circulation sur cet axe grâce à un système d'alternat par feux mobiles. Cependant, la qualité du service de transport reste lourdement affectée avec un risque d'engorgement ponctuel du flux. La solution de l'alternat de circulation nécessite également d'augmenter les coûts d'organisation des différentes chaînes logistiques pour la gestion de crise, puisqu'elle implique un prolongement de la situation altérée du réseau. Se focaliser sur l'analyse des temps de coupure semble donc moins pertinent qu'une analyse globale des conséquences incluant la perturbation subie par l'alternat de circulation dont le temps de retour réel à la normale est bien plus long.

A l'échelle régionale, les déviations et l'alternat de circulation pénalisent la qualité des échanges transalpins. L'altération du réseau de transport perturbe les zones frontalières françaises et italiennes puisqu'une part importante du flux supporté par ces axes est directement liée aux activités de ces régions. Elle pénalise en particulier l'économie touristique desservie par ce réseau puisque une forte proportion de clients étrangers en provenance d'Italie ou français de l'Hexagone empruntent cet axe, en particulier en période estivale. De même, les points névralgiques du territoire que ce soit les hôpitaux, les centres de secours etc. doivent pouvoir être desservis même lorsque le réseau est dégradé.

L'altération prolongée du réseau perturbe également l'organisation du trafic pour les transporteurs dont la circulation est déjà fortement contrainte par les réglementations en vigueur sur la limite de gabarit, de tonnage, les restrictions calendaires et la topographie. A plus long terme, malgré la grande variabilité de la vulnérabilité des secteurs d'activité face à ce type de perturbation, cela peut fragiliser l'équilibre financier des petites et moyennes

entreprises au rayonnement économique local à régional. Citons par exemple les surcoûts liés au stockage temporaire des véhicules durant les temps de coupure du réseau. D'autant que bien souvent, les pertes d'exploitation, souvent vécues comme le plus lourd préjudice subit pour ces entreprises, est mal pris en charge par les compagnies d'assurance. Cependant, pour les entreprises, ces logiques de transport vont au-delà des considérations du plus court chemin au plus rapide, la contrainte économique est un paramètre essentiel à prendre en considération dans la logistique des transporteurs. De même, la programmation de leurs itinéraires dépend de la qualité du réseau principal tout autant que celui de substitution en termes de flexibilité et de ponctualité.

Enfin, la mise en place d'une déviation et/ou de l'alternat de circulation peut conduire à la création de situations accidentogènes en raison de la concentration ponctuelle et massive du trafic, majoré dans un espace contraint par la topographie. Dans une moindre mesure, ce cas de figure peut donner naissance à des attitudes de conduite anti-sécuritaires par ailleurs souligné par les échelles de vulnérabilité du Conseil Général (non-respect de la réglementation sur les temps de conduite, passage dans des zones non appropriées, excès de vitesses pour rattraper le temps perdu etc.). La connaissance précise des zones à risque est un élément d'autant plus essentiel dans les plans de déviations que la population manque de confiance dans les déviations (EP Loire, 2006).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons comparé l'organisation d'une gestion de crise routière telle qu'elle est représentée par les sources gouvernementales avec la réalité du terrain à la suite d'un évènement dommageable au réseau. Ce travail a permis 1) d'apprécier l'échelle territoriale impliquées pour ce type d'évènement ; 2) d'identifier les acteurs-clés en charge de la gestion de la crise, c'est-à-dire les responsables administratifs, la protection civile et les gestionnaires de réseau ; 3) de reconstituer le processus décisionnel et la planification des actions à la suite de l'évènement ; 4) d'analyser la capacité de résilience du territoire en cas de lave torrentielle ayant un impact sur le réseau départemental.

La mise en confrontation de la gestion de crise routière théorique avec la chronologie des actions reconstituée lors des entretiens a démontré qu'elle est davantage sous la responsabilité des gestionnaires de réseau départementaux plutôt que les autorités gouvernementales habituellement rencontrées dans les schémas classiques de gestion des risques en France. Le Conseil Général y joue un rôle prépondérant que ce soit dans la prise en charge des dommages structurels, la gestion du trafic ou la transmission de l'information.

Selon le contre-rendu des entretiens, les gestionnaires de réseau ont fait preuve d'une bonne capacité de réponse aux modalités d'alerte et d'organisation opérationnelle. Cette efficacité repose sur une collaboration accrue entre les différents services, chaque acteur étant intégré dans une cohérence d'ensemble. Elle repose également sur une volonté d'amélioration des connaissances du phénomène naturel et sur la réactivité des services pour un retour rapide à la normale.

Néanmoins, les actions menées se focalisent encore largement sur l'aspect curatif plutôt que sur des mesures préventives. Par ailleurs, si des plans de gestion de trafic existent, les perturbations fonctionnelles engendrées au-delà de la zone endommagée paraissent sous-estimées dans les schémas de gestion de crise. Certains aspects de la gestion de crise pourraient encore être développés :

- i. Consolider sur le long terme cette volonté d'échanges d'informations entre les différents gestionnaires de réseau au-delà des clivages administratifs. D'autant qu'il faudra s'attendre à nouveaux découpages de compétences entre les services d'État avec le regroupement actuel des régions.

- i. S'orienter vers la diffusion de diagnostics territoriaux standardisés traitant spécifiquement du risque-réseaux appliqué aux laves torrentielles.
- ii. Capitaliser et mutualiser les retours d'expérience post-événement.
- iii. Sensibiliser davantage le public et les professionnels du tourisme pour une meilleure prise de conscience du risque.

Ce chapitre étant dédié à la gestion de crise du point de vue des gestionnaires de réseau, l'analyse pourrait être complétée avec des enquêtes auprès des usagers de la route tels que les entreprises de transport ou les habitants qui empruntent quotidiennement ces axes. De même, au regard de l'importance économique de l'activité touristique dans cette région, il pourrait aussi être intéressant de quantifier les impacts des perturbations réseau routier sur un positionnement plus socio-économique.

Chapitre - 6 : Les pertes d'accessibilité territoriale comme outils de mesure de la vulnérabilité indirecte du réseau

La dernière étape de notre étude vise à mesurer la « *valeur territoriale* » (Léone, 2008) du réseau routier. Pour rappel, les impacts ne concernent pas seulement les dommages aux infrastructures, mais touchent également la fonction d'usage assurée par ce réseau (Gleyze et Reghezza, 2007). Ce chapitre repose donc sur l'analyse des conséquences fonctionnelles et territoriales provoquées par une rupture de réseau, à la suite d'un évènement lave torrentielle. La modélisation de la dégradation de l'accessibilité routière permet ici de mesurer l'étendue spatiale et temporelle des perturbations mais aussi de mesurer les préjudices induits sur les enjeux territoriaux. Nous étudierons trois scénarii : 1) un scénario correspondant à la reconstitution de l'évènement du 4 juin 2012 sur le Rif Blanc ; 2) un scénario fondé sur l'hypothèse d'une coupure d'un axe autoroutier transalpin au niveau du Rieu Sec ; 3) un scénario fondé sur l'hypothèse d'une coupure d'un axe routier essentiel d'une vallée touristique en Suisse.

1. L'intérêt des calculs d'accessibilité dans l'étude des réseaux

1.1. Qu'est-ce que l'accessibilité ?

Développé à l'origine par Ingram (1971), le concept d'accessibilité représentait le degré de connectivité entre deux points dans l'espace, depuis deux notions de l'accessibilité se distinguent (Figure 87).

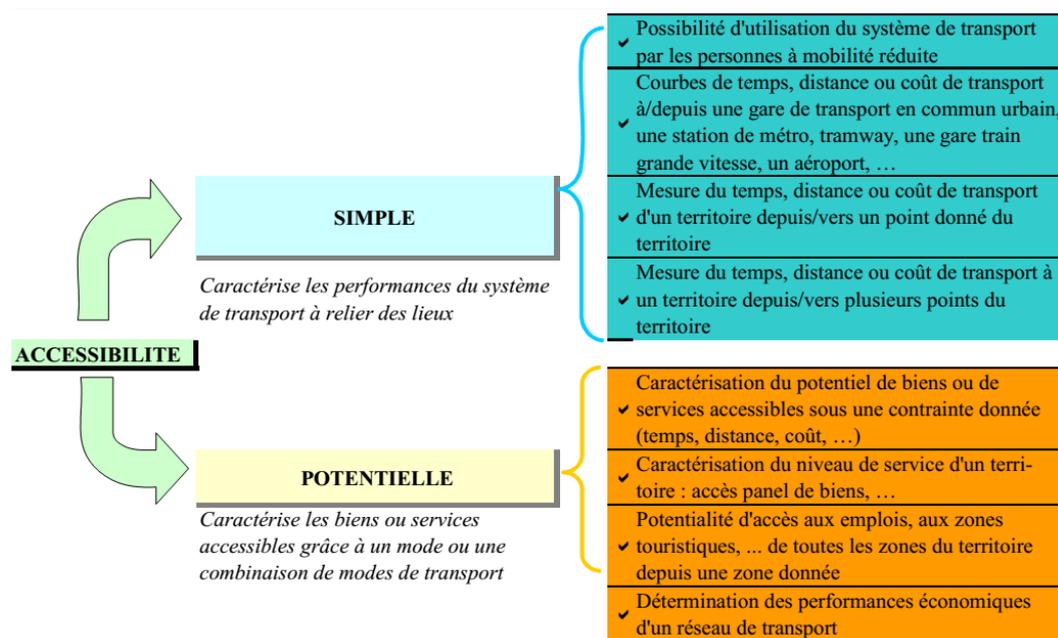


Figure 87. Les différentes notions d'accessibilité (Sétra, 2008)

L'accessibilité dite simple sert prioritairement à évaluer les performances d'un système de transport (Sétra, 2008). Sur ce propos, Huriot et Perreur (1994) proposent que « l'accessibilité d'un lieu, depuis un autre lieu ou depuis un ensemble d'autres lieux, mesure la facilité du déplacement qui permet d'atteindre ce lieu » à l'aide des moyens de transport existants. Thevenin (2002) complète cette définition en précisant que « l'accessibilité est une notion essentielle dans toute analyse d'un système de transport (...) Cette mesure dépend directement de la qualité de liaison entre ces lieux, c'est-à-dire la topologie du réseau, les caractéristiques fonctionnelles comme la vitesse autorisée, la largeur des voies ou les perturbations du trafic ».

Selon Litman (2005), quatre schémas d'accessibilité peuvent alors être distingués, selon qu'elle soit unipolaire ou bien multipolaire (Bavoux et al., 2005) : 1) depuis une seule

origine vers une seule destination ; 2) depuis une seule origine vers plusieurs destinations ; 3) depuis plusieurs origines vers une seule destination ; 4) depuis plusieurs origines vers plusieurs destinations. Tout calcul implique donc les notions de temps d'accès et de distance pour atteindre cette destination. Pour autant, l'accessibilité ne renvoie pas seulement à la seule possibilité d'atteindre ou non un lieu mais elle traduit également la pénibilité du déplacement, la mesure des contraintes spatio-temporelles et du niveau de service offert par le système de transport utilisé (Chapelon, *in* <http://www.hypergeo.eu>).

L'accessibilité dite potentielle ajoute la variable socio-économique dans l'évaluation d'un réseau de transport en intégrant les biens et les services qui dépendent dudit réseau. Litman (2015) définit alors l'accessibilité potentielle comme une réponse à des opportunités qui peuvent être atteintes sur une certaine période de temps et/ou distance. L'extrait des travaux du DGR (1998) cité dans le rapport du Sétra (2008) explique que « *cette accessibilité peut être définie comme étant la quantité de biens, d'emplois ou encore le volume de population qu'un individu peut joindre à partir d'un point donné, compte tenu du niveau d'offre des infrastructures routières. (...) Les opportunités qu'offre le territoire ne prennent de sens qu'à travers les conditions de transport qui permettent d'y accéder* ». On comprend alors aisément que l'accessibilité permise par le réseau soit un enjeu capital de la dynamique territoriale (Léone et Deymier, 2011).

1.2. Enjeux et mesure de l'accessibilité

La manière dont est évaluée l'accessibilité affecte la planification des décisions pour l'aménagement du territoire (Levinson et El-Geneidy, 2006 ; Litman, 2003). Aussi, plusieurs champs d'application de l'accessibilité peuvent s'intéresser à l'interaction des réseaux de transport avec le territoire, par exemple :

- i. Dans le but de faire appliquer un texte réglementaire, comme dans le cadre de projets de développement d'infrastructures. Dans ce cas l'étude de l'accessibilité repose principalement sur une évaluation économique.

- ii. Dans le cadre d'une étude d'impact en vue de la mise en place de nouveaux aménagements territoriaux. L'accessibilité sert ici à évaluer les répercussions socio-économiques, afin d'améliorer l'offre de transport.
- iii. Pour faire un état des lieux de la qualité et de la performance du système de transport, dans le but d'évaluer l'état des services et la desserte qu'offre le territoire à la population.
- iv. Comparer plusieurs modes de transport pour une même origine-destination.
- v. Dans le cadre de la modélisation des évacuations en raison d'un aléa d'origine naturelle ou anthropique.

La mesure de l'accessibilité est aujourd'hui facilitée par l'usage de logiciels d'analyse des réseaux routiers (Tableau 42) dont la lecture des résultats est facilitée par les Systèmes d'Information Géographique qui y sont rattachés (Litman, 2005). Pour autant, peu de modèles parviennent à rendre compte des impacts générés par un réseau altéré comme lors d'une perturbation routière (Litman, 2015).

Tableau 42. Exemple d'outils et logiciels permettant de modéliser d'accessibilité routière

Outils	Référence associée
Evacuation Route Tools Arcgis <i>toolbox</i>	ESRI, 2006 Laghi et al., 2007
Arcgis Network Analyst	ESRI, 2006
MapInfo, RouteFinder	www.routeware.dk RouteWare, 2010
TRANUS: Integrated Land Use and Transport Model	http://www.tranus.com CERTU, 1996
MapInfo, Chronomap	http://www.opti-time.com CERTU, 2006
MapNod	http://mapnod.free.fr Chapelon, 1999 L'Hostis et al., 2001
Active Mode Accessibility (AMA)	Rendall, et al., 2011
Access Across America	http://ao.umn.edu/research/america/auto/2013/ Levinson, 2013 Levinson and El-Geneidy, 2006

Si le critère principal permettant de mesurer l'accessibilité consiste à calculer le plus court chemin, les outils de modélisation tiennent surtout compte du temps de parcours (Bavoux et al., 2005 ; Lhomme, 2012). En effet, il traduit la valeur minimale de l'accessibilité entre un couple de lieux et reflète donc le fonctionnement optimal de la chaîne de transport dans un intervalle de temps donné (Bavoux et al., 2005 *in* Léone et Deymier, 2011). Cette fonction est particulièrement utile pour cartographier la dégradation de l'accessibilité, particulièrement préjudiciable pour le territoire. Ainsi, la comparaison entre une situation normale d'un réseau non altéré avec celle d'une situation perturbée permet de mettre en évidence les pertes de connectivité et de connexité momentanées du maillage routier.

2. Méthodes et outils utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité indirecte

2.1. Les indicateurs d'accessibilité

Nous avons utilisé au préalable des indicateurs d'accessibilité dits simples comme variables d'entrée pour comparer l'ensemble des itinéraires routiers. Il s'agit d'une procédure d'analyse du réseau standard avant l'utilisation d'un modèle d'accessibilité plus complexe (Morris et al., 1979).

Dans le cas présent, les indicateurs choisis étaient : le temps de trajet (en minutes), la distance kilométrique et le coût associé (carburant et péage). Les indicateurs d'accessibilité ont été utilisés pour évaluer la connectivité du réseau de transport dans le cas d'un changement dans l'organisation spatiale dudit réseau. Cette approche nécessite donc de définir précisément l'emplacement des points d'origine et de destination afin de pouvoir déterminer l'itinéraire de référence suivi de tous les itinéraires alternatifs envisageables.

2.2. Modélisation du réseau routier

2.2.1. Le logiciel *RouteFinder* : principe et fonctionnement

La théorie des graphes, branche de la mathématique discrète remonte au célèbre problème des ponts de Königsberg, illustré par les travaux d'Euler (1759). Un graphe est un schéma composé d'un ensemble de sommets et d'arcs : les sommets représentent des points dans l'espace et les arcs représentent des flèches (directionnelles ou non) reliant un point à un autre (Müller, 2012). Les modèles développés à partir de cette théorie sont applicables à plusieurs champs (calculs de probabilités, modélisation de processus physiques, analyse sociale, etc.), plus particulièrement dans le domaine des réseaux de transport.

En théorie des graphes, l'algorithme de Dijkstra (1959) permet de résoudre le problème du plus court chemin, c'est-à-dire le nombre minimum d'arcs nécessaires pour relier deux sommets, il estime ainsi la distance, la connexité et la connectivité du graphe. Le logiciel *RouteFinder* s'appuie sur cet algorithme pour estimer l'accessibilité territoriale depuis un

point de départ vers un point d'arrivée. Le réseau routier est alors représenté par un graphe, symbolisé par des arcs pour les tronçons de route et des nœuds pour désigner les intersections, tous les nœuds doivent être connectés entre eux et un poids différent est affecté à chaque tronçon selon les caractéristiques dudit réseau (Figure 88).

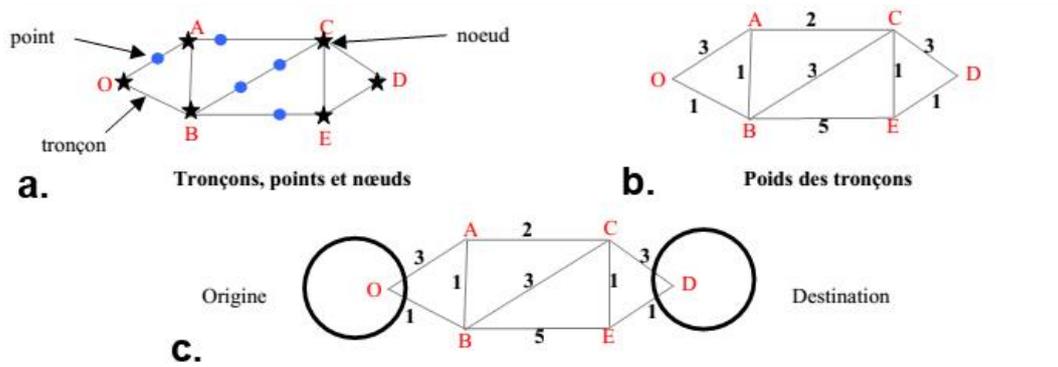


Figure 88. Le graphe du réseau routier : a. Tronçons, points et nœuds ; b. Poids des tronçons ; c. Points de départ et d'arrivée. (CERTU, 2006)

Le graphe doit rendre compte fidèlement de la hiérarchie routière, des caractéristiques morphologiques du réseau et des vitesses de circulation (Appert et Chapelon, 2006). A ce titre, *RouteFinder* nécessite de renseigner au préalable :

- i. La structure du réseau : longueur et la largeur des tronçons, la configuration des voies.
- ii. La classification administrative de chaque tronçon, traduite en termes d'importance hiérarchique.
- iii. Les sens obligatoires de circulation.
- iv. L'échelle spatiale à modéliser et ses limites territoriales.
- v. Les vitesses appliquées.
- vi. Le type de véhicule utilisé pour la simulation.
- vii. Les points d'origine et d'arrivée.

Ce modèle opère directement dans un environnement *SIG* à partir des données attributaires vectorielles. Il permet de réaliser des calculs d'itinéraires en fonction de la distance la plus courte (mode *SHORTEST*) ou selon le temps de trajet le plus court (mode *FASTEST*). *RouteFinder* propose également de simuler une coupure de réseau (*CLOSE NETWORK*), dans ce cas le logiciel exclut le tronçon désigné lors des calculs d'itinéraires.

En sortie, le modèle propose plusieurs représentations cartographiques de l'accessibilité (Figure 89) : 1) la carte par symboles proportionnels (cercles); 1) la carte en isochrones (surfaique); 3) la carte en isolinkss (linéaire) ; 4) la carte par carroyage (maillage surfaique).

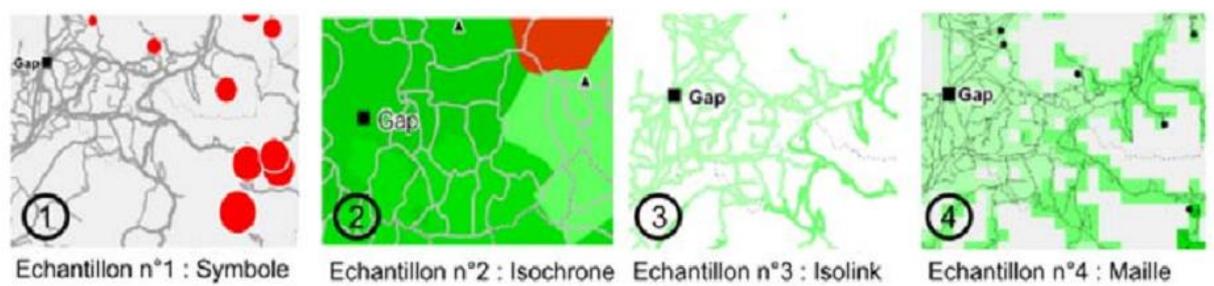


Figure 89. Modes de représentation cartographique de l'accessibilité territoriale disponible dans RouteFinder (Léone et Deymier, 2011)

2.2.2. Rappel sur les bases de données utilisées

La base de données de routière utilisée dans cette étude est la BD TOPO fournie par l'IGN. Comme le logiciel *RouteFinder* requière de hiérarchiser chaque axe, nous avons utilisé les valeurs attributaires du champ IMPORTANCE au sein de la classe ROUTE comme référentiel standard, complétées par celles du champ CLASSE ADMINISTRATIVE (cf. chapitre 2).

Le sens de circulation n'étant pas automatiquement détecté par le modèle, nous avons utilisé une option de *RouteFinder* permettant d'attribuer un code spécifique à chaque tronçon pour lui permettre d'en identifier le sens. Ainsi, lorsque la voie est en double sens, la valeur reste celle du champ IMPORTANCE mais en cas de sens unique direct, le code +513 est ajouté à la valeur du champ et en cas de sens unique indirect, la valeur +1024 est ajoutée à la valeur du champ (Tableau 43). Cette manœuvre est particulièrement utile pour éviter les biais et les doublons lors des simulations : un tronçon sera modélisé dans un seul sens et ne sera pas compté deux fois dans les calculs de temps d'accès. Plus représentative de la réalité, elle est surtout pertinente pour la circulation sur les autoroutes ou tout axe à sens unique.

Tableau 43. Paramétrage du sens de circulation dans RouteFinder à partir du champ IMPORTANCE de la BD TOPO (IGN)

Importance (BDTOPO)	Vocation du tronçon (BDTOPO)	Sens de circulation	Classe renseignée dans RouteFinder
1	Routes principales	Double	1
		Unique Direct	513
		Unique Inverse	1025
2	Routes principales	Double	2
		Unique Direct	514
		Unique Inverse	1026
3	Routes secondaires	Double	3
		Unique Direct	515
		Unique Inverse	1027
4	Routes secondaires	Double	4
		Unique Direct	516
		Unique Inverse	1028
5	Routes secondaires	Double	5
		Unique Direct	517
		Unique Inverse	1029

Pour certaines simulations, nous avons agrégé les données de population résidente par maille de 200m² (INSEE) (cf. chapitre 2). Cette dernière étape a permis de quantifier les personnes potentiellement impactées par une perturbation routière.

2.2.3. Paramétrage des vitesses

La vitesse de circulation est un paramètre essentiel dans les calculs d'accessibilité d'un réseau de transport. Valeur structurante du territoire, sa variabilité permet la contraction de l'espace-temps et/ou de la distance-temps. Le but étant de parcourir des distances toujours supérieures pour une même unité de temps (Baud et al., 2013). Par exemple, si l'augmentation des vitesses provoque un rallongement des étapes et une baisse du nombre de nœuds, elle suppose un gain de temps et de confort. Néanmoins cette contrepartie se fait au prix d'une accessibilité territoriale plus réduite puisqu'elle ne conserve plus que les nœuds importants : c'est l'effet tunnel (Lévy et Lussault, 2003).

Puisque *RouteFinder* est basé sur le temps et la distance de parcours, le modèle requiert en entrée d'associer une vitesse de circulation à chaque tronçon de route. Nous avons donc choisi d'attribuer une vitesse (km/h) en fonction de la typologie du réseau routier proposée par la BDTOPO de l'IGN et le sens de circulation (Tableau 44).

Tableau 44. Classes de vitesses renseignées dans RouteFinder (véhicules légers)

Vocation du tronçon (BDTOPO)	Valeur de l'attribut (BDTOPO)	Classe Vitesse (RouteFinder)	Vitesse pondérée km/h
Routes principales	Liaisons entre métropoles Autoroutes, quasi-autoroutes, quelques nationales	1	110
Routes principales	Liaisons entre les départements Assure les liaisons à fort trafic à caractère prioritaire entre les agglomérations importantes Offre une alternative aux autoroutes (si payantes) Propose des itinéraires de contournement des agglomérations Liaisons interurbaines à fort trafic	2	70
Routes secondaires	Liaisons ville à ville à l'intérieur d'un département Majoritairement les départementales Relie les communes de moindre importance Dessert les localités et sites touristiques importants Dessert les points de passages avec obstacles naturels (ponts, cols etc.)	3	60
Routes secondaires	Liaisons communales, rurales, relier le bourg aux hameaux proches Structure la circulation en agglomération	4	50
Routes secondaires	Voies permettant de desservir l'intérieur d'une commune (hors chemins et pistes)	5	50

Pour plus de représentativité, nous avons choisi de pondérer les valeurs de vitesse en fonction de la pente moyenne, de la sinuosité et du type de véhicule utilisé pour la simulation. Cette méthode évite de surestimer les résultats en utilisant la limite de vitesse maximale de circulation autorisée qui ne reflète pas nécessairement le temps parcours réel. Les valeurs ont été calibrées via l'utilisation de calculateurs d'itinéraires disponibles sur internet pour le grand public.

2.3. Choix des scénarii

2.3.1. Scénario reproductif d'un évènement dommageable au réseau : le Rif Blanc

A la suite de l'évènement dommageable du 4 juin 2012, nous avons simulé la dégradation de l'accessibilité territoriale engendrée par la coupure de la route départementale D1091 au niveau du torrent du Rif Blanc dans le département des Hautes-

Alpes. Le but était de comprendre et d'expliquer les conséquences des perturbations fonctionnelles sur le territoire, en termes d'emprise spatiale et temporelle.

Notre analyse se décompose en trois phases afin d'évaluer l'accessibilité simple puis potentielle du réseau de transport : 1) au préalable nous avons identifié puis comparé l'ensemble des itinéraires de contournement possibles à partir de l'utilisation d'indicateurs d'accessibilité ; 2) nous avons ensuite modélisé l'accessibilité territoriale en situation normale (sans altération du réseau) pour la confronter ensuite à la situation perturbée (avec altération du réseau) provoquée par la coupure de la D1091 ; 3) nous nous sommes concentrés sur les enjeux territoriaux potentiellement affectés autour de la zone de coupure, sur le territoire du Pays du Grand Briançonnais : la population résidente, l'activité touristique et l'accès des secours.

Nous avons défini notre champ d'étude à partir de l'itinéraire de référence Grenoble-Briançon, pour une analyse de l'accessibilité à l'échelle régionale entre deux nœuds urbains stratégiques dans le maillage routier alpin. Ce choix est en accordance avec les plans de gestion de trafic définis par les gestionnaires routiers pour cet évènement. La sélection des itinéraires de contournement dépend également des déviations proposées par les gestionnaires. La comparaison entre les itinéraires de contournement a été effectuée en fonction de la distance kilométrique, du temps de parcours (en minutes) et du coût du trajet (carburant et péage routier), le tout calibré pour des véhicules légers. Tous les types d'axes définis par la BDTOPO ont été pris en compte dans les simulations, y compris le réseau frontalier avec l'Italie.

Nous avons sélectionné le mode de calcul régi par le temps de trajet le plus court avec le mode de représentation cartographique par isolinks, puisque le meilleur temps de parcours reflète le fonctionnement optimal de la chaîne de transport dans un intervalle de temps donné (Chapelon, 2006). Les valeurs d'accessibilité sont représentées de manière linéaire selon une hiérarchie qui classe les tronçons en fonction de leur performance : depuis un point donné, la représentation utilise une gamme chromatique progressive au fur et à mesure que les temps d'accès vers l'ensemble du territoire s'accroissent (SETRA, 2008). En raison de l'étendue spatiale à modéliser, nous avons donc découpé les temps de trajet en classe de 30minutes,

c'est un compromis entre la précision des résultats et des temps de calcul raisonnables pour chaque simulation. Une variation de couleur est alors attribuée à chaque classe de temps le long de chaque axe routier.

2.3.2. Scénario à priori d'un évènement dommageable au réseau : Le Rieu Sec

Ce scénario a été construit sur la base de l'évènement du 29 juin 1993 sur le torrent du Rieu Sec en Savoie ayant occasionné la coupure simultanée de l'actuelle route départementale D1006 et de l'autoroute 43, également voie européenne 70. Pour rappel, cet axe représente aujourd'hui la principale liaison économique alpine pour le fret routier entre la France et l'Italie. Les simulations réalisées sous *Massmov2D* (cf. chapitre 4) ont démontré qu'en cas d'évènement exceptionnel, une lave torrentielle pourrait être en capacité d'affecter à nouveau lourdement ces deux axes routiers. Nous avons identifié puis comparé l'ensemble des itinéraires de contournement possibles à partir de l'utilisation d'indicateurs d'accessibilité.

La liaison entre les pôles urbains internationaux Lyon et Turin est choisie comme axe de référence. Si le scénario précédent tendait à favoriser les véhicules légers, celui-ci est calibré sur la circulation des poids lourds. En revanche, seul le réseau principal a été sélectionné dans ce scénario, pour plus de représentativité à l'échelle internationale. Cette simplification reposait également sur l'hypothèse qu'avec une telle distance à parcourir et au vu des restrictions de circulation en vigueur sur le réseau secondaire, il semblait peu probable que la majorité des poids lourds empruntent les petites routes.

2.3.3. Scénario à priori d'un évènement dommageable au réseau: l'exemple de la vallée de Zermatt (Suisse)

La modélisation de ce scénario supplémentaire a été réalisée avec l'appui de Laurine Perche, étudiante de master 1 de l'Université Paris-Est Créteil et avec la collaboration de l'équipe Suisse du projet européen ARNICA (Perche, 2013).

La vallée de Zermatt d'une longueur de 30 kilomètres, se trouve dans la partie sud de la Suisse, dans le canton du Valais plus précisément dans le district de Viège (Figure 90).

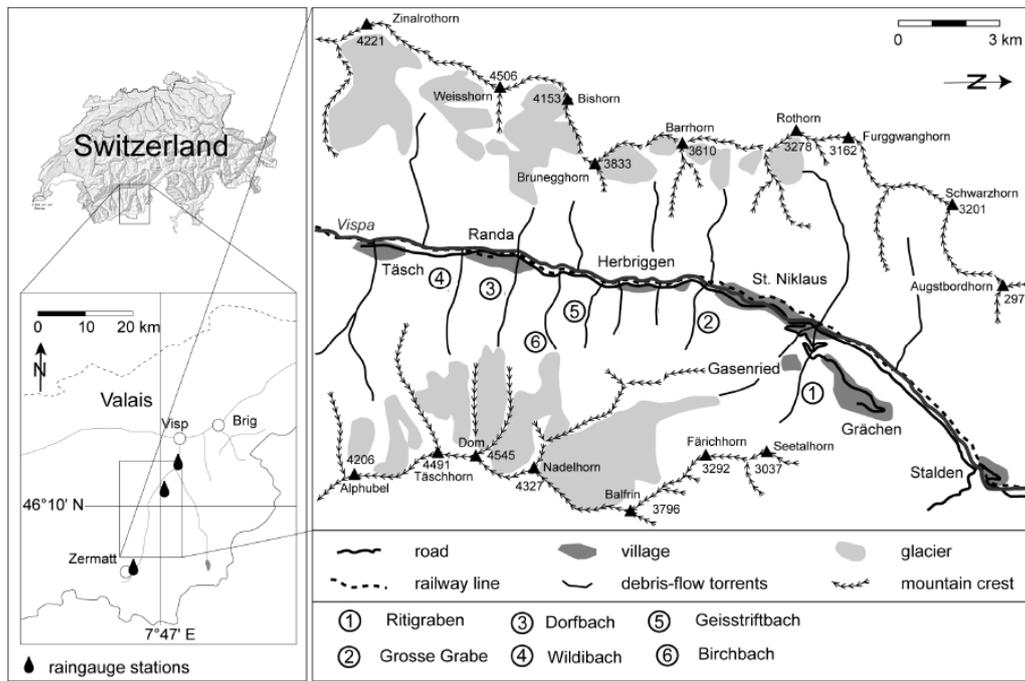


Figure 90. Localisation générale de la vallée de Zermatt (d'après Bollschweiler et Stoffel, 2012)

Cette vallée densément peuplée (13 000 habitants vivant à l'année) est connue pour être soumise à de nombreux processus de versant, dans notre contexte six torrents sont particulièrement actifs et menacent directement le réseau routier. Néanmoins, Stoffel et al. (2005), avancent que la plupart des évènements dommageables sont provoqués par le torrent du Ritigraben situé près de Grächen à l'entrée de la vallée. Ce torrent est le plus actif avec 46 évènements sur une période de 109 ans avec au minimum une lave torrentielle par an (Perche, 2013). Si les volumes de matériaux enregistrés sur le réseau sont relativement peu élevés, de l'ordre de 2 500 à 10 000m³, les archives relatent un certain nombre de dommages physiques tels que des coupures/obstruction des voies routières et ferrées, des ponts arrachés et des canalisations détruites ; les perturbations fonctionnelles connues pour les évènements de 2000 sont de 5 jours pour le réseau routier et plus de 24 jours pour le réseau ferré (Rebetez et al., 1997 ; OFEG, 2002).

La structure du réseau employée pour la modélisation de l'accessibilité est légèrement différente de celle utilisée pour le réseau France-Italie. La hiérarchie des axes utilisée pour les simulations a été spécifiquement adaptée selon la vocation administrative du réseau routier Suisse. La classification est comme suit : autoroute, route nationale, route cantonale et route communale (Tableau 45). En raison de la proximité du réseau ferré et la mention de dommages, celui-ci a été intégré aux simulations.

Tableau 45. Classification des routes dans la Vallée de Zermatt

Vocation du tronçon	Valeur de l'attribut	Classe Vitesse (RouteFinder)	Vitesse pondérée km/h
Autoroutes	Voies rapides à plusieurs voies	1	100
Semi autoroutes	Voies rapides à plusieurs voies	2	90
Accès autoroutes	Parcelle de route permettant d'accéder aux autoroutes	3	80
Nationale	Axe principal en dehors des voies rapides	4	70
Cantonale	Communications principales dans le canton	5	60
Communale	Axes secondaires, drainant les communes	6	40

L'axe routier reliant les villes de Stalden à Täsch a été choisi comme itinéraire de référence. Seule liaison routière de la vallée, les touristes et/ou les secours sont obligés de transiter par ces deux villes pour se rendre à Zermatt (ville) (Figure 90). La ville de Stalden constitue le point d'entrée de la vallée et la ville de Täsch est le point d'arrivée de la vallée, Zermatt (ville) étant interdit à tout véhicule. Cet itinéraire parcourt également l'ensemble des torrents.

Au vu de la configuration linéaire du maillage routier, le scénario principal vise à simuler les pertes d'accessibilité à l'échelle locale provoquée par la coupure de la route au niveau du torrent du Ritigraben, le torrent le plus en aval de la vallée. Nous supposons qu'en cas d'évènement dommageable au réseau, toute la vallée doit être paralysée. En complément, des scénarii avec des coupures provoquées par les autres torrents sont disponibles dans le mémoire de Laurine Perche (Perche, 2013).

3. La dégradation de l'accessibilité territoriale : résultats

3.1. Distance, temps et coûts

3.1.1. Comparaison d'itinéraires : l'axe Grenoble-Briançon

En cas de perturbation de la circulation sur la route départementale 1091 sur l'axe Grenoble-Briançon, trois itinéraires de substitution sont possibles dans le maillage routier alpin (Figure 91) :

- i. IT1. il s'agit de l'itinéraire de référence passant par la route départementale D1091 en situation normale (via la vallée de la Guisane).
- ii. IT2. Cet itinéraire propose de passer par la ville de Gap et Argentière-la-Bessée via la route nationale N85 et la route nationale N94 via le passage du Col de Bayard. C'est le premier itinéraire de contournement conseillé par le Conseil Général des Hautes-Alpes.
- iii. IT3. Cet itinéraire est proche du précédent puisqu'il traverse également Gap, à la différence qu'il emprunte auparavant les axes suivant : l'autoroute A51, les départementales D1075 et D994 puis la route nationale 94 via le passage du Col Luce la Croix Haute. Il s'agit du second itinéraire proposé par le Conseil Général des Hautes-Alpes.
- iv. IT4. Contrairement aux axes précédents, cet itinéraire passe par le département de la Savoie puis par l'Italie avant de rejoindre la commune de Briançon. Il emprunte l'autoroute A41 et l'autoroute A43 (via la vallée de la Maurienne) en direction de la ville de Bardonecchia en Italie grâce au tunnel de Fréjus. Ensuite il emprunte la route nationale puis N94 passant par la ville frontalière de Montgenèvre. Cet itinéraire n'est qu'exceptionnellement proposé par le Conseil Général des Hautes-Alpes.

Précisons que le trajet par le Col du Galibier reliant la Savoie et les Hautes-Alpes est automatiquement exclu des calculs, tout simplement parce qu'il se situe juste en amont de la zone de coupure. Il ne peut donc pas être utilisé comme itinéraire de contournement en cas d'évènement dommageable au niveau du Rif Blanc. Il présente également le désavantage

d'être peu praticable pour les véhicules et il est régulièrement fermé durant de la période estivale. Cet axe n'a jamais été mentionné comme déviation possible par les gestionnaires.

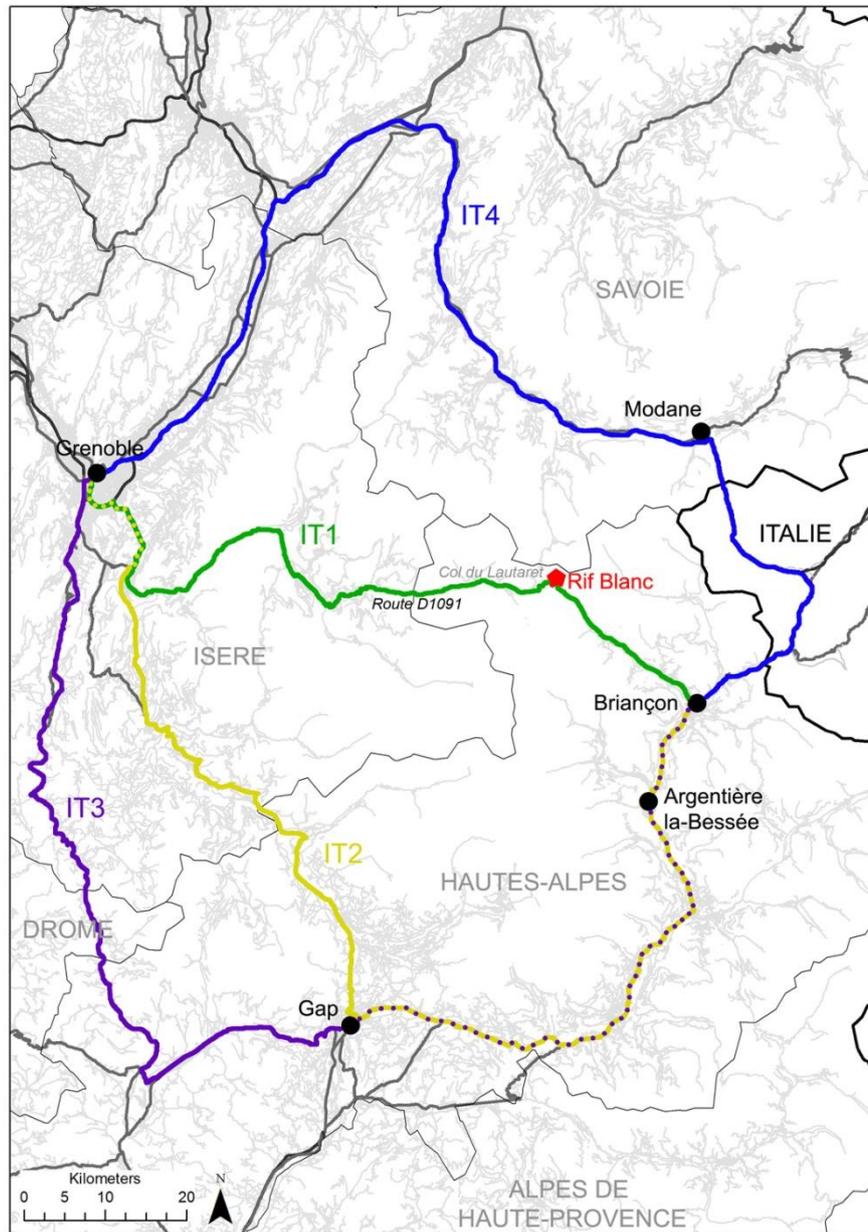


Figure 91. Itinéraires routiers permettant de relier les villes de Grenoble et Briançon

Pour la catégorie des véhicules légers, la comparaison des itinéraires de substitution (IT2, IT3, IT4) par rapport à l'axe principal (IT1.) permettant de relier les villes de Grenoble et Briançon mettent en avant l'itinéraire n°2 via Gap comme la solution alternative la plus intéressante en termes de distance kilométrique, bien que peu de différences soient observées avec l'itinéraire n°3 (Figure 92).

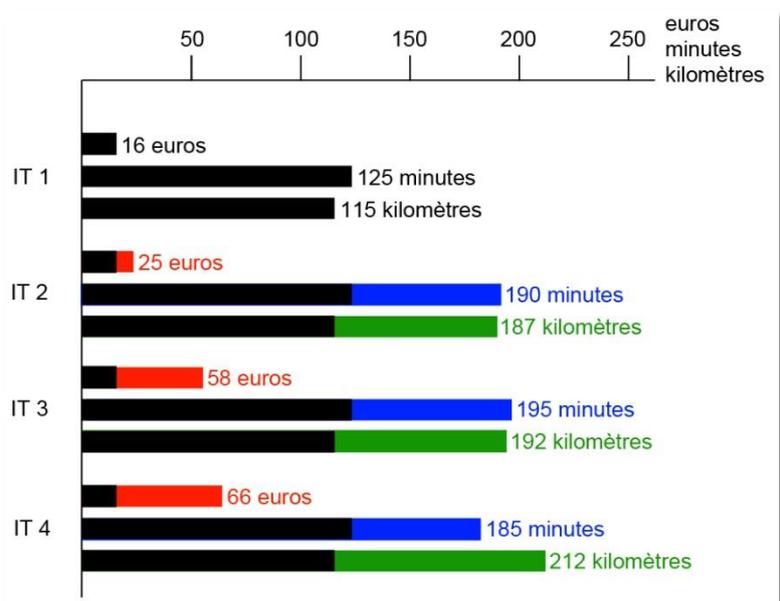


Figure 92. Comparaison des itinéraires reliant Grenoble à Briançon en distance temps (minutes), distance kilométrique et le coût associé (péage + carburant en euros)

L'axe routier le plus rapide est l'itinéraire 4 grâce à une circulation majoritairement effectuée sur voies rapides, pour autant ce gain de temps reste minime (maximum 10 minutes) vis à vis des autres itinéraires. Les surcoûts tarifaires (carburant et péage compris) occasionnés par les déviations sont en revanche très hétéroclites, l'itinéraire 4 est le plus onéreux (jusqu'à 3x le coût du trajet initial) en raison du passage par le tunnel du Fréjus à la frontière italienne, et l'augmentation de la vitesse autorisée. Sur ce propos, Dalziell et Nicholson (2001) retiennent des valeurs d'environ 0.20 euros/km (pour le véhicule) et 0.20 euros/mn (pour le conducteur) pour estimer le coût supplémentaire d'un trajet. On comprend aisément le surcoût que peut entraîner une déviation de plusieurs kilomètres pendant plusieurs jours pour des milliers d'usagers.

Les conséquences de la perturbation du réseau au niveau du Rif Blanc impliquent un rallongement du temps de trajet de plus d'une heure avec un détour de plus de 70km pour les usagers et ce pour la même origine-destination, tous itinéraires de contournement confondus.

Vraisemblablement, le Conseil Général des Hautes-Alpes propose ses itinéraires de contournement selon la logique du plus court chemin. La hiérarchisation des itinéraires

correspond à l'échelle de perturbations du réseau prévue dans les plans de gestion du trafic, où la priorité est donnée aux axes passant par la ville de Gap.

Si ce constat est valable pour les véhicules légers, la situation peut être différente pour la circulation des poids lourds. En effet, les résultats de Köll et al. (2007) portant sur le trafic transalpin en Autriche démontre que ces derniers n'optent que peu souvent pour l'itinéraire le plus court. Dans le cas présent, le choix de l'itinéraire 4 par l'autoroute de la Maurienne en Savoie peut s'avérer plus intéressant en termes de distance-temps pour des poids lourds ayant des contraintes de délai pour leur livraison, mais également en raison de la plus grande flexibilité de gabarit et de volumes autorisés. Il existe également des avantages tarifaires à certains péages autoroutiers pour les poids lourds.

3.1.2. Comparaison d'itinéraires: l'axe Lyon-Turin

Nous avons comparé tous les itinéraires possibles du réseau routier alpin utilisé préférentiellement par les poids lourds pour relier les villes de Lyon et Turin (Figure 93 ; 94) :

- IT1. Itinéraire principal via la vallée de la Maurienne, en empruntant l'autoroute A43 et/ou la départementale D1006 jusque Modane et le tunnel du Fréjus puis l'autoroute A42 en Italie.
- IT2. Liaison Lyon-Turin passant par les villes de Genève, Chamonix, Aoste : l'autoroute A40 et A5.
- IT3. Liaison Lyon-Turin passant par les villes de Grenoble, Briançon, Bardonecchia via : l'autoroute A43, A48, la départementale D1091, la nationale N94, la SS24, et l'autoroute A32.
- IT4. Liaison Lyon-Turin passant par les villes de Chambéry, Annecy, Chamonix, Aoste via : l'autoroute A43, A41, A410, A40 et A5.
- IT5. Liaison Lyon-Turin passant par les villes de Grenoble, Gap, Briançon, Bardonecchia via : l'autoroute A43, A48, les nationales N85 et N84, la SS24, et l'autoroute A32.

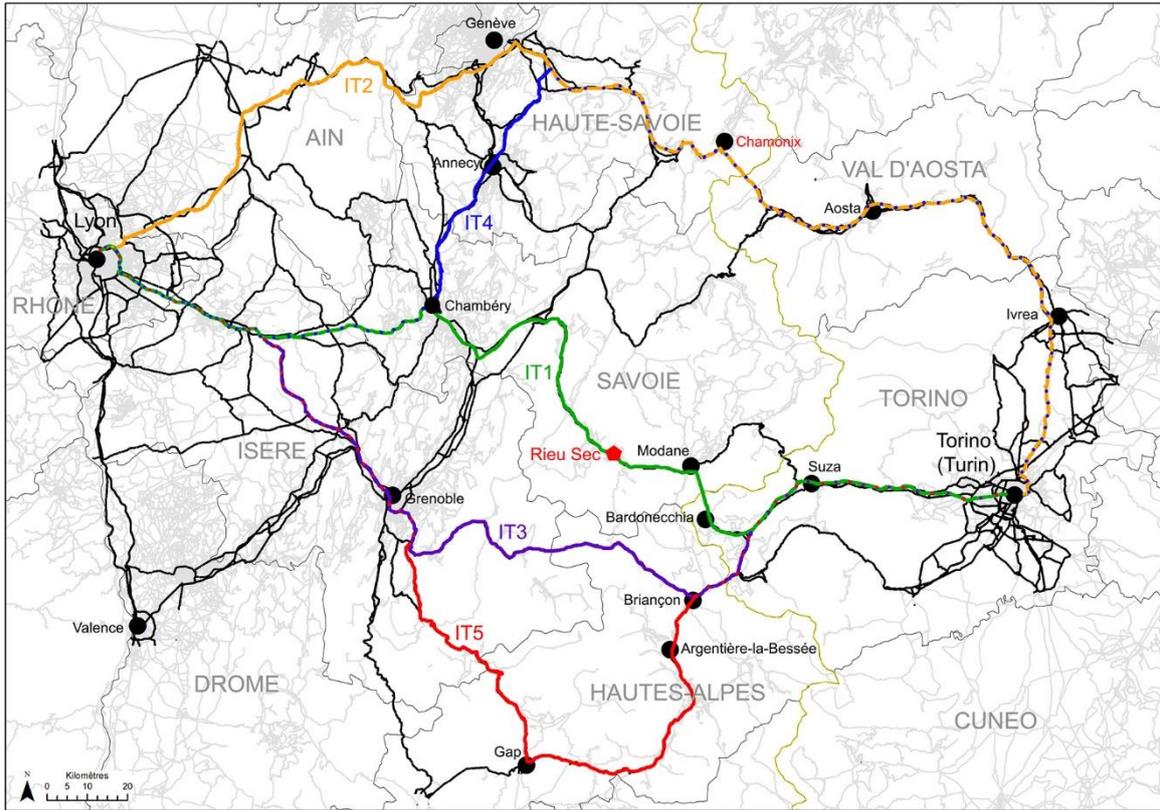


Figure 93. Principaux itinéraires routiers suivis par les poids lourds permettant de relier les villes de Lyon et Turin

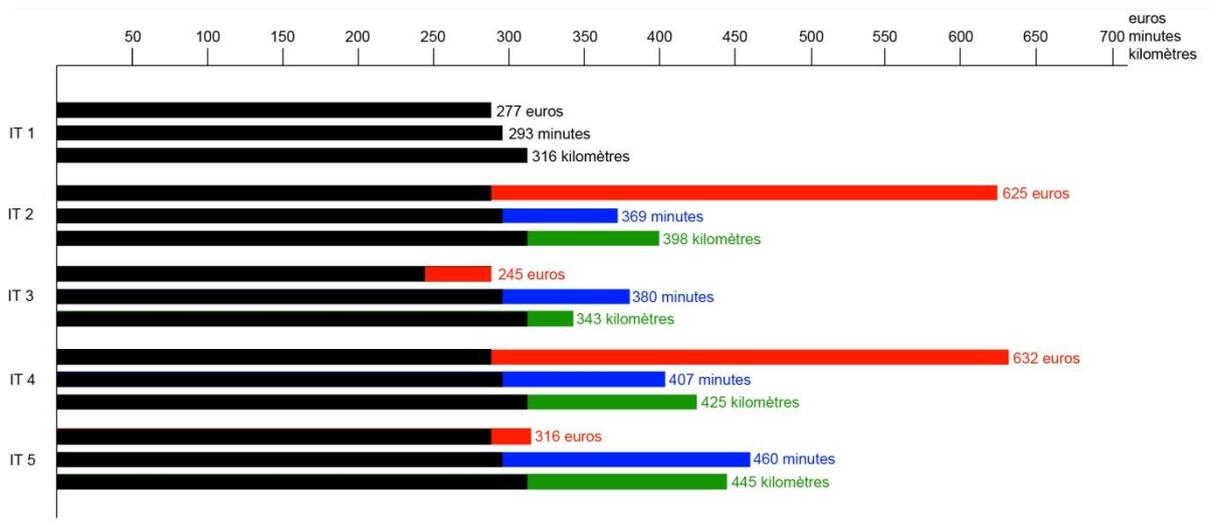


Figure 94. Comparaison des itinéraires reliant Lyon à Turin en distance temps (minutes), distance kilométrique et le coût associé (péage + carburant en euros)

La perturbation du réseau sur l'itinéraire de référence passant par la vallée de la Maurienne (Le Rieu Sec) implique un allongement du temps d'accès d'une heure et 20 minutes minimum et jusqu'à 2 heures et 50 minutes maximum. La distance de voyage la plus courte

correspond à l'itinéraire n°3. Cependant, les itinéraires n°3 et n°5 passent par des axes routiers départementaux soumis à des restrictions de circulation particulièrement contraignantes pour les entreprises de transport que ce soit en gabarit, tonnage et les journées autorisées à la circulation. L'indicateur significatif est le coût du trajet (carburant + péage) avec une augmentation de 126% pour l'itinéraire n°2 et 128% pour l'itinéraire n°4 par rapport à l'itinéraire de référence.

3.2. Cartographie de la dégradation de l'accessibilité territoriale

3.2.1. Temps d'accès sur l'axe Grenoble-Briançon

Modéliser l'accessibilité à partir du logiciel *RouteFinder* sous SIG nous a permis de cartographier les temps d'accès requis pour relier les villes de Grenoble et Briançon sur l'ensemble du réseau routier à l'échelle régionale. Grâce au mode de représentation en isolinks, les temps de trajet sont directement visualisables sur les tronçons routiers.

Les deux premières cartes représentent les temps d'accès à l'état normal, c'est-à-dire sans événement dommageable au réseau, au départ de Grenoble vers Briançon (Figure 95-A) puis au départ de Briançon vers Grenoble (Figure 95-B). Sur les deux cartes, la route départementale 1091 apparaît clairement comme celle permettant de relier le plus rapidement les deux villes. Le maillage routier est également beaucoup plus dense en Isère et dans la Drôme contrairement au département des Hautes-Alpes, où le réseau routier est clairement canalisé sur quelques axes en fond de vallée. Pour ces raisons même à l'état normal, l'accessibilité territoriale est plus réduite dans le sens Grenoble-Briançon plutôt que dans le sens Briançon-Grenoble. Les petites vallées peu connexes autour de Briançon et Argentières-la-Bessée apparaissent comme les moins bien desservies.

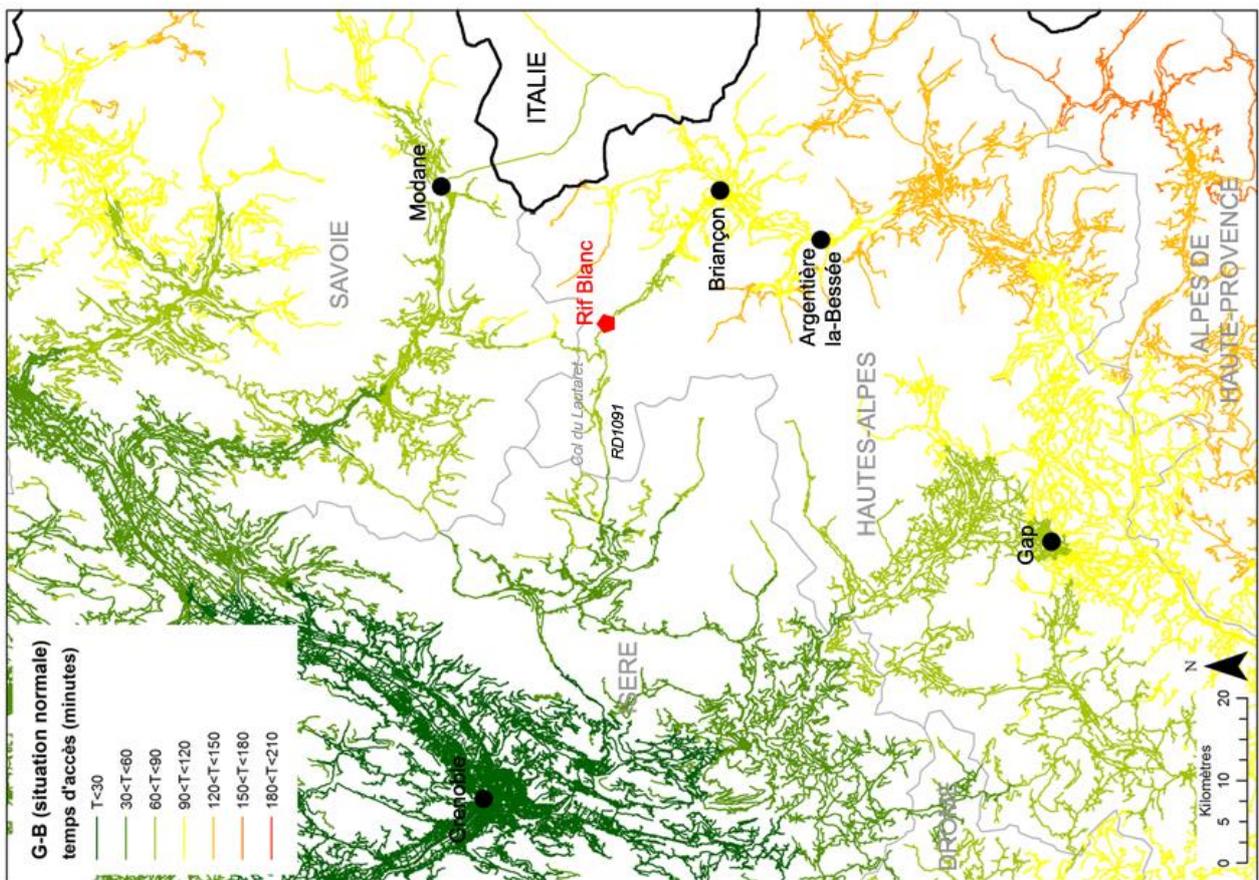
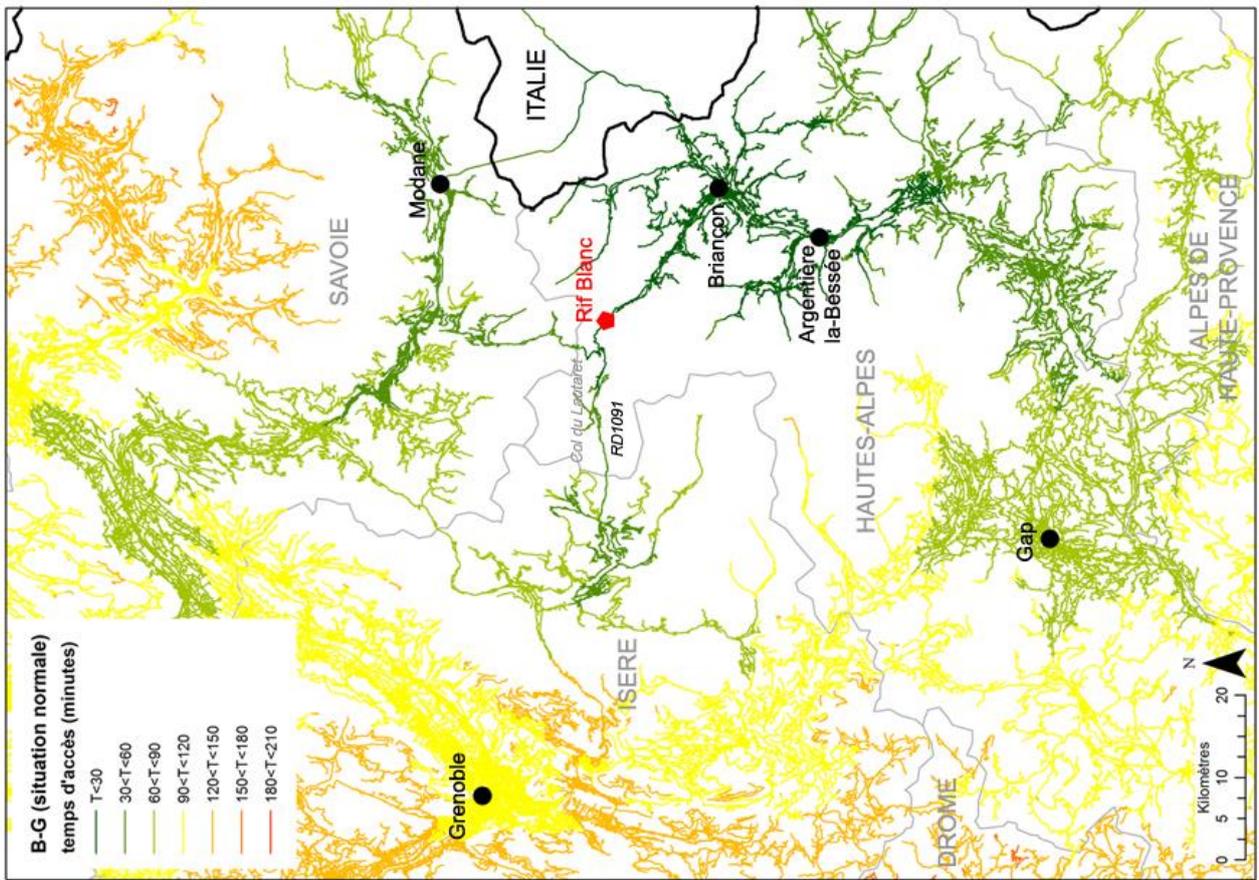


Figure 95. Temps d'accès en situation normale de : A) Grenoble à Briançon, B) Briançon à Grenoble

En comparaison, les deux cartes d'accès à l'état perturbé par la coupure de la route départementale D1091 au niveau du Rif Blanc, reflètent une dégradation progressive de l'accessibilité territoriale. Dans le sens Grenoble-Briançon (Figure 96-C), l'ensemble de la partie nord du département des Hautes-Alpes correspondant au Pays du Grand Briançonnais est affectée par un temps de trajet supplémentaire d'une heure environ, conformément aux observations précédentes en Figure 92. La perturbation affecte toute la hiérarchie du réseau, aussi bien les routes principales que les routes secondaires. Néanmoins, la coupure de la départementale D1091 ne crée pas de situation d'isolement, même si l'accès aux vallées est très perturbé, en particulier pour les vallées touristiques situées au nord des villes de Briançon, Argentières-la-Bessée et Gap. Cette situation est sans doute évitée grâce au passage par la frontière italienne.

Sans surprise, dans le sens Briançon vers Grenoble (Figure 96-D), la dégradation de l'accessibilité est nettement moins perceptible et plus diffuse, elle ne modifie pas beaucoup les temps d'accès, ni leur répartition spatiale. Seule la route départementale D1091 au-delà de la zone de coupure et les routes secondaires situées à proximité sont véritablement perturbées. Il n'existe pas non plus de situation d'isolement.

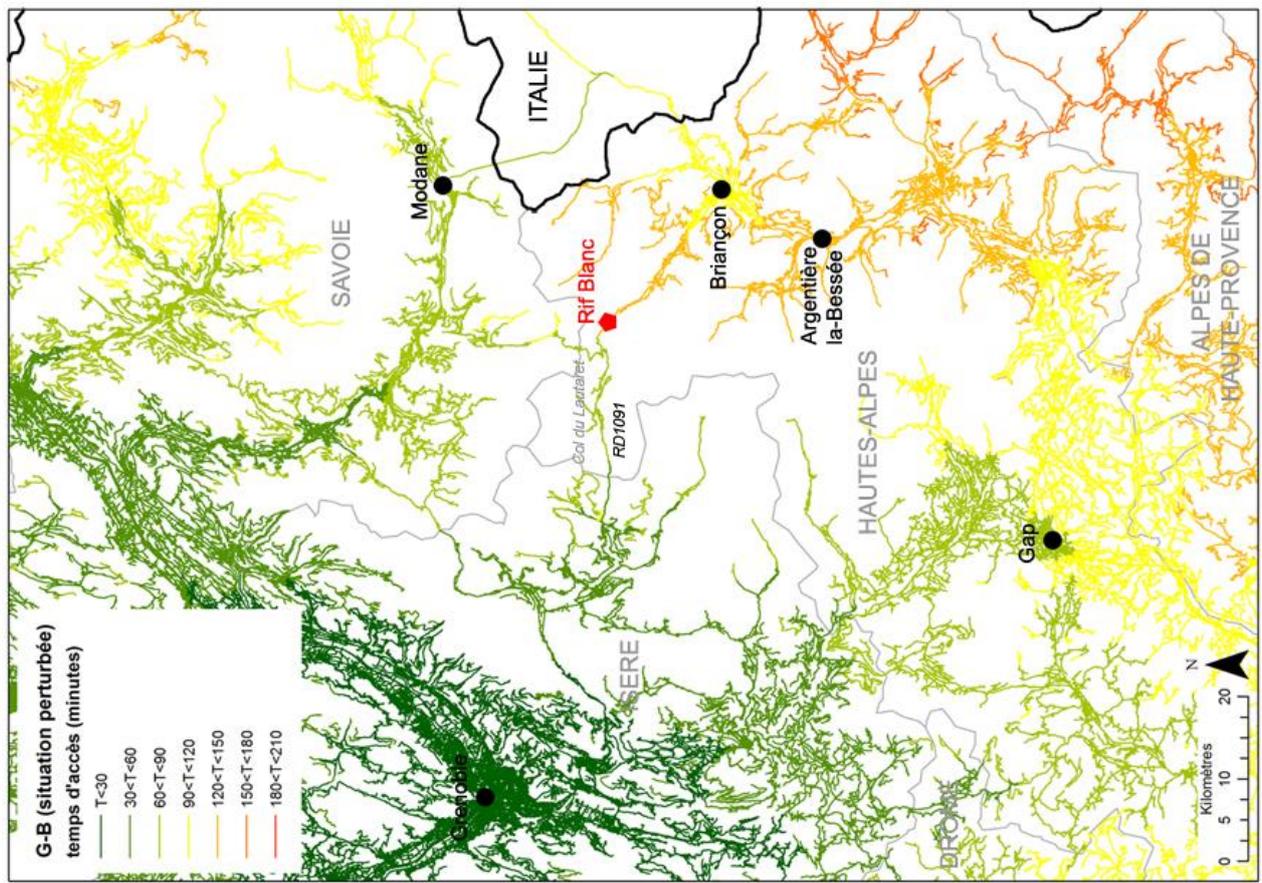
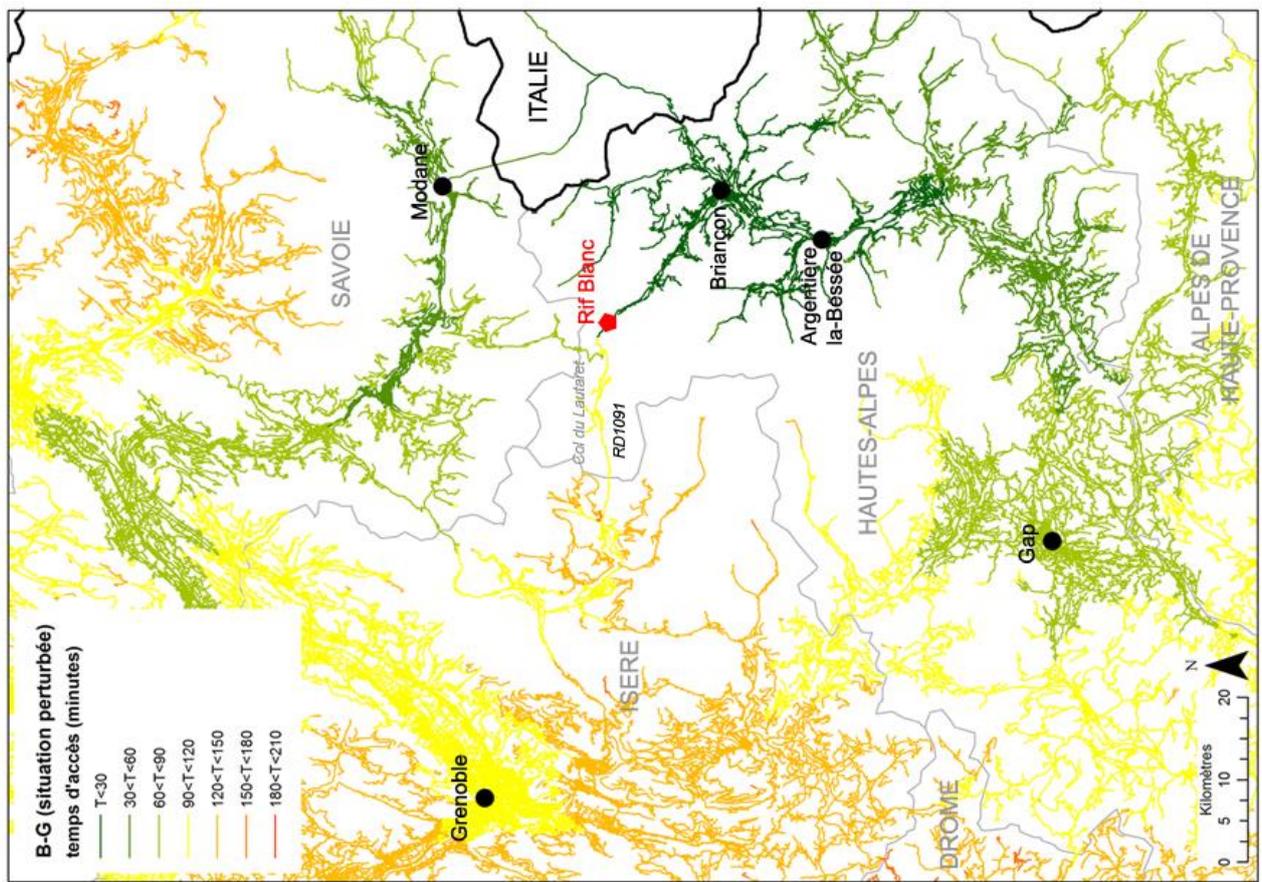


Figure 96. Temps d'accès en situation perturbée de : C) Grenoble à Briançon, D) Briançon à Grenoble

3.2.2. Indicateurs socio-économiques comme marqueurs supplémentaires des pertes d'accessibilité : l'exemple du Pays du Grand Briançonnais

a) La population accessible

Aux résultats précédents des scénarii d'accessibilité dans le sens Grenoble-Briançon, nous avons agrégé les données de population résidente par maille de 200m² de l'INSEE focalisé sur chaque commune du Pays du Grand Briançonnais. Pour rappel, il s'agit du regroupement de communes situé sur le territoire le plus attractif du département des Hautes-Alpes, englobant la ville de Briançon et la vallée de la Guisane. Leur mise en carte a permis de quantifier le nombre de personnes potentiellement impacté par la perturbation du réseau routier (Figure 97). L'exemple du Pays du Grand Briançonnais sert de marqueur supplémentaire pour la mesure de l'accessibilité.

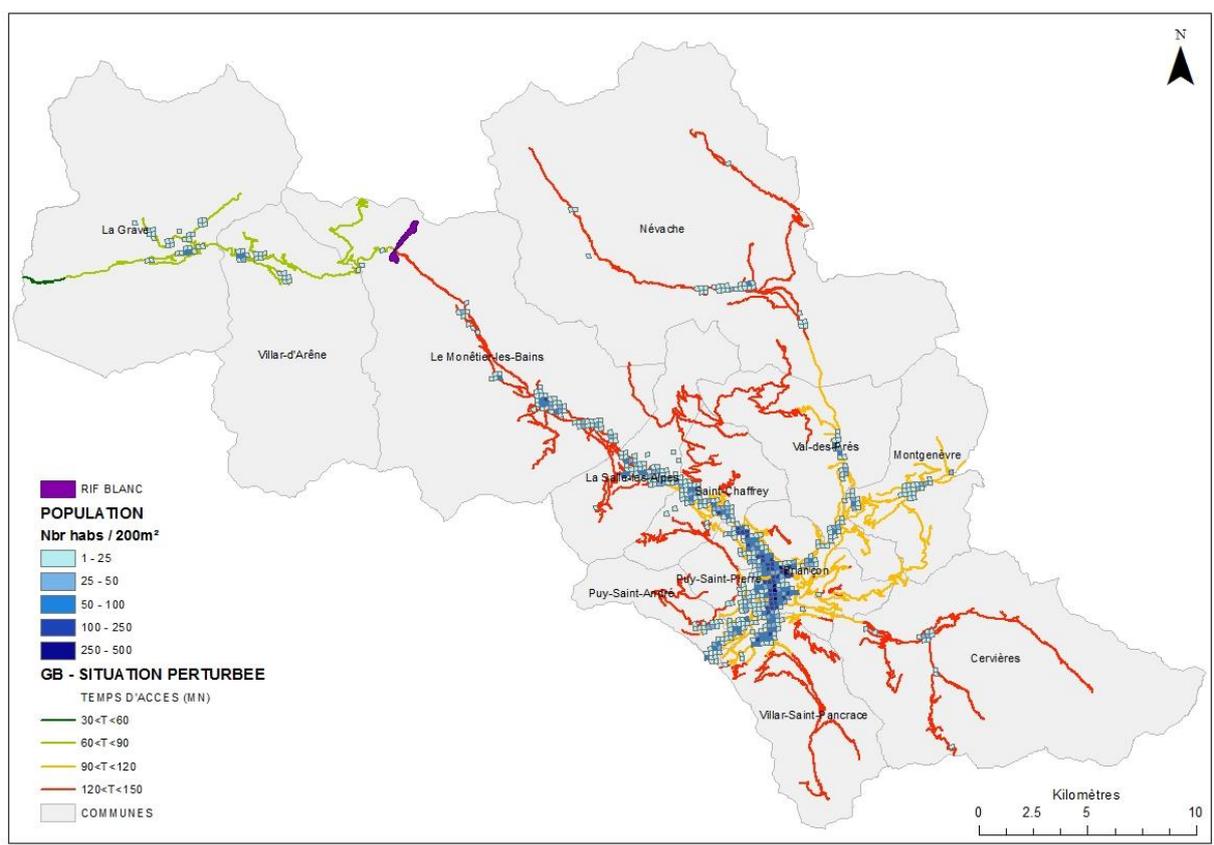


Figure 97. Population potentiellement impactée par les pertes d'accessibilité du territoire au Grand Briançonnais dans le sens Grenoble – Briançon

Bien que l'accès par l'Italie compense en partie les retards imputés aux déviations, l'extension spatiale des conséquences des perturbations est importante et le rallongement du

temps de trajet reste conforme aux observations précédentes. Au total dans le sens Grenoble – Briançon, 16 426 personnes sont potentiellement impactées par un retard de 30 à 60 minutes. Elles sont principalement localisées au niveau des nœuds urbains, sur les communes de Briançon, Puy-Saint-Pierre, Val-Des-Prés et Montgenèvre. Les impacts sont plus diffus pour la classe des retards de 60 à 90 minutes, bien que la portion de territoire concernée est plus importante en particulier dans les vallées dont le réseau est peu connexe, où près de 2 527 habitants peuvent être potentiellement impactés par la dégradation de l’accessibilité.

b) l’offre touristique disponible

De la même manière, nous avons agrégé les données du secteur touristique traduites sous la forme de lits disponibles (en hôtel et chambre d’hôtes) par kilomètre et par commune (INSEE) (Figure 98).

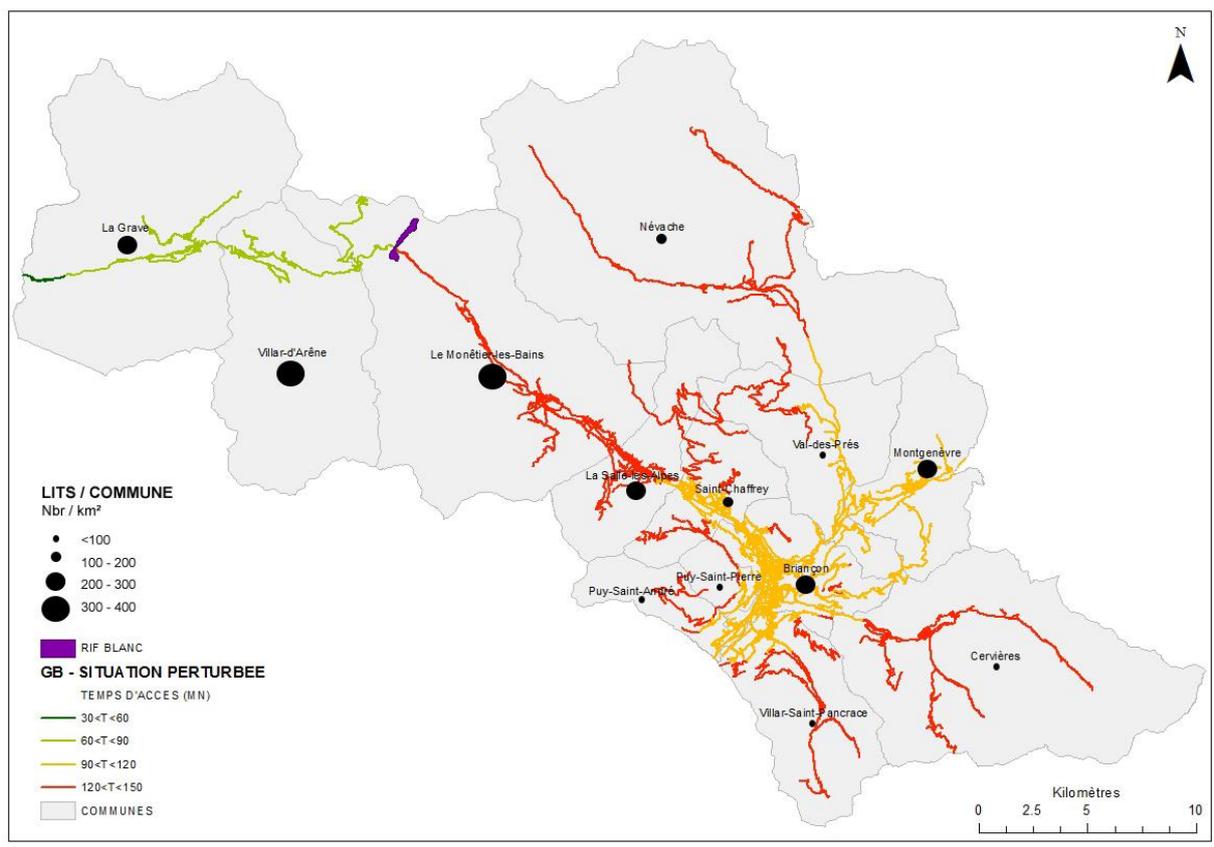


Figure 98. Nombre de lits (offre touristique par commune) potentiellement impactés par kilomètre linéaire par les pertes d’accessibilité du territoire du Grand Briançonnais dans le sens Grenoble – Briançon

Il apparaît nettement que les communes avec la plus grande capacité d'accueil touristique sont celles les moins accessibles, en particulier la commune de Monêtier-les-Bains et de La Salle-les-Alpes. La mise en évidence des difficultés d'accès dans le Grand Briançonnais pénalise l'économie touristique desservie par ce réseau puisque une forte proportion de clients étrangers en provenance d'Italie ou français de l'hexagone empruntent ces axes, surtout en période estivale. L'effet de la perturbation du réseau au niveau du Rif Blanc est donc directement ressenti sur la vallée de la Guisane. Ce constat est également valable pour les communes de Briançon et de Montgenèvre bien que le rallongement du temps de trajet soit moins conséquent. A noter que la vallée de la Clarée au niveau de la commune de Névache comptabilise peu de lits : très fréquentée en été, l'offre d'accueil se fait majoritairement sous la forme de campings, non comptabilisés dans cette étude mais les pertes d'accessibilités y sont toutes aussi importantes.

c) L'accès des secours

En cas d'atteinte physique aux personnes et aux biens directement imputable à l'évènement dommageable, tel que ce fût le cas en 2008 où un véhicule et ses occupants se sont retrouvés piégés dans la coulée, le *SDIS* basé à Gap demande à ses équipes locales d'intervenir sur le terrain. Dans ce cas, l'information est relayée auprès du Centre d'Incendie et de Secours situé sur la commune affectée (Figure 99). Pour le Rif Blanc, il s'agit du Centre d'Incendie et de Secours (CIS) de la station de Serre-Chevalier. Pour autant, en cas d'intervention des services de secours dans la vallée de la Guisane pour tout autre raison pendant les perturbations du réseau à cause de l'évènement, la proximité et la répartition des unités permet de couvrir l'ensemble de ce territoire sans dégradation d'accessibilité.

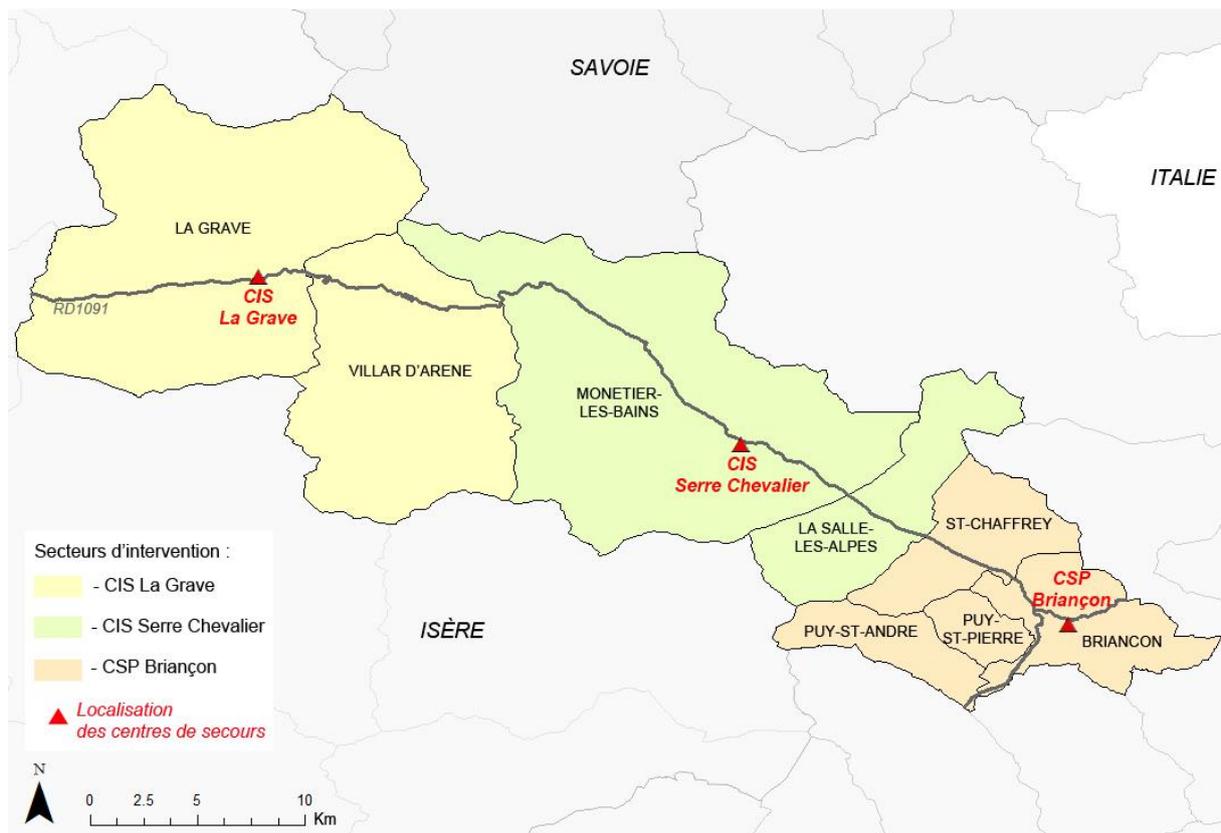


Figure 99. Répartition des secteurs d'intervention par commune pour chaque centre de secours dans la vallée de la Guisane

3.2.3. La dégradation de l'accessibilité en fond de vallée : Zermatt (Suisse)

La vallée de Zermatt est caractéristique d'une vallée en « *cul de sac* » et donc sans contournement possible. En situation normale sans perturbations routière, 23 minutes sont nécessaires pour effectuer le trajet de Täsch à Stalden (Figure X-A). En revanche, lors d'une coupure de réseau provoquée par le torrent du Ritigraben, l'accessibilité de la vallée est nulle pour le même itinéraire puisqu'il n'existe pas d'itinéraire de substitution pour éviter les tronçons impactés par l'évènement (Figure X-B). Les résultats des simulations mettent en évidence une situation d'enclavement, il n'est plus possible d'entrer ou de sortir de la vallée que ce soit par la route ou par le train. En cas d'évènement dommageable par le torrent du Ritigraben, ce sont toutes les villes situées en amont qui se retrouveraient isolées.

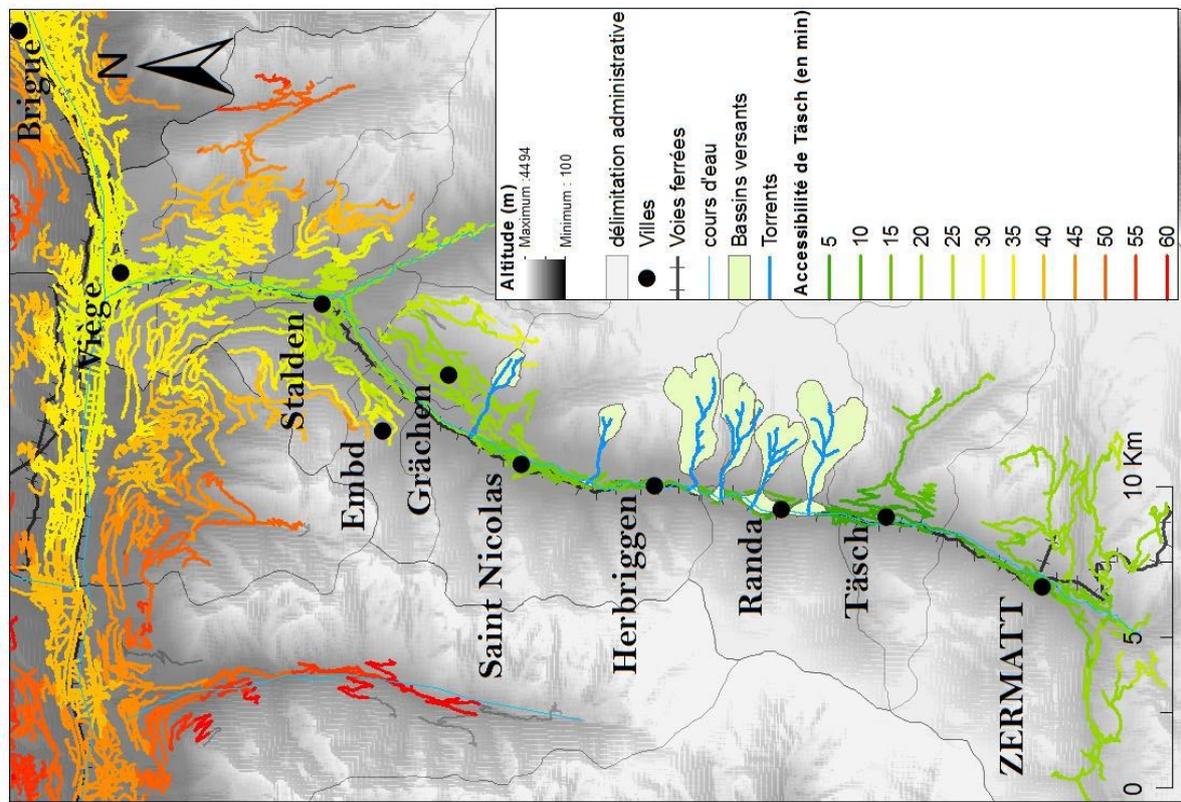
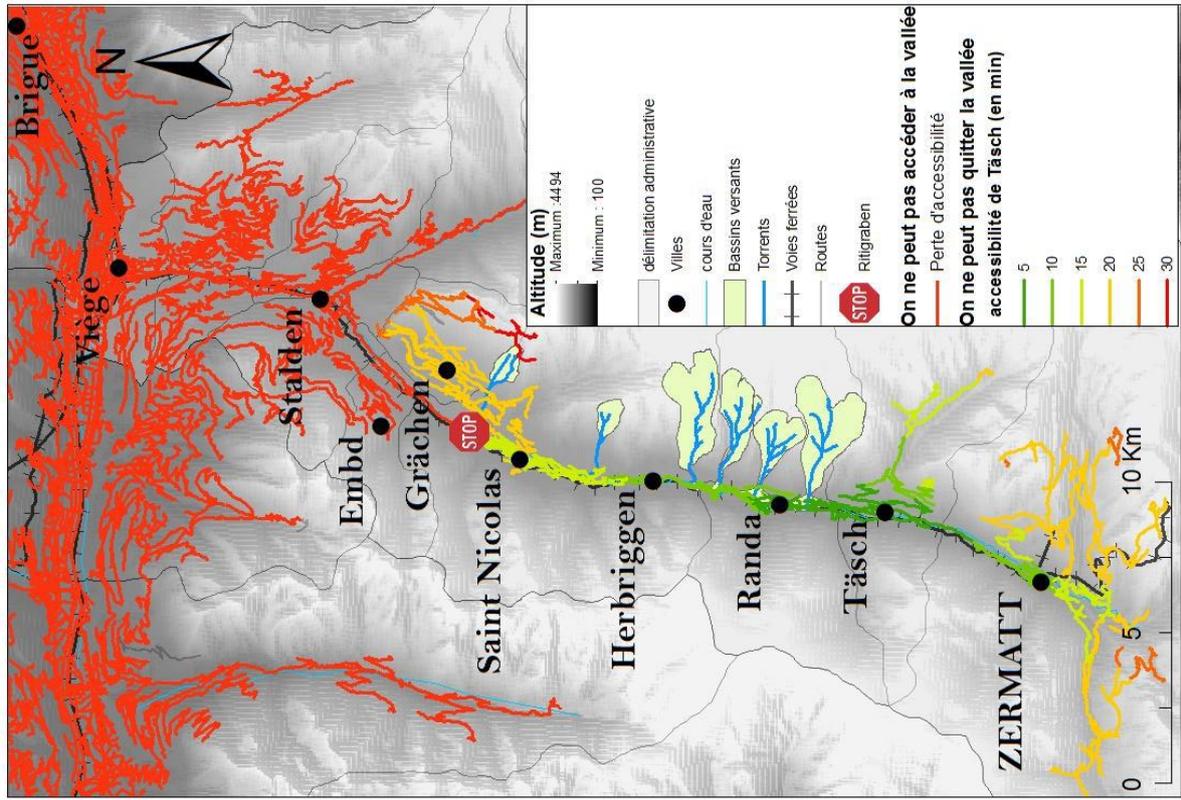


Figure 100. A. Accessibilité depuis Täsch en situation normale ; B. Accessibilité depuis Täsch en situation de coupure par le Ritigraben (Perche, 2013)

Conclusion

La méthodologie utilisée dans ce dernier chapitre utilise un outil de simulation graphique associé à un Système d'Information Géographique pour représenter la perturbation du réseau routier et les pertes d'accessibilité territoriale à la suite d'un évènement lave torrentielle. Plusieurs scénarii d'impacts ont été simulés : à l'échelle locale, régionale et internationale. Nous avons également tenté d'apporter des éléments de réponse quant aux conséquences socio-économiques, en couplant graphiquement les résultats d'itinéraires avec la répartition de la population, de l'offre touristique et des centres de secours.

Les simulations pour le torrent du Rif Blanc montrent que les perturbations de la départementale D1091 entraînent un rallongement du temps de trajet entre Grenoble et Briançon de plus d'une heure associé à un détour de plus de 70km, et ce quel que soit l'itinéraire substitution emprunté pour relier les deux villes (Utasse et al., 2015). Pour autant, le Conseil Général des Hautes-Alpes propose des itinéraires de contournement hiérarchisés selon la logique du plus court chemin où la priorité est donnée aux axes passant par la ville de Gap. Si la perturbation ne crée pas de situation d'isolement, elle affecte en revanche l'ensemble de la structure du réseau, aussi bien les routes principales que les routes secondaires. L'analyse des scénarii a également démontré que le territoire le plus impacté est le Pays du Grand Briançonnais situé au nord du département. La mise en évidence des difficultés d'accès pénalise l'économie touristique et la population résidente desservis par ce réseau routier (Utasse et al., 2013). A l'inverse, la répartition spatiale des centres de secours permet de couvrir l'ensemble de cette portion du territoire sans compromettre son accessibilité, même en situation perturbée.

Cette étude peut servir d'appui visant à l'amélioration des Plans de Gestion de Trafic à destination des gestionnaires de réseau. Elle fournit également une base de réflexion pour l'évaluation des impacts tels que les enjeux socio-économiques dépendants dudit réseau.

Pour le torrent du Rieu Sec, les résultats montrent que la perturbation du réseau sur l'itinéraire de référence (vallée de la Maurienne) de l'axe Lyon-Turin, implique un allongement du temps d'accès pour les poids lourds d'une heure et 20 minutes minimum et jusqu'à deux heures et 50 minutes maximum via les autres itinéraires. L'indicateur le plus significatif est le coût du trajet, avec une augmentation d'environ 126% par rapport à l'itinéraire de référence.

Dans le cas de la vallée de Zermatt en Suisse, et plus particulièrement le torrent du Ritigraben, les scénarii indiquent qu'en cas d'évènement dommageable au réseau de transport, toutes les villes situées en amont du torrent se retrouveraient isolées, alourdissant encore la situation d'enclavement de ce territoire. Une telle perte d'accessibilité interroge à la fois sur l'organisation des secours mais aussi sur les conséquences pour l'activité touristique en cas d'isolement prolongée de la vallée. Toutefois, aucune information supplémentaire n'a pu être obtenue à ce sujet.

Cette méthode présente cependant plusieurs limites :

- i. La non-prise en compte de certains paramètres topographiques tels que la pente et la sinuosité du réseau routier. Ces facteurs structurels contraignent les usagers à adapter leur vitesse localement.
- ii. La non-intégration de la situation routière en temps réel, s'entendent les accidents, les travaux en cours, les conditions météorologiques ou bien les points de congestion du trafic. L'altération des conditions de circulation peuvent représenter un frein supplémentaire à l'accessibilité, surtout sur la période estivale, pic de la fréquentation touristique.
- iii. L'usage d'un axe de référence simplifié utilisant une seule origine et une seule destination lors des simulations, peut nuire à la bonne représentativité de l'accessibilité.

Dans la perspective de futures investigations, l'utilisation d'un Système Multi-Agents (SMA) permettrait de faire interagir l'ensemble des paramètres dans un environnement plus dynamique et autonome.

Des scénarii plus complexes pourraient être modélisés depuis plusieurs points d'origine vers plusieurs destinations en vue de tester la connectivité du réseau. Les simulations multimodales intégrant plusieurs modes de transport pourraient également mettre en évidence l'interdépendance du réseau, particulièrement en situation perturbée.

Si les bases de données historiques (RTM) ne révèlent pas d'évènements dommageables au réseau ayant eu lieu aux mêmes dates, certaines années exceptionnelles se distinguent comme 1987 et 2008. Aussi, un scénario à priori pourrait imaginer la coupure simultanée mais réaliste de plusieurs tronçons de route et leurs conséquences territoriales.

Enfin, le croisement des résultats des temps d'accès avec les enjeux socio-économiques pourraient être renforcés jusqu'à intégrer une évaluation monétarisée des dommages indirects.

La thématique des réseaux de transport routiers est encore très peu abordée dans le domaine de la géographie des risques naturels. L'approche systémique du risque-réseau articulée autour de tous les aspects du risque constitue en cela une approche innovante. Depuis l'analyse de l'aléa à jusqu'à l'évaluation de la vulnérabilité directe/indirecte et appuyée d'un regard sur la gestion d'une crise routière.

a) Synthèse de la thèse

Le chapitre 1 présente la nécessité de cette recherche sur l'interaction *vulnérabilité des réseaux routiers – laves torrentielles* dans la gestion des risques hydro-gravitaires. Le cadre conceptuel permet tout d'abord de dresser un inventaire des types de vulnérabilités déclinées selon les propriétés des réseaux de transport, ce qui permet ensuite d'en déduire les modes d'endommagement du réseau. De manière générale, les études traitant de la vulnérabilité des réseaux relatives à l'impact d'un phénomène naturel sont assez rares dans la littérature scientifique, mais ces dernières années ont vu l'émergence d'études progressivement orientées sur cette problématique, dont quelques-unes s'intéressent à l'aléa lave torrentielle. S'il existe une grande disparité des approches, aucune méthodologie généraliste ne semble se profiler. La prédominance des travaux se focalise sur l'évaluation de la vulnérabilité directe et sur la monétisation des dommages. Il existe très peu d'études axées sur la gestion institutionnelle, la vulnérabilité indirecte ou bien sur la connexion entre aléa et vulnérabilité.

Le chapitre 2 justifie le choix de l'aléa lave torrentielle pour l'analyse du risque-réseau. Parmi l'ensemble des bassins-versants alpins ayant entraîné des dommages au réseau routier, les torrents du Rif Blanc, de Malefosse et du Rieu Sec semblaient particulièrement adaptés en tant que terrain d'étude parce que : 1) le territoire est naturellement contraint par la topographie, le réseau est donc peu connexe et très exposé, 2) les axes routiers impactés ont une valeur stratégique importante pour le territoire alpin, 3) les événements torrentiels dommageables sont nombreux et/ou récents, ce qui facilitait la mémoire collective des acteurs, 4) ils permettaient une approche multiscale pour l'évaluation du risque.

Le chapitre 3 constituait un travail exploratoire et original puisque nous avons mis en interaction le trio : lave torrentielle – précipitations journalières – évènements dommageables au réseau routier. Dans la grande majorité des cas, les évènements avec impact ont enregistré une intensité pluviométrique journalière supérieure à 10mm. Si ce seuil n'a pu être atteint le jour de l'évènement, il était souvent dépassé si l'on considère le cumul de pluies les jours précédant la date de l'évènement. Par ailleurs, l'analyse fréquentielle a démontré que la plupart des cumuls de pluies associés aux dates des évènements n'étaient pas des pluies extrêmes. Le propos reste cependant à nuancer puisqu'aucune véritable relation n'a pu être établie entre l'intensité pluviométrique et l'endommagement du réseau : elle ne semblait liée ni à l'impact direct ni à l'intensité des dommages.

Le chapitre 4 s'est intéressé à l'évaluation de l'aléa lave torrentielle. L'originalité de la méthode réside dans la mise en relation entre la modélisation numérique des coulées avec ses impacts physiques sur le tronçon routier. Les simulations numériques opérées dans le modèle de propagation *MassMov2D* ont ainsi permis de fournir des éléments de réponse à la vulnérabilité structurelle du réseau routier. Plusieurs scénarii d'endommagement ont été testés : 1) L'évènement dommageable du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc a servi de cas d'étude, il a permis de mettre en évidence les facteurs aggravants de vulnérabilité, en l'occurrence les ouvrages de génie civil pour l'évacuation des eaux pluviales et le tunnel routier. 2) Des scénarii prédictifs d'évènements sur les torrents de Malefosse et du Rieu Sec ont permis d'estimer les seuils volumiques nécessaires pour que l'extension maximale des dépôts puisse atteindre la route mais aussi être en mesure de l'impacter.

L'évènement dommageable du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc ayant eu lieu au cours de ce travail de thèse, présentait l'opportunité de mettre en place une méthode originale pour l'analyse de la vulnérabilité institutionnelle. Aussi, dans le chapitre 5, nous avons comparé l'organisation d'une gestion de crise routière telle qu'elle est représentée par les sources gouvernementales avec la réalité du terrain à la suite de l'évènement dommageable, grâce à un travail d'enquête auprès des acteurs.

Cette mise en confrontation a révélé que pour le département des Hautes-Alpes, la gestion de crise routière est davantage sous la responsabilité des gestionnaires de réseau départementaux plutôt que des autorités gouvernementales habituellement rencontrées

dans les schémas classiques de gestion des risques en France. Le Conseil Général y joue un rôle prépondérant que ce soit dans la prise en charge des dommages structurels, la gestion du trafic ou la transmission de l'information. Selon le contre-rendu des entretiens, les gestionnaires de réseau ont fait preuve de réactivité aux modalités d'alerte et d'organisation opérationnelle. Cette efficacité repose sur une collaboration accrue entre les différents services, chaque acteur étant intégré dans une cohérence d'ensemble pour un retour rapide à la normale. Néanmoins, les actions menées se focalisaient encore largement sur l'aspect curatif plutôt que sur des mesures préventives et les perturbations fonctionnelles engendrées au-delà de la zone endommagée paraissent sous-estimées dans la planification de la crise.

Le chapitre 6 a permis d'apprécier la vulnérabilité indirecte du réseau routier au-delà de la zone impactée. Le principe reposait sur l'analyse des conséquences fonctionnelles et territoriales provoquées par une rupture de réseau, à la suite d'un évènement lave torrentielle. La modélisation de la dégradation de l'accessibilité routière a permis ici de mesurer l'étendue spatiale et temporelle des perturbations mais aussi de mesurer les préjudices induits sur les enjeux territoriaux.

Les simulations pour le torrent du Rif Blanc ont montré un allongement du temps de trajet pour les véhicules légers entre Grenoble et Briançon de plus d'une heure avec un détour de plus de 70km. Si la perturbation ne créait pas de situation d'isolement, elle affectait l'ensemble de la structure du réseau. Les difficultés d'accès pénalisaient l'économie touristique et la population résidente mais ne semblait pas impacter les services de secours. Sur le Rieu Sec, la perturbation du réseau pour l'axe Lyon-Turin impliquait un allongement du temps d'accès pour les poids lourds de presque trois heures, mais l'indicateur le plus significatif était le surcoût du trajet. A titre de comparaison, pour la vallée de Zermatt en Suisse, toutes les villes de la vallée se retrouveraient isolées en cas d'évènement dommageable au réseau aboutissant ainsi à une situation d'enclavement de ce territoire.

b) Limites de la thèse

L'exploitation des données météorologiques :

Dans notre étude, l'analyse fréquentielle cumulée sur plusieurs jours ne semblait pas toujours pertinente puisqu'elle tendait à exagérer artificiellement les valeurs extrêmes. De même, la similitude entre le comportement statistique et la réalité des événements pluviométriques pouvait être perturbée par les seuils définis. Les précipitations n'étant pas des variables continues dans le temps, les hauteurs d'eau tombées en 24 heures n'avaient pas de réalité physique, un même total pouvait intégrer 2 ou 3 averses.

Les résultats étaient également très dépendants de la série de données météorologique utilisée. En effet, les enregistrements des stations météorologiques ne correspondaient pas aux pluies réellement perçues par le bassin-versant, en raison : des variations locales des pluies captées, de l'éloignement géographique et du relief. Enfin, la réponse des bassins-versants était aussi liée aux conditions géomorphologiques locales.

Les limites de la modélisation des écoulements torrentiels :

Cette technique de modélisation se heurte invariablement au calcul des volumes mobilisables. Leurs méthodes d'estimation étant encore balbutiantes, il était très difficile d'obtenir des valeurs réelles quantifiées et vérifiées des volumes de matériaux mis en mouvement par les laves torrentielles sans une instrumentation lourde et prolongée dans le temps sur chaque bassin-versant. Dans ce cas de figure, les paramètres rhéologiques pouvaient également être affinés au moyen d'investigation de terrain plus poussées.

La précision des résultats était fortement contrainte par la résolution du MNT. En raison de contraintes logistiques et techniques, il n'a pas été possible d'obtenir une donnée plus précise pour les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec. Enfin, le modèle modélisait la coulée depuis les zones sources en tête de bassin mais il ne prenait pas compte la remobilisation possible des matériaux situés dans le chenal.

Les entretiens lors de la gestion de crise :

Ces travaux de recherche se sont concentrés sur la gestion de crise routière selon le point de vue des gestionnaires de réseau. Faute de données disponibles, nous n'avons pas

intégré d'autres populations cibles telles que les responsables touristiques et les usagers de la route.

Les limites de la modélisation des temps d'accès :

La modélisation utilisée dans cette étude ne pouvait pas directement intégrer certains paramètres topographiques tels que la pente et la sinuosité du réseau routier. De même, le modèle ne permettait pas de simuler la situation routière en temps réel telle que les facteurs conjecturels d'altération de la circulation. Enfin, l'usage d'un axe de référence simplifié utilisant une seule origine et une seule destination lors des simulations, pouvait nuire à la bonne représentativité de l'accessibilité.

c) Apports de la thèse pour de futures investigations

Ce travail de recherche sur le risque-réseau a démontré que la problématique de la vulnérabilité des réseaux de transports routiers face à l'aléa lave torrentiel nécessite d'être plus approfondie.

Les futures investigations sur la relation entre les pluies et les dommages pourraient intégrer des paramètres géomorphologiques comme la fonte nivale, la fonte du pergélisol et le stock de matériaux disponibles à la mobilisation. Pour pallier au manque de représentativité d'une telle analyse à l'échelle locale, ce type de démarche pourrait être reproduit à l'échelle du massif alpin, sur tous les bassins-versants avec impact réseau afin d'en dégager une tendance plus fiable et généraliste.

Les bassins-versants situés sur les tronçons routiers particulièrement vulnérables pourraient bénéficier d'une instrumentation in situ pour un suivi spécifique à plus long terme de l'aléa. De même, nos analyses ont mis en évidence des facteurs structurels aggravants comme des ouvrages mal adaptés aux écoulements torrentiels. Ces derniers pourraient faire l'objet d'études de Génie Civil.

L'analyse de la gestion de crise routière pourrait être complétée avec des enquêtes auprès des usagers de la route tels que les entreprises de transport ou les habitants qui empruntent quotidiennement ces axes. Au regard de l'importance économique de l'activité touristique dans ces régions, il pourrait être intéressant de travailler avec les professionnels du tourisme, indirectement impactés par les perturbations du réseau.

Concernant les acteurs en charge de la gestion opérationnelle de la crise, certains aspects pourraient encore être développés : 1) Consolider sur le long terme cette volonté d'échanges d'informations entre les différents gestionnaires de réseau au-delà des clivages administratifs. D'autant qu'il faudra s'attendre à nouveaux découpages de compétences entre les services d'État avec le regroupement actuel des régions. 2) S'orienter vers la diffusion de diagnostics territoriaux standardisés du risque-réseau appliqué aux laves torrentielles. 3) Sensibiliser davantage le public et les professionnels du tourisme pour une meilleure prise de conscience du risque.

Enfin, l'utilisation d'un Système Multi-Agents permettrait de faire interagir l'ensemble des paramètres dans un environnement plus dynamique et autonome. L'analyse des enjeux socio-économiques exposés pourraient être renforcés jusqu'à intégrer une évaluation monétarisée des dommages indirects.

Ce travail pourrait représenter un appui supplémentaire pour l'aide à la décision des pouvoirs publics ou bien alimenter le débat sur les façons de minimiser la vulnérabilité des réseaux de transport vis-à-vis de ce type d'aléa hydro-gravitaire.

A

- Access Across America (<http://ao.umn.edu/research/america>) measures accessibility to jobs via various modes of transportation in major metropolitan areas across the United States.
- Adger, W.N., Hughes, T.P., Folke, C., Carpenter, S.R., Rockstrom, J. 2005. Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309 (5737), pp. 1036-1039.
- Aleotti, P. 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*. 73, pp. 247-265.
- Alexander, D.E. 2005. Vulnerability to Landslides. *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, pp. 175-198.
- Ancey, C., Richard, D., Meunier, M. 2001. Eléments d'hydraulique torrentielle pour l'ingénieur. *Alteaurisk / Dynal*. Cemagref Grenoble, pp. 22-44.
- Anchierri, L. 1966. Les crues du torrent de Pontamafrey en 1965. *Revue de Géographie Alpine*, 54 (1), pp. 15-42.
- Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (ANENA). 2013. Guide pratique à l'intention des élus et des services communaux pour la gestion d'une crise avalanche, hors activités sportives. 101p.
- Appert, M., Chapelon, L. 2006. La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération - In : La mise en carte des risques naturels. *Géorisques vol.2*. Université Montpellier III, pp. 47-58.
- Argyroudis, S., Kaynia, A.M. 2014. Fragility Functions of Highway and Railway Infrastructure. SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 27, pp. 299-326.
- Armento, M.C, Genevois, R., Tecca, R.R. 2008. Comparison of two debris flows in the Cortina d'Ampezzo area, Dolomites, Italy. *Landslides*, 5, pp. 143-150.
- Aronica, G., Biondi, G., Brigandi, G., Cascone, E., Lanza, S., Randazzo, G. 2012. Assessment and mapping of debris-flow risk in a small catchment in eastern Sicily through integrated numerical simulations and GIS. *Physics and Chemistry of the Earth*, 49, pp. 52-63.
- ARNICA. 2011-2013. Assessment of Risks on transportation Networks resulting from slope Instability and Climate change in the Alps. Projet Européen, Cirlce-2 Montagne. www.lgp.cnrs-bellevue.fr/arnica.
- Arsik, I., Salman, F.S. 2013. Modeling Earthquake Vulnerability of Highway Networks. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41, pp. 319-326.

Audrechy, D. 2001. Vivre en montagne avec les Risques Naturels : comprendre, observer, s'adapter. Document de vulgarisation et de sensibilisation aux risques naturels. *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*, 43p.

B

Ballandras, S. 1993. Les crues torrentielles de l'été 1987 dans les Alpes françaises. Interprétations et enseignements - In: *Revue de Géographie Alpine*. 1993, 81 (3), pp. 13-32.

Baraille, S., Blanchon, D., Gilbert, D., Lestournelle, R. 2010. Les torrents de montagne, l'exemple du Briançonnais. *Société Géologique et Minière du Briançonnais*. Éditions du Fournel, 101p.

Batelle. 2007. Evaluation of the systems available redundancy to compensate for loss of transportation assets resulting from natural disasters. *Retrieved september 2009 from transportation for tomorrow*.

Baud, P., Bourgeat, S., Bras, C. 2013. Dictionnaire de Géographie, 5^e édition. Haltier, Paris.

Bavoux, J.F., Beaucire, F., Chapelon, L., Zembri, P. 2005. Géographie des transports. *Collection U. Armand Colin*, Paris, 232p.

Basöz, N., Kiremidjian, A.S. 1995. A bridge prioritization method based on transportation system performance using GIS. *Proceedings of the 6th US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems* (PublicWorks Research Institute, Tsukuba Science City), pp. 437-449.

Becerra, S., Peltier, A. 2009. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. Éditions L'harmattan, Paris, 575 p.

Beguiria, S., Van Asch, T.W.J., Malet, J.P., Gröndahl, S. 2009a. 'A GIS based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain'. *Natural and Hazards System Sciences*, 9, pp. 1897-1909.

Beguiria, S., Van Hees, M.J, Geertsema, M. 2009b. Comparison of three landslide runout models on the Turnoff Creek rock avalanche, British Columbia. *Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modeling*. Strasbourg, CERG Editions, pp. 243-247.

Bell, M.G.H. 2000. A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks. *Transportation Research, Part B* 34, pp.533-545.

Berdica, K. 2002. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9, pp. 117-127.

Berti, M., Simoni, A. 2007. Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships. *Geomorphology*, 90, pp. 144-161.

Berthier, N. 2010. Les techniques d'enquête en sciences sociales. 4e Édition. Armand Colin, 352p.

Besson, L. 1996. Les risques naturels en montagne. Traitement Prévention Surveillance, Artès-publiaip, 438 p.

- Besson, L. 2005. Les risques naturels – de la connaissance pratique à la gestion administrative. Éditions Techni-Cités. 592p.
- Bianco, G., Brochot, S., Laigle, D., Ruberto, G. 2001. Mise en commun des méthodes et des connaissances sur les processus des laves torrentielles pour la protection des zones habitées. Dans : Zanolini, F., Alzate, L., Turroni, E. Proiet InterregII 1994–1999 France-Italie. Connexion réseaux de données et mises en commun des connaissances et des expériences pour la gestion des risques d’inondations en région alpine. Co-édition région Piémont/région Rhône-Alpes, pp 133–172.
- Birkmann, J. 2005. Danger need not spell disaster – But how vulnerable are we ? UNU
- Blanchet, A., Gotman, A. 2000. L’enquête et ses méthodes : l’entretien. Édition Nathan Université. 125p.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M. 2012. A contribution to a better understanding of the meteorological triggering conditions of past debris flows. *12th congress interpraevent, Grenoble/France Conference Proceedings.*
- Bonachea, J., Bruschi, V.M., Remondo, J., Gonzales-Diez, A., Salas, L., Bertens, J., Cendrero, A., Ortero, C., Giusti, C., Fabbri, A., Gonzales-Lastra, J.R., Aramburu, J.M. 2005. An approach for quantifying geomorphological impacts for EIA of transportation infrastructures: a case study in northern Spain. *Geomorphology*, 66, pp. 95–117.
- Bonachea, J., Remondo, J., Diaz de Teran, J.R., Gonzales-Diez, A., Cendrero, A. 2009. Landslide risk models for decision making. *Risk Analysis*, 29 (11), pp. 1629-1643.
- Bono, F., Gutiérrez, E. 2011. A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks. *Journal of Transport Geography*, 19, pp. 1443-1455.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M. 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, pp. 194–205.
- Bouchon, S. 2006. L’application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques : quelles implications pour la gestion territoriale des risques ? *Responsabilité & Environnement*, 43, pp. 35-42.
- Boudières, V. 2007. De la gestion des risques, aux risques de la gestion, Approche endogène du risque dans les territoires touristiques de montagne. *Géocarrefour*, 82, 7p.
- Brochot, S., Marchi, L., Lang, M. 2002. Debris flows volumes assessment: available methods and application to the Poucet torrent (Savoy, France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, pp.389-402.
- Brundsen, D. 1979. Mass Movements, in: process in geomorphology, edited by Embleton, C. and Thornes, J., Arnold, E. pp. 131-186.

- Brunet, R., Ferras, R., Théry, H. 1992. Les mots de la géographie. *Dictionnaire critique*. Paris : GIP RECLUS, La Documentation Française. 470p.
- Budetta, P. 2002. Risk assessment from debris flows in pyroclastic deposits along a motorway, Italy. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61 (4), pp. 293–301.
- Budetta, P. 2004. Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 71–81.
- Budetta, P., Nappi, M. 2013. Comparison between qualitative rockfall risk rating systems for a road affected by high traffic intensity, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, pp. 1643-1653.
- Bulteau, S. 1997. Etude topologique des réseaux de communication : fiabilité et vulnérabilité. *Université de Rennes*, 167p.
- Bunce, C.M., Cruden, D.M., Morgenstern, N.R. 1997. Assessment of the hazard from rock fall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (3), pp. 344-356.

C

- Caine, N. 1980. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr Ann*, A, 62, pp. 23–27.
- Cannon, S.H. 1993. An empirical model for the volume-change behavior of debrisflows. In: Shen, H.W., Su, S.T., Wen, F. (Eds.), *National Conference on Hydraulic Engineering*. ASCE, San Francisco, pp. 1768–1773.
- Cannon, S. H., Garther, J. E., Wilson, R. C., Bowers, J. C., Laber, J. L. 2008. Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California. *Geomorphology*, 96 (3-4), pp. 250-269.
- CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques). 1996. Review of existing land use transport model. Rapport du CERTU, 76p.
- CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques). 2006. Calculs d'accessibilité : Impact des spécifications du réseau routier sur les calculs d'accessibilité, données sources méthodes. 41p.
- Chang, S.E. 2003. Transportation planning for disasters: an accessibility approach. *Environment and Planning, A* 35, pp. 1051–1072.
- Chang, S.E., Nojima, N. 2001. Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective. *Transportation Research, Part A* 35, pp. 475-494.
- Chapelon, L. 1996. Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité. *Mappemonde*, 3, pp. 1051-1072.
- Chapelon L. 1999. NOD : logiciel d'évaluation spatiale et temporelle des projets de modification de l'offre de transport, Communication au séminaire du groupe "Modèles" du GDR Libergéo tenu à Tours le 22 octobre 1999.

- Chapelon, L. 2006. Accessibility as a marker of disparities of influence among port cities in Europe. *Cybergeo : European Journal of Geography. Systems, modeling, geostatistics*, 25p.
- Chapelon, Accessibilité. <http://www.hypergeo.eu>.
- Chen, H., Lee, C.F. 2003. A dynamic model for rainfall-induced landslides on natural slopes. *Geomorphology*, 51, pp. 269-288.
- Chen, H., Lee, C.F. 2004. Geohazards of slope mass movement and its prevention in Hong Kong. *Engineering Geology*, 76, pp. 3-25.
- Chen, X., Kwan, M.P., Li, Q., Chen, J. 2012. A model for evacuation risk assessment with consideration of pre- and post-disaster factors. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36, pp. 207-217.
- Chaline, C., Dubois-Maury, J. 1994. La ville et ses dangers. Paris : Masson.
- Cho, S., Gordon, P., Moore, J.E., Richardson, H.W., Shinozuka, M., Chang, S. 2001. Integrating transportation network and regional economic models to estimate the costs of a large urban earthquake. *Journal of Regional Science*, 41 (1), pp. 39-65.
- Coe, J.A., Godt, J.W., Parise, M., Moscariello, A. 2003. Estimating debris-flow using fan stratigraphy, historic records, and drainage-basin morphology, Interstate 70 highway corridor, central Colorado, USA. In: Rickenmann, Chen (eds) *Debris-flow hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment*, Millpress, Rotterdam, pp 1085–1096.
- Cojean, R., Laugier, P., Le Mignon, N., Pollet, N., Thenevin, I., Fleurisson, J.A. 2002. Risques naturels et montagne : Mouvements de terrain et risques hydrologiques associés et induits. Évaluation des méthodes et moyens de prévention et analyse des retours d'investissement. Information préventive. *Rapport final d'Armines-CGI*, 298p.
- Colas, B., Vincent, M. 2005. Gestion du risque lié aux chutes de blocs sur le réseau routier départemental des Gorges du Tarn et de la Jonte. *Géoline*, Lyon, 3p.
- Collectif, sous la direction de Leone, F., Vinet, F. 2006. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques. *Géorisques*, 1, Université Paul-Valéry, Montpellier III, 140 p.
- Commissariat Général au Développement Durable. 2012. La résilience des territoires soumis aux risques naturels et technologiques, 2p.
- Commissariat Général au Développement Durable. 2014. Bibliographie du CRDD (Centre de Ressources du Développement Durable) : La résilience des territoires. 13p.
- CMPMVS software. <http://ptak.felk.cvut.cz/sfmservice/websfm.pl?menu=cmpmvs>.
- Conseil Général des Hautes-Alpes. 2010. Protocole officiel de coordination pour la gestion du trafic de la route RD1091 et RD1075. 7p.

- Conseil Général des Hautes-Alpes. 2012. Etude prospective sur le développement Économique des Hautes-Alpes. Rapport de la phase 1 de l'étude – Diagnostic des dynamiques économiques, 56p.
- Conseil Général de Savoie. 2006. Observatoire des Déplacements en Savoie. 1, 6p.
- Conseil Général de Savoie. 2008. Observatoire des Déplacements en Savoie. 4, 8p.
- Conseil Général de Savoie. 2009. Observatoire des Déplacements en Savoie. 5, 8p.
- Corominas, J. 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pp. 260–271.
- Corominas, J. 2000. Landslides and climate. In: Bromhead E, Dixon N, Ibsen ML (eds) *Keynote lecture of Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. A. Balkema, Cardiff, Wales, 4, pp. 1–33.
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigó, J. 2003. Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30 (3), pp. 421–435.
- Costa-Cabral, M.C., Burges, S.J. 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model offlow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30 (6), pp. 1681–1692.
- Costa, A.C., Soares, A. 2009. Homogenization of climate data: review and new perspectives using geostatistics. *Mathematical Geosciences*, 41, pp. 291-305.
- Cousot, P., Meunier, M. 1995. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40, Cemagref, Grenoble, 20p.
- CREALP. <http://www.crealp.ch/fr/>.
- Crosta, G.B., Frattini, P. 2001. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: Mugnai A, Guzzetti F, Roth G (eds) *Mediterranean storms. Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms*. Siena, Italy, pp. 463–487.
- Crosta, G.B., Cucchiario, S., Frattini, P. 2003. Validation of semi-empirical relationships for the definition of debris-flow behavior in granular materials. In: Rickenmann, D., Chen, C. (Eds.), *3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*. Millpress, Davos, pp. 821–831.
- Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J. 2008. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18, pp. 598–606.

D

- D'Agostino, V. 1996. Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale. In: Scritti dedicati a Giovanni Tournon, *Associazione Italiana di Ingegneria Agraria–Associazione Idrotecnica Italiana*, pp. 111–123.

- D'Agostino, V., Marchi, L. 2003. Geomorphological estimation of debris-flow volumes in alpine basins. *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Rickenmann & Chen (eds). Millpress Rotterdam, pp. 1097-1106.
- D'Agostino, V., Cesca, M., Marchi, L. 2009. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 115, pp. 294–304.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, pp. 65-87.
- Dalvi, M.Q., Martin, K.M. 1978. The measurement of accessibility: some preliminary results. *Transportation*, 5 (1), pp. 17-42.
- Dalziell, E.P., Nicholson, A.J. 2001. Risk and impact of natural hazards on a road network. *Journal of Transportation Engineering*, 127 (2), pp. 159-166.
- Darolles, A. 2005. Étude juridique relative à la politique de gestion des risques naturels en France. Projet INTERREG IIIA-ALCOTRA, 65p.
- Dauphiné, A. 2001. Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. *Collection. Université Géographie*, Armand Colin, Paris, 288p.
- De Bélizal, É. 2012. Les corridors de lahars du volcan Merapi (Java, Indonésie) : des espaces entre risque et ressource. Contribution à la géographie des risques au Merapi. *Thèse de Doctorat*. Université Paris 1. 493p.
- Demontzey, P. 1894. L'extinction des torrents en France par le reboisement, Impr. Nat., Paris, 2, 449p.
- Demoraes, F., D'Ercole, R. 2009. Risques et accessibilité des lieux dans le district Métropolitain de Quito (Équateur). *Mappemonde*, 95, pp. 1–20.
- Denlinger, R.P., Iverson, R.M. 2001. Flow of variability fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental tests. *Journal of Geophysical Research*, 6 (B1), pp. 553-556.
- D'Ercole, R., Thouret, J.C., Dollfus, O., Asté, J.P. 2001. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés: concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, 82 (4), pp. 87-96.
- D'Ercole, R., Metzger, P. 2009. « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo : European Journal of Geography*. Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud, 447.
- D'Este, G.M., Taylor, M.A.P., 2003. Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks, In: Iida, Y., GISCA, 2009. Centre for the Social Applications of Geographic Information Systems, University of Adelaide.

- Deymier, J. 2010. Vulnérabilité des réseaux routiers et accessibilité territoriale en zone alpine – Développement de scénarios de pertes d'accessibilité routière à la suite de phénomènes « debris flows » dans les départements des Alpes-de-Hautes-Provence, des Hautes-Alpes et de Savoie. *Mémoire de Master 1 Gestion des catastrophes et des Risques Naturels*, Université Montpellier III, 102p.
- DGR. 1998. Instruction DGR relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne, in SÉTRA (Service d'Études Techniques des Routes et des Autoroutes). 2008. Accessibilité des territoires et des services : notions et représentation. Rapport d'études, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 117p.
- Dijkstra, E.W. 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271.
- Direction Interdépartementale des Routes (DIR) Méditerranée. Inforoute. www.enroute.mediterranee.equipement.gouv.fr
- Dollfus, O. 1960. Étude d'un bassin torrentiel dans la vallée du Rimac (Andes centrales péruviennes), *Revue de géomorphologie dynamique*, XI, 10-11-12, pp. 159-163.
- Donze, J. 2007. Risque : de la recherche à la gestion territorialisée. *Géocarrefour*, 82, 7p.
- Douglas, I. 2006. Rockfall geohazard assessment and protection measures on the highway network, North Wales. *IAEG, The Geological Society of London*, 320, 15p.
- Durand, Y., Brun, É., Mérindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, É. 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciology*, 18, pp. 65-71.
- Durville, J.L., Huet, P., Madier de Champvermeil, P., Badre, M. 2005. Quelles parades pour l'éboulement des Ruines de Séchillienne ? *Rapport du Conseil Général des Ponts et chaussées et de l'Inspection Générale de l'Environnement*, 4, 007, 82 p.
- Durville, J.L., Flury-Hérard, B., Rimoux, L., Winter, L. 2013. Rapport n°008414-01 : vulnérabilités des réseaux d'infrastructures aux risques naturels. *Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable*, 108p.

E

- ENA. 2000. Sécurité du citoyen et risques naturels. Séminaire sur l'interministérialité au niveau local: analyse compare du rôle des préfets et des représentants territoriaux de l'État en Europe, séminaire d'administration comparée de la promotion « Nelson Mandela », 84p.
- Erath, A., Lächl, M., Axhausen, K. 2009 Graph-theoretical analysis of the Swiss road and railway networks over time. *Networks and Spatial Economics*, 9, pp. 379-400.
- ESRI. 2006. ArcGIS 9: ArcGis Network Analyst Tutorial. California : ESRI.
- Etablissement Public Loire. 2006. Etude préalable à la réduction de la vulnérabilité des réseaux liés aux inondations en Loire moyenne Résultat bilan et perspective. 180p.

ETRM (Eaux, Torrents & Rivières de Montagne). 2008. Étude de la protection de la centrale du Fontenil contre les crues de la Durance. *Énergie, Développement et Services du Briançonnais*, pp. 27-29.

Euler, L. 1759. Solutio problemarum ad geometriam situs pertinentis. Mémoires de l'Académie des sciences de Berlin.

F

Fannin, R.J., Wise, M.P. 2001. An empirical–statistical model for debris flow travel distance. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, pp. 982–994.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, pp. 85–98.

Ferrero, A.M., Migliazza, M. 2013. Landslide Transportation Network and Lifelines: Rockfall and Debris Flow. *Landslide Science and Practice*, pp. 161-170.

Folke, C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16 (3), pp. 253–267.

Fotheringham, A. S., Wegener, M. 2000. Spatial models and GIS – New potential and new models, Eds Taylor & Francis, 279p.

Fotopoulou, S.D., Pitilakis, K.D. 2013. Fragility curves for reinforced concrete buildings to seismically triggered slow-moving slides. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, 48, pp. 143–161.

Frei, C., Schär, C. 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology*, 18, pp. 873-900.

Fuchs, S. 2009. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria—paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards Earth System Science*, 9, pp. 337-352.

Furukawa, Y., Ponce, J. 2007. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 17–22 June, Minneapolis, USA, pp. 1–8.

Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, M., Szeliski, R. 2010. Clustering view for multi-view stereo. *Proceedings, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 13–18 June, San Francisco, USA, pp. 1434–1441.

G

Galli, M., F. Guzzetti. 2007. Landslide vulnerability criteria: a case study from Umbria, Central Italy. *Environment Management*, 40, pp. 649–664.

Gamma, P. 1999. Dfwalk—Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. *PhD-Thesis*, University of Berne, 144p.

- Gartner, J.E., Cannon, S.H., Santi, P.M., Dewolfe, V.G. 2008. Empirical models to predict the volumes of debris flows generated by recently burned basins in the western US. *Geomorphology*, 96, pp. 339-354.
- Garrite, G., 2006. Les torrents de la vallée de la Clarée (Hautes-Alpes, France) : évolution contemporaine, dynamique actuelle et analyse géographique des risques associés. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 388 p.
- Garitte, G., Lahousse, P., Thénard, L., Salvador, P.G. 2007. Évolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes françaises du Sud). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, pp. 293-308.
- Geertsema, M., Clague, J., Schwab, W., Evans, S. 2006. An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83, pp. 120-143.
- Geertsema, M., J.W. Schwab, A. Blais-Stevens, and A. Sakals. 2009. Landslides impacting linear infrastructure in west central British Columbia. *Natural Hazards*, 48, pp. 59–72.
- GEOLINE. 2005. Réalisation, suivi, évaluation et maintenance des ouvrages de l'A43, 18p.
- Glade, T. & Elverfeldt, K.v. 2005. MultiRISK: An innovative Concept to model Natural Risks. In Vancouver Geotechnical Society (ed.) *Landslide risk management*, Vancouver, 31.05 - 04.06.2005.
- Gleyze, J.F. 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risque. *Thèse de Doctorat*. Université Paris VII, 540p.
- Gleyze, J.F., Reghezza, M. 2007. La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement. *Géocarrefour*, 82 (1-2), 11p.
- Gregoretti, C. 2000. Estimation of the maximum velocity of a surge of a debris flow propagation along an open channel. Proc. Int. Symp. Interpraevent 2000, Villach-Osterreich, Band 3, pp. 99-108.
- Gröndahl, S. 2008. Analysis of debris flow characteristics with numerical modelling - application to two alpine torrents and to the Semeru volcano. *Mémoire de Master 2*, Université de Strasbourg, 38p.
- Gupta, U. 2001. Earthquake loss estimation including transportation network damage. *Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 150p.
- Gutierrez, J., Condeco-Melhorado, A., Martin, J.C. 2010. Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18 (1), pp. 141–152.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, pp. 181-216.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S. 2004. Rockfall Hazard and Risk Assessment Along a Transportation Corridor in the Nera Valley, Central Italy. *Environmental Management*, 34 (2), pp. 191-208.

- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. 2007. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, pp. 239-267.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. 2008. The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5 (1), pp. 3-17.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M. 2009. Landslide hazards assessment, vulnerability estimation and risk evaluation: an example from the Collazzone area (Central Umbria, Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 10, pp. 183-192.

H

- Ham, H., Kim, T. J., Boyce, D. 2005. Assessment of economic impacts from unexpected events with an interregional commodity flow and multimodal transportation network model. *Transportation Research, Part A* 39, pp. 849–860.
- Heaslip, K., Louisell, W., Collura, J. 2009. A methodology to evaluate transportation resiliency for regional network. *88th Transportation Research Board Annual Meeting, TRV*, Washington, D.C.
- Hendrikk, J., Owens, I. 2008. « Modified avalanche risk equations to account for waiting traffic on avalanche prone roads », in *Cold Regions Science and Technology*, 51, pp. 214-218.
- Hu, Y., Liu, X., Jiang, Y. 2012. Overviews of Failure Mode and Reconstruction of Road Traffic Facilities in Wenchuan Earthquake-stricken Areas. *Procedia Environmental Sciences*, 12, pp.615-627.
- Huet, P. 2005. La méthodologie des retours d'expériences après les accidents naturels. Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement, MEDD, 85p.
- Hungr, O., Morgan, G.C., Kellerhals, R. 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*, 21, pp. 663–677.
- Hungr, O. 1995. A model for the runout analysis of rapidflow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 32 (4), pp. 610–623.
- Hungr, O., Evans, S.G. 1999. Magnitude and frequency of rockfalls and rockslides along the main transportation corridors of south-western British-Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp. 242–238.
- Hungr, O. 2005. Classification and terminology. In Jakob, M., Hungr, O, ed. S. Debris flow hazards and related phenomena. *Springer, Berlin*, pp. 10-23.
- Hungr, O., McDougall, S. 2009. Two numerical models for landslide dynamics analysis. *Computer & Geosciences*, 35, pp. 978-992.
- Huriot, J.M., Perreux, J. 1994. L'accessibilité, in *Encyclopédie d'économie spatiale*, dir. Auray J.P. et al., pp. 55-59

Hürlimann, M., Copons, R., Altimir, J. 2006. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology*, 78, pp. 359-372.

Hürlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., Baternan, A. 2008. Evaluation of approaches to calculate debris-flows parameters for hazard assessment. *Engineering Geology*, pp. 152-163.

I

InfoClimat, <http://www.infoclimat.fr/>.

IGN. (2010) - BD TOPO Savoie (73), Hautes-Alpes (05), Isère (38).

IGN. (2010) - BD ORTHO Savoie (73), Hautes-Alpes (05).

Ingram, D. 1971. The concept of accessibility: a search for an operational form. *Regional Studies*, 5, pp. 101-107.

IRSTEA. <http://www.irstea.fr/>.

Iverson, R.M. 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35 (3), pp. 245-296.

Iverson, R.M., Reid, M.E., LaHusen, R.G. 1997. Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25 (1), pp. 85-138.

Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W. 1998. Objective delineation of lahar inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110 (8), pp. 972-984.

J

Jaiswal, P., Van Westen, C.J. 2009. Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *Geomorphology*, 112, pp. 96-105.

Jaiswal, P., Van Westen, C.J., Jetten, V. 2010. Quantitative landslide hazard assessment along a transportation corridor in southern India. *Engineering Geology*, 116, pp. 236-250.

Jancosek, M., Pajdla, T. 2011. Multi-View Reconstruction Preserving Weakly-Supported Surfaces. *CVPR 2011 - IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3121-3128.

Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L.G. 2006. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research. Part A Policy Practices*, 40, pp. 537-560.

Jenelius, E. 2010. Redundancy importance: Links as rerouting alternatives during road network disruptions. *Procedia Engineering*, 3, pp. 129-137.

Jenelius, E., Matsson, L.G. 2015. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, pp.136-147.

- Johnson, A.M. 1970. Flow of ice, lava and debris. *Physical Processes in Geology*, San Francisco, Freeman Cooper, pp. 12-15.
- Johnson, A.M., Rodine, J.R. 1984. Debris flow. In *Slope instability*, ed D. Brunsten and D.B Prior, Chichester : John Wiley & Sons, pp. 257-361.
- Johnson, P.A., McCuen, R.H., Hromadka, T.V. 1990. Magnitude and frequency of debris flows. *Journal of Hydrology*, 123, pp. 69–82.
- Jomelli, V., Pech, P., Chochillon, C., Brunstein, D. 2004. Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change*, 64, pp. 77-102.
- Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Pech, P. 2007a. Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Écrins (French Alps). *Climate Change*, 85, pp. 119–137.
- Jomelli, V., Déqué, M., Brunstein, D., Grancher, D. 2007b. 21st century debris flow occurrence in the massif des Écrins estimated from ARPEGE climate modelling. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 9, pp. 283-292.
- Jomelli, V., Pavlova, I., Utasse, M., Chenet, M., Grancher, D., Brunstein, D., Léone, F. 2011. Are debris floods and debris avalanches responding univocally to recent climatic change: A case study in the French Alps. In: *Climate change 1*, Intech Blanco J.A. Kheradmand, H. (Eds), ISBN 978-953-307-419.

K

- Kalantari, Z., Nickman, A., Lyon, S.W., Olofsson, B., Folkesson, L. 2014. A method for mapping flood hazard along roads. *Journal of Environmental Management*, 133, pp. 69-77.
- Keller, S., Atz, A. 2014. Mapping natural hazard impacts on road infrastructure - the extreme precipitation in Baden-Württemberg, Germany, June 2013. *International Journal Disaster Risk Sciences*, 5, pp. 227-241.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., Thomalla, F. 2003. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? *Environmental Hazards*, 5 (1–2), pp. 35–45.
- Köll, H., Lange, S., Ruffini, F.V. 2007. La question des détours dans le transport routier de marchandises. *Revue de Géographie Alpine*, 95 (1), pp. 53-63.
- Kristensen, K., Harbitz, C.B., Harbitz, A. 2003. « Road traffic and avalanches – methods for risk evaluation and risk management ». *Surveys in Geophysics*, 24 (5-6), pp. 603-616.
- Kronfellner-Kraus, G. 1985. Quantitative estimation of torrent erosion. In: *Proc Int Symp on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention*, Tsukuba, Japan, pp. 107–110.
- Kuriakose, S.L., Quan Luna, B., Begueria S., Van Westen, C.J. 2009. Modelling the runout of a debris flow of the Western Ghats, Kerala, India. *Geophysical Research Abstracts*, 11 (EGU2009-4276). European Geosciences Union Annual General Assembly, Vienna, Austria.

L

- Lagadec, P. 1991. La gestion des crises – outils de réflexion à l’usage des décideurs. 300p.
- Lagadec, P. 1995. Cellules de crise – les conditions d’une conduite efficace. 122p.
- Laghi, M., Polo, P., Cavaletti, A., Gonella, M. 2007 GIS application for evacuation and management of evacuation plans in Tsunami risk areas. Vienne: EGU.
- Lahousse, P., Salvador, P.G. 1998. Briançon, 24 juillet 1995: autopsie et enseignements d’une catastrophe naturelle. *Mappemonde*, 50, pp. 8-12.
- Lahousse, P., Salvador, P.G. 2002. Torrential hazard assessment in the Verdarel catchment area (Hautes-Alpes, France). *Geomorphology*, 8, pp. 93-103.
- Lambert J.H., Parlakb A.I., Zhou Q., Miller J.S., Fontaine M.D., Guterbock M.G., Clementse J.L., Thekdid S.A. 2013. Understanding and managing disaster evacuation on a transportation network. *Accident Analysis and Prevention*, 50, pp.645-658
- Le Mignon, G. 2004. Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 261 p.
- Lefèvre, C., Schneider, J.L. 2003. Les Risques Naturels Majeurs. *Coll. Géoscience*. Éditions GB Science Publisher. 324p.
- Léone F, Asté J.P, Leroi, É. 1996a. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception. In: Senneset K. (Ed.), *Landslides*. Balkema, Rotterdam, pp. 263–269.
- Léone, F., Asté, J.P., Leroi, É. 1996b. L’évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque. *Revue de Géographie Alpine*, 84 (1), pp. 35-46.
- Léone, F. 1996c. Concept de vulnérabilité appliqué à l’évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. *Thèse de Doctorat. Document du BRGM*, n°250, ed B.R.G.M. Orléans, 286p.
- Léone, F. 2008. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes ‘naturelles’ : contribution à une évaluation géographique multirisque (Mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). Vol.2 - *Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches*. Montpellier, 330p.
- Léone, F., Vinet, F. 2008. La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d’évaluation des risques naturels. *Géorisques*, 1, pp. 9-26.
- Léone, F., Meschiné De Richemond, N., Vinet, F. 2010. Aléas naturels et gestion des risques. *Editions Presses Universitaires de France*, 284p.

- Léone, F., Deymier, J. 2011. Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes : Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale. *Rapport final projet SCAMPEI*, 135p.
- Léone, F., Deymier, J., Jomelli, V., Chapelon, L., Bouhet, O., Colas, A., Vinet, F., Cherel, J. P. 2011. Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes. Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale. Partie 1 : Approche régionale. Vulnérabilités des réseaux routiers et dégradation de l'accessibilité territoriale (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Savoie). Partie 2 : Approche locale. Diagnostic intégré du risque torrentiel et accessibilité routière des secours sur cinq bassins-versants. Moyenne vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence) - *Rapport WP6, Projet ANR SCAMPEI (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes)*, UMR GRED (ex. EA GESTER), Université Montpellier 3, 135 p.
- Léone, F., Colas, A., Garcin, Y., Eckert, N., Jomelli, V., Gherardi, M. 2014. Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français. *Journal of Alpine Research*, [En ligne], 2014, mis en ligne le 26 mars 2014, consulté le 02 octobre 2014. DOI : 10.4000/rga.2491 (référence électronique).
- Levinson, D., El-Geneidy, A. 2006. Development of Accessibility Measures, Report No. 1 in the Series: Access to Destinations (Mn/DOT 2006-16), University of Minnesota's Center for Transportation Studies (www.cts.umn.edu/access-study); part of a comprehensive research program to develop practical methods for evaluating accessibility for planning applications.
- Levinson, D. 2013. Access across America, Report 13, Access to Destinations Study, Center for Transportation at the University of Minnesota (www.cts.umn.edu); at www.cts.umn.edu/Publications/ResearchReports/pdfdownload.pl?id=2280.
- Lévy, J., Lussault, M. 2003. Dictionnaire de la Géographie et de l'espace des sociétés. Éditions Belin.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., Laganier, R. 2010. Résilience urbaine et réseaux techniques : une approche par analyse spatiale pour une évaluation possible de résilience urbaine. *Séminaire Résilience Urbaine, École Nationale Supérieure*, Paris. 41p. <http://www.geographie.ens.fr/IMG/file/resilience/pres-ens.pdf> (dernière consultation le 30/12/2014).
- Lhomme, S. 2012. L'analyse structurelle des réseaux techniques : modélisations, propriétés, vulnérabilités. pp. 1–12. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00664023>(dernière consultation le 30/12/2014).
- L'Hostis, A., Decoupigny, C., Menerault, P., Morice, N. 2001. Cadencement et intermodalité de l'offre en transport collectif en Nord - Pas de Calais : analyse et propositions d'amélioration. 121p.
- Lievain, M.L. 2003. Etude d'un aléa torrentiel récent : approche géomorphologique et historique des torrents du Rif Cros et du Grand Parcher (Vallée de la Gyronde, Hautes Alpes). *Mémoire de D.E.A.* Université des Sciences et Technologies de Lille, 92p.

Litman, T. 2003. Measuring Transportation: Traffic, Mobility and Accessibility. *ITE Journal*, 73, pp. 28-32.

Litman, T. 2005. Evaluating Transportation Land Use Impacts, VTPI.

Litman, T. 2015. Evaluating Accessibility for Transportation Planning: Measuring People's Ability to Reach Desired Goods and Activities. *Victoria Transport Policy Institute*, 56p.

Lowe, D.G. 1999. Object Recognition from Local Scale-invariant Features. *International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp. 1150–1157.

Lowe, D. 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, pp. 91–110.

M

Malet, J.P. 2003. Les 'glissements de type écoulement' dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur- Strasbourg I, 364p.

Manche, Y. 2000. Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. *Thèse de Doctorat*, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 175p.

Mangeney, A., Bouchut, F., Vilotte, J.P., Lajeunesse, E., Aubertin, A., Pirulli, M. 2005. On the use of Saint-Venant equations for simulating the spreading of a granular mass. *Journal of Geophysical Research*, 110, B09103.

MapNod. 2011. <http://mapnod.free.fr/>.

Margreth, S., Stoffel, L., Wilhelm, C. 2003. Winter opening of high alpine pass roads - analysis and case studies from the Swiss Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 37 (3), pp. 467-482.

Masiero, L., Maggi, R. 2012. Estimation of indirect cost and evaluation of protective measures for infrastructure vulnerability: A case study on the transalpine transport corridor. *Transport Policy*, 20, pp. 13–21.

MassMov2D software. <http://digital.csic.es/handle/10261/11804>.

MATE (Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). 2000. Dossier d'information. Mouvements de terrain, 21 p.

Mateos, R.M., Garcia, I., Reichenbach, P., Herrera, G., Rius, J., Aguilo, R., Roldan, F.J. 2014. Seasonal rockfall risk assessment along transportation network: a sample from Mallorca (Spain). *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-5467.

- Mathieu, A. 2010. Modélisation numérique bidimensionnelle de l'aléa 'coulée de boue' sur substrat argileux : application au glissement-coulée de La Valette (Alpes de Haute-Provence). *Mémoire de Master 2*, Université Strasbourg, 56p.
- MEDAD (Ministère de l'Écologie et du Développement et de l'Aménagement Durable). 2008. Programme Information, participation du public, concertation et association dans les plans de prévention des risques : Les rôles des acteurs de la prévention des risques naturels. *Risques naturels majeurs*, 52p.
- MEDAD (Ministère de l'Écologie et du Développement et de l'Aménagement Durable). 2010. Les risques naturels en montagne, 8-1. La correction torrentielle. D'après l'ouvrage de Besson, L. 1996. Les Risques Naturels en Montagne : traitement - prévention - surveillance. Éditions Artès-Publialp, Grenoble. 438p.
- MEDDTL (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement), Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-Mer, des Collectivités Territoriales et de l'Immigration. 2011. Gestion de la circulation routière : préparation et gestion des situations de crise routière. Circulaire NOR : DEVK1135001C, 28p.
- Medina, V., Hürlimann, M., Bateman, A. 2008. Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flow in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5, pp. 127-142.
- Mei, E.T.W. 2013. Gestion des évacuations lors des crises volcaniques : étude de cas du volcan Merapi, Java, Indonésie. Thèse de Doctorat, Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne. 333p.
- Mejia-Navarro, M., Wohl, E.E., Oaks, S.D. 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, 10, pp. 331-354.
- Mermet, E. 2011. Aide à l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport. Conception d'un modèle pour l'analyse, la visualisation et l'exploration d'un réseau e transport. *Ph.D. thesis. Université Paris-Est. Marne la vallée, France.*
- Meteo60 : <http://www.meteo60.fr/>.
- Météo France pluies extrêmes : (<http://pluiesextremes.meteo.fr/>).
- Meunier, M. 1989. Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle. *La Houille Blanche*, 5, pp. 361-375.
- Meunier, M. 1991. Éléments d'Hydraulique Torrentielle. Cemagref, coll. Études, série *Montagne*, 1. 278p.
- Meunier, M. 1994. Le point sur les méthodes d'études des laves torrentielles. *FAO groupe de travail sur l'aménagement des bassins versants de montagne*, Cemagref, Jaca, Espagne, 16p.
- Michael-Leiba, M., Baynes, F., Scott, G. 2000. Quantitative landslide risk assessment of Cairns, Australia. In E. Bromhead., N. Dixon and M-L. Ibsen (eds.), *Landslides in Research, Theory and Practice*, 3, *Proceedings of VIII International Symposium on Landslides*, Cardiff, Wales, 26-30 June 2000, Thomas Telford, London 2, pp. 1059-1064.

- Mignelli, C., Peila, D., Lo Russo, S., Ratto, S.M., Broccolato, M. 2013. Analysis of rockfall risk on mountainside roads: evaluation of the effect of protection devices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, pp. 545–557.
- Mignelli, C., Peila, D., Ratto, S.M., Navillod, E., Armand, M., Cauduro, M., Chabod, A. 2015. A New Susceptibility Index for Rockfall Risk Assessment on Road Networks. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2, pp. 1949-1955.
- Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2011. Chiffre clé du transport. 32p.
- Montredon, J., Granet-Abisset, A.M. 2007. Politiques publiques et gestion des risques d'origine naturelle dans l'arc alpin (France-Italie). *Projet INTERREG IIIA-ALCOTRA PRINAT*, 104p.
- Morel, G., Hissel, F., Aunay, S., Démotier, S. 2009. OSIRIS – multirisques : une méthode et un outil d'aide à la décision pour les communes soumises aux risques majeurs. *Cybergéo*, 466, 17p.
- Morgan, M.G., Fischhoff, B., Bostrom, A., Lave, L., Atman, C.J. 1992. Communicating risk to the public. *Environmental Science And Technology*, 26, pp. 2048-2056.
- Morris, J. M., Dumble, P. L., Wigan, M. R. 1979. Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research*, 13A, pp. 91-109.
- Mougin, L. 1914. Les torrents de Savoie. Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine, 2, pp. 453-468.
- Mazzochi, M., Montini, A. 2001. Earthquake effects on Tourism in Central Italy. *Annals of Tourism Research*, 4, pp. 1031-1046.
- Müller, D. 2012. Introduction à la théorie des graphes. *Cahiers de la Commission Romande de Mathématique*, 6, 52p.
- Murray, A.T., Grubestic, T.H. 2007. Critical infrastructures: reliability and vulnerability. *Critical Infrastructure, Advances in Spatial Science*, pp. 1-8.

N

- Nakanishi, H., Matsuo, K., Black, J. 2013. Transportation planning methodologies for post-disaster recovery in regional communities: the East Japan Earthquake and tsunami 2011. *Journal of Transport Geography*, 31, pp. 181-191.
- Nicholson, A.J., Dalziell, E., 2003. Risk evaluation and management: a road network reliability study, In: liada, Y., Bell, M.G.H. (Eds), *The Network Reliability of Transport*. Elsevier, Oxford, pp 45-59.
- Niemeier, D. 1997. Accessibility: an evaluation using social welfare. *Transportation*, 24, pp. 377-396.
- Nilsson, E. 2008. Seismic risk assessment of the transportation network of Charleston. *SC – Georgia Institute of Technology*, 149 p.

O

- Observatoire du Tourisme des Hautes-Alpes. 2010. Les chiffres-clés du tourisme dans les Hautes-Alpes. Rapport annuel, 20p.
- Observatoire des Déplacements en Savoie. 2009. Conseil Général de Savoie, 5, 8p.
- Observatoire des Déplacements en Savoie. 2014. Conseil Général de Savoie. 10, 8p.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. 1993. Two-dimensional waterflood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (2), pp. 244–261.
- O'Callaghan, J.F., Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, pp. 323–344.
- OFEG. 2002. Hochwasser 2000 – Les crues 2000. *Rapports de l'OFEG Série Eaux*, 2, Bern.
- Okano, K., Suwa, H., Kanno, T. 2012. Characterization of debris flows by rainstorm condition at a torrent on the Mount Yakedake volcano, Japan. *Geomorphology*, 136, pp. 88-94.
- Okuda, S., Suwa, H., Okunishi, K., Yokoyama, K., Nakano, M. 1980. Observation on the motion of a debris flow and its geomorphological effects. *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl. Bd. 35, pp. 142-163.
- ONERC. 2008. Changement climatique dans les Alpes : Impacts et risques naturels. *Rapport Technique numéro 1 de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique*, 100p.
- ONF. 2012. <http://www.onf.fr/>.
- OpenStreetMap, base de données routière, Italie. <http://openstreetmap.fr/>.
- OPTI-TIME. 2012. Chronomap pour MapInfo : présentation technique et utilisation. 13p. <http://www.opti-time.com/>.
- Oramas Dorta, D., Toyos, G., Oppenheimer, C., Pareschi, M.T., Sulpizio, R., Zanchetta, G. 2007. Empirical modelling of the May 1998 small debris flows in Sarno (Italy) using LAHARZ. *Natural Hazards*, 40, pp. 481-496.
- ORSEC, Ministère de l'Intérieur, 2012. <http://www.hauts-de-seine.gouv.fr/Politiques-publiques/Securite-et-Defense/Securite-civile/Le-Plan-ORSEC>.
- Ouxami, H. 1906. Observations sur quelques phénomènes torrentiels du bassin de l'Arve (Haute - Savoie) *Ann.Soc. Linnéenne Lyon*, III, pp. 50-79.

P

- Pagé, C. 2008. Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. *Rapport Climate Modelling and Global Change*, 10p.
- Pantelidis, L. 2010. A critical review of highway slope instability risk assessment systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, pp. 395-400.

- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M., Keiler, M., Glade, T. 2011. Physical vulnerability assessment for alpine hazards - state of the art and future needs. *Natural Hazards*, 58, pp. 645–680.
- Papathoma-Köhle, M., Keiler, M., Totschnig, R., Glade, T. 2012. Improvement of vulnerability curves using data from extreme events: debris flow event in South Tyrol. *Natural Hazards*, 64 (3), pp. 2083–2105.
- PARAMount project. www.paramount-project.eu/. Consulté le 22/01/2015.
- Partinevelos, P., Mertikas, S., Agioutantis, Z., Tsioukas, V., Tripolitsiotis, A. 2014. Rockfall detection along road networks using close range photogrammetry. *Proc. SPIE 9229*, Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014), 92291M.
- Pavlova, I., Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Vrac, M. 2011. Debris flow occurrence and meteorological factors in the French Alps: a regional investigation. In: Genevois, R., Hamilton, D.L., Prestininzi, A. (Eds.) *Proceedings 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*. La Sapienza, Rome, pp. 127-135.
- Pavlova, I. 2013. Response of debris flow activity to current and future climate change in the French Alps. *Thèse de Doctorat*, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne / Russian Academy of Science. 197p.
- Pavlova, I., Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Martin, E., Déqué, M. 2014. Debris flow activity related to recent climate conditions in the French Alps: a regional investigation. *Geomorphology*, 219, pp. 248–259.
- PCRaster software. <http://pcraster.geo.uu.nl/>.
- Pech, P., Jomelli, V. 2001. Caractéristiques et rôle du cône apical dans le déclenchement des coulées de débris. *Géographie Physique et Quaternaire*, 55 (1), pp. 47-61.
- Peltier, A. 2005. La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale, Etude comparative du Valais (Suisse), de la Vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France). *Thèse de doctorat*, Université Toulouse II, 741p.
- Perche, L. 2013. Analyse de l'impact des laves torrentielles sur les axes de transports : Application à la Vallée de Zermatt (Suisse). Mémoire de master, Université Paris-Créteil. 72p.
- Petrova, E. 2006. Vulnerability of Russian regions to natural risk: experience of quantitative assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, pp. 49-54.
- Piazza, M., Page, C., Sanchez, E., Trarray, L. 2011. Comparaison des méthodes de désagrégation statistique et dynamique pour l'évaluation du changement climatique sur les zones de montagnes en France. SCAMPEI, rapport semestriel d'activité, 28p.
- Pierson, T.C. 1980. Erosion and deposition by debris flow at Mount Thomas (North Canterbury, New Zealand), *Earth Surface Processes*, 5, pp. 227-247.

Pierson TC. and Costa JE. (1987) - A rheologic classification of subaerial sediment–water flows. In Costa, J. E. and Wieczorek, G. F. (eds) Debris flows/ avalanches: process, recognition, and mitigation. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, volume. VII*, 11p, 1–12pp.

Pierson, L.A., Vickle, R.V. 1993. Rockfall hazard rating system – participant’s manual. U.S. *Department of Transportation Federal Highway Administration*, pp. 1–104.

Pigeon, P. 2002. Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risqué dits naturels. *Annales de géographie*, No 627-628, pp. 452-470.

Pitilakis, K., Alexoudi, M., Argyroudis, S., Monge, O., Martin, C. 2006. Earthquake risk assessment of lifelines. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, pp. 365–390.

Pitilakis, K., Fotopoulou, S. 2011. Physical vulnerability of elements at risk to landslides: methodology for evaluation, fragility curves and damage states for buildings and lifelines. Ed. S. *SafeLand Deliverable 2.5*. <http://www.safeland-fp7.eu/> (accessed 30 September 2013).

Pitman, B.E., Le, L. 2005. A two-fluid model for avalanche and debris flow. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A*. 363, pp. 1573-1601.

Préfectures de la région Rhône-Alpes et de la région Provence-Alpes-Côte-D’azur. 2006. Convention Interrégionale 2000-2006 pour les massifs des Alpes. 33p.

Préfecture de la Savoie : les services de l’Etat en Savoie. 2006. Dossier Départemental des Risques Majeurs, 106p.

Q

Quan Luna, B., Blahut, J., Van Westen, C.J., Sterlacchini, S., Van Ach, T.W.J., Akbas, S.O. 2011. The application of numerical debris flow modeling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11, pp. 2047–2060.

Quan Luna, B. 2012. Dynamic numerical run-out modeling for quantitative landslide risk assessment. *Thèse de Doctorat*, Université de Twente. 252p.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5 (1), pp. 59–79.

R

Rebetez, M., Lugon, R., Baeriswyl, P.A. 1997. Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case of study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps), *Climatic Change*, 36, pp. 371–389.

- Rendall, S., Page, S., Reitsma, F., Van Houten, E. 2011. Quantifying Transport Energy Resilience Active Mode Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2242, pp. 72-80.
- Reid, S. 1992. Acceptable Risk. In D. Blockey, *Engineering safety*. McGraw Hill
- Reid, L.M., Dunne, T. 2003. Sediment budget as an organizing framework in fluvial geomorphology. In: *tools in fluvial geomorphology*, eds. G.M. Kondolf and H. Piégay, Wiley & Sons,, H., pp. 463-500.
- Remaître, A. 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Application aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). *Thèse de Doctorat*. Université de Caen, 487p.
- Remondo, J., Bonachea, J., Cendrero, A. 2008. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. *Geomorphology*, 94 (3-4), pp. 496-507.
- Reynaud, C. 2000. Définition d'un scénario de référence de transport à travers les Alpes. Rapport final Analyses des scénarios européens de transport en recomposition d'un scénario tendanciel. *NESTEAR DRAST Ministère des Transports*. 91p.
- Rheinberger, C., Bründl, M., Rhyner, J. 2009. Dealing with the white death: avalanche risk management for traffic routes. *Risk Analysis*, 29 (1), pp. 76-94.
- Rickenmann, D. 1997. Estimation des laves torrentielles. *Ing Archit Suisses*, 19, pp. 386-392.
- Rickenmann, D. 1999. Empirical relationships for debrisflows. *Natural hazards*, 19 (1), pp. 47-77.
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B., Hübl, J. 2006. Comparison of 2D debris-flow simulation models withfield events. *Computational Geosciences*, 10, pp. 241-264.
- Rinaldi, S.M. 2004. Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. *Proceeding Of The 37th Annual Hawaii International Conference On System Sciences*, 00(C,8p).
- Roncayolo, M. 1990. La ville et ses territoires, Paris, *Gallimard*, 288p.
- RouteWare. 2010. RouteFinder 3.71 for MapInfo : A network Analysis System for MapInfo Professional. RouteWare and Higher Mapping Solutions, 87p. <http://www.routeware.dk/>.
- RTM - Base de Données ÉVÈNEMENTS, Savoie et Hautes-Alpes (couverture 1953-2011).

S

- Sadek, S., Ramadan R., Naghi, H. 2005. A GIS – based landside hazard framework for road repair and maintenance. *Graduate Student Department of Civil and Environmental Engineering American, University of Beirut*, 14 p.
- Safeland Project. 2009 à 2012. Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change and risk management strategies. <http://www.safeland-fp7.eu/>

- Sassa, K. 1988. Geotechnical model for the motion of landslides. In: Bonnard, C. (Ed.), *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne. Balkema, Rotterdam, pp. 37 – 55.
- Sauret, B. 1987. Coulées boueuses. Laves torrentielles : Coulées de débris canalisées Compte rendu bibliographique. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 150-151, pp. 65-77.
- Savage, S.B., Hutter, K. 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of fluid mechanics*, 199, pp. 177-215.
- Savage, S.B., Hutter, K. 1991. The dynamics of avalanches and granular material from initiation to run-out. Part I: Analysis. *Acta Mech.*, 86, pp. 201-233.
- Scaini, C., Felpetob, A., Martí, J., Carniel, R. 2014. A GIS-based methodology for the estimation of potential volcanic damage and its application to Tenerife Island, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 278-279, pp. 40-58.
- SCAMPEI. 2011. Compte-rendu de fin de projet ANR-08-VULN-0009-01. 20p. <http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>.
- Scheidl, C., Rickenmann, D. 2011. TopFlowDF- A SIMPLE GIS BASED MODEL TO SIMULATE DEBRIS-FLOW RUNOUT ON THE FAN, *Italian Journal of Engineering Geology and Environment - Book*, Casa Editrice Università La Sapienza. 10p.
- Scheuringer, E. 1988. Ermittlung der massgeblichen Geschiebefracht aus Wildbach Oberlauten. *Wildbach Lawinenverbauung*, 52 (109), pp. 87–95.
- SÉTRA (Service d'Études Techniques des Routes et des Autoroutes). 2008. Accessibilité des territoires et des services : notions et représentation. Rapport d'études, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. 117p.
- Sharp, R.P. 1942. Mudflow levees, *J. Geomorphol*, 5 (3), pp. 222 227.
- Sierra, A., Metzger, P. 1997. La dinámica de uso del suelo en la quebrada Rumihurcu, in Janeau, J.-L., et al. Cuantificación de la hidrodinámica y de la erosión en las laderas orientales del Pichincha : resumen de los resultados 96/97 y recomendaciones, Quito, ORSTOM, EMAAP, INAMHI, 21 p.
- Sohn, J., Kim, T.J., Hewings, G.J.D., Lee, J.S., Jang, S.G, 2003. Retrofit priority of transportation network links under an earthquake. *Journal of Urban Planning and Development*, 129 (4), pp. 195–210.
- Sohn, J., Hewings, G.J.D., Kim, T.J., Lee, J.S., Jang, S.G. 2004. Analysis of economic impacts of an earthquake on transportation network. *Modeling Spatial Economic Impacts of Disasters*, Advance in Spatial Science, pp. 233–256.
- Sohn, J. 2006. Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40 (6), pp. 491-506.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W., Monbaron, M. 2005. 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions Ritigraben, Valais, Switzerland. *Antarctic and Alpine Research*, 37 (3), pp. 387-395.

Suarez, P., Anderson, W., Mahal, V., Lakshmanan, T.R. 2005. Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. *Transportation Research Part D*, 10, pp. 231-244.

Suchman, L., Jordan, B. 1992. Validity and the collaborative construction of meaning in face to-face surveys. In : J. Tanur (Ed), Questions about questions : Inquiries into the cognitive bases of survey. New York : Russel Sage Foundation.

Surell, A. 1870. Étude sur les torrents des Hautes-Alpes, Dunod, Paris, 2 vol, 284p.

T

Ta, C., Goodchild, A.V., Pitera, K. 2009. Structuring definition of resilience for the freight transportation system. *Transportation Research Record : Journal Of The Transportation Research Board*, 2097, pp. 19-25.

Tacnet, J.M., Burnet, R. 2007. Risques naturels _ Organisation de la gestion et de la prévention en France. Éléments pour une comparaison transfrontalière. Version 1.3. *Projet PRINAT-Action 2.2 et 2.3*. CEMAGREF, 55p.

Tacnet, J.M., Mermet, E., Zadonina, E., Deschatres, M., Humbert, P., Dissart, J.C., Labbe, S. 2013. Road network management in the context of natural hazards : a decision-aiding process based on multi-criteria decision making methods and network structural properties analysis. *Int. Snow Sci. Work. Proceedings*, Grenoble, pp. 912–919.

Takei, A. 1984. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. *Internationales Symposium Interpraevent*, Villach, Osterreich, Band 2, pp 35–48.

Takahashi, T. 1981. Estimation of potential debris flow and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster, *J. Nat. Disaster Sci.*, 3 (1), pp. 57-89.

Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33, pp. 309–319.

Taubenböch, H., Post, J., Roth, A., Zosseder, K., Strunz, G., Dech, S. 2008. A conceptual vulnerability and risk framework as outline to identify capabilities of remote sensing. *Natural Hazards and Earth Sciences*, 8, pp. 409-420.

Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C., D’Este, G.M. 2006. Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6 (3-4), pp. 267-291.

Taylor, M.A.P., Susilawati. 2012. Modeling traveltime reliability with the burr distribution. *Procedia-social and behavioral sciences*, 54, pp. 75-83.

- Thénard, L. 2009. Torrents et torrentialité dans la vallée de la Guisane. Contribution d'une étude géographique a la gestion durable du risque torrentiel à Serre-Chevalier (Briançonnais; Hautes-Alpes; France). *Thèse de Doctorat*, Université de Lille I, 551p.
- Thevenin, T. 2002. Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains: une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine. *Thèse de doctorat*, 261p.
- Thiery, Y. 2007. Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette aux mouvements de terrain : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste – Thèse de Doctorat, Université de Caen, 445 p.
- Thompson, P., 1980. Récits de vie et changement social. *Cahiers internationaux de sociologie*, LXIX, pp.226-242.
- Thouret, J.C., D'Ercole, R. 1994. Les phénomènes naturels créateurs de dommages (= menaces) : diagnostic, inventaire et typologie. *Revue de Géographie Alpine*, 82 (4), pp. 17-25.
- Thouret, J.C., Lavigne, F., Suwa, H., Sukatja, B., Surono, M. 2007. Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars. *Bulletin of Volcanology*, 70, pp. 221-244.
- Torrebadella, J., Altimir, J., Amigo, J. 2013. Determining and managing rockfall risk in the road network of Andorra. *Landslide Science and Practice*, 6, pp. 193-198.
- TRANUS. 2007. TRANUS: Integrated Land Use and Transport Model. General Description, *Modelistica*, 23p. <http://www.tranus.com>.
- Travelletti, J. 2011. Imagerie multi-paramètres et multi-resolutions pour l'observation et la caractérisation des mécanismes de glissements-coulées. *Geophysics*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 323p.
- Tricart, J. 1957. Une lave torrentielle dans les Alpes autrichiennes, *Rev. Geomorphol. Dyn*, VIII, 11-12, pp. 161-165.

U

- Utasse, M. 2010. Analyse de la vulnérabilité du réseau ferroviaire face aux laves torrentielles dans les Alpes, application au département de la Savoie. Mémoire de Master 2, Université de Strasbourg. 61p.
- Utasse, M., Jomelli, V., Léone, F. 2013. L'impact des coulées de débris sur les réseaux de communication : L'exemple du Rif Blanc (Alpes françaises), Collection Géorisques, 5, 18p. (*In Press*).

Utasse, M., Jomelli, V., Grancher, D., Léone, F. 2015. Institutional and functional vulnerability assessment related to impacts of debris flows on roads in the French Alps. *International Journal of Disaster Risk Science*. 19p. (In Press).

Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., Kaynia, A.M. 2008. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides, *Engineering Geology*, 12, pp. 251-256

V

Vallance, J.W., Cunico, M.L., Schilling, S.P. 2003. Debris-flow hazards caused by hydrologic events at Mount Rainier, Washington. *US Geological Survey, Reston, VA* (Open-file report 03-368, 4pp., 2 plates).

Van Loon, T. 2004. From speculation to model: the challenge of launching new ideas in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 65, pp. 305-313.

Van Steijn, H. 1991. Frequency of hill slope debris flows in part of the French Alps. *Bulletin of Geomorphology*, 19, pp. 83-90.

Van Steijn, H. 1996. Debris flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of central and Northwest Europe. *Geomorphology*, 15, pp. 259-273.

Van Westen, C., Alkema, D., Damen, M., Kerle, N., Kingma, N. 2006. Multi-hazard risk assessment. Enschede : UNU-ITC DGIM

Veyron, J. 2012. Analyse d'un évènement lave torrentielle ayant impacté le réseau de transport routier dans les Alpes françaises : L'exemple du Briançonnais. *Mémoire de Master I Géographie et Aménagement du territoire*, 100p.

Veyret, Y. Reghezza M. Vulnérabilité et risques L'approche récente de la vulnérabilité. *Responsabilité et Environnement*, 43.

VisualSFM software. <http://ccwu.me/vsfm/>

W

Wakabayashi, H., Kameda, H., 1992. Network performance of highway systems under earthquake effects: a case study of the 1989 Loma Prieta earthquake. *Proceedings of the US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems*. Tsukuba Science City, Japan, pp. 215-232.

Wastl, M., Stötter, J., Kleindienst, H. 2011. Avalanche risk assessment for mountain roads: a case study from Iceland. *Natural Hazards*, 56, pp. 465-480.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, pp. 300-314.

- Wieczorek, G.F., Mossa, G.S., Gand B.A., Morgan, M.G. 2004. Regional debris-flow distribution and preliminary risk assessment from severe storm events in the Appalachian Blue Ridge Province, USA. *Landslides*, 1, pp.53–59.
- Wieczorek, G.F., Glade, T. 2005. Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob, M., Hungr., O (eds) *Debris flow hazards and related phenomena*. Berlin, Springer, pp. 325–362.
- Wilhelm, C. 1997. Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. In: Mitt.Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch., 54, pp. 1-309.
- Wilson, T.M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G.S., Johnston, D.M., Cole, J.W., Wardman, J., Wilson, G., Barnard, S.T. 2012. Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth*, 45-46, pp. 5-23
- Winter, M.G., MacGregor, F., Shackman, L. 2005. Scottish Road Network Landslides Study, 119p. Trunk Roads: Scottish road network management division published report series. Edinburgh: the Scottish Executive, 119p.
- Winter, M.G., Heald, A.P., Parsons, J. A., MacGregor, F., Shackman, L. 2006. Scottish debris flows events of august 2004. *Quarterly journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 39, pp. 73-78.
- Winter, M.G., MacGregor, F., Shackman, L. 2008. Scottish road network landslides study: implementation. Transport Scotland, Edinburgh, 278p.
- Winter, M.G., Macgregor, F., & Shackman, L. 2009. Hazard Rankings in Scottish road network landslides study: implementation. *Transport Scotland Published Report Series*. Transport Scotland, Edinburgh, pp. 82-87.
- Winter, M.G., Dent, J., MacGregor, F., Dempsey, P., Motion, A., Shackman, L. 2010. Debris flows, rainfall and climate change in Scotland. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*, 43, pp. 429-446.
- Winter, M.G., Smith, J.T., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., Argyroudou, J. 2013. The physical vulnerability of roads to debris flow. In: *18th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.*, pp.2281–2284.
- Winter, M.G., Smith, J.T., Fotopoulou, S., Pitilakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., Argyroudou, S. 2014. An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, pp. 291–305.
- Wisner, B., Henry R., L., 1993. Disaster Vulnerability: Scale, Power and Daily Life. *Geojournal*, 30.2, 127-140.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S. 2011. Multicore bundle adjustment. In :CVPR, pp. 3057–3064.
- Wu, C. 2013. Towards linear-time incremental structure from motion. In 3DV, 2013. 8p.

Wu, C. 2001. "VisualSFM: A Visual Structure from Motion System",
<http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/>

Z

Zahra, T. 2010. Quantifying uncertainties in Landslide Runout Modeling. *Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands and Indian Institute of Remote Sensing (IIRS-NRSC), Dehradun, India, 94p.*

Zeller, J. 1976. Schutz vor Hochwasserschäden und Rutschungen im Gerirge – Ein Überblick. Berichte no 153, EAV Birmensdorf. Schweiz Z Forstwes, 127, pp. 129-137.

Zezere, J.L., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C., Reis, E. 2008. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94, pp. 467–495.

Zischg, A., Fuchs, S., Keiler, M., Stötter, J. 2005a. Temporal variability of damage potential on roads as a conceptual contribution towards a short-term avalanche risk simulation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, pp. 235-242.

Zischg, A., Fuchs, S., Keiler, M., Meißl, G., 2005b. Modeling the system behavior of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic road. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, pp. 821-832.

Glossaire et abréviations

ANENA.	Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches
ARNICA.	Assessment of Risks on transportation Networks resulting from slope Instability and Climate change in the Alps
AT Nord.	Agence Territoriale Aménagement Nord (antenne du CG05) du Briançonnais
BDALTI.	Base de Données Altimétrique de l'IGN maillé qui décrit le relief du territoire français à moyenne échelle
BDTOPO.	Base de Données Topographique de l'IGN, contient une description des éléments du paysage sous forme de vecteurs de précision métrique
BGHM.	Brigade de Gendarmerie de Haute-Montagne
BRGM.	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BTP.	Entreprises en Bâtiment et Travaux Publics
CatNat.	Arrêté des Catastrophes Naturelles
CG05.	Conseil Général des Hautes-Alpes (38 = Isère, 73 = Savoie)
CGEDD.	Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable
CIM.	Cinémathèque d'Images de Montagne
CIS.	Centre d'Incendie et de Secours
COD.	Centre Opérationnel Départemental
COG.	Centre Opérationnel de Gendarmerie
CMVS.	Clustering View for Multi-View Stereo
CSP.	Centre de Secours Principal (Sapeurs-pompiers)
CRICR.	Centre Régional d'Information et de Coordination Routière (Bison Futé)
DDT.	Direction Départementale des Territoires
DIR.	Direction Interdépartementale des Routes
DirMed.	Direction Interdépartementale des Routes Méditerranée
DPmax.	Mode d'estimation d'endommagement physique de la route
DOS.	Direction des Opérations de Secours

DREAL.	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ENA.	Ecole Nationale d'Administration
ETRM.	Eaux, Torrents & Rivières de Montagne
GIEC.	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IGN.	Institut de Géographie National et forestière
INSEE.	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
INTERREG.	Programme de coopération transfrontalière
LGP.	Laboratoire de Géographie Physique
MassMov2D.	Numerical model of mass movements over complex topography
MATE.	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MEDAD.	Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durable
MEDDTL.	Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
MJA.	Moyennes Journalières Annuelles
MJM.	Moyennes Journalières Mensuelles
MNE.	Modèle Numérique d'Élévation
MNT.	Modèle Numérique de Terrain
ONF.	Office National des Forêts
ONERC.	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ORSEC.	Organisation de la Réponse de Sécurité
OSM.	Open Street Map
PCC.	Poste de Commandement de Circulation
PCC.	Poste de Commandement Communal
PCO.	Poste de Commandement Opérationnel
PCS.	Plan Communal de Sauvegarde
PCRaster	Software for environmental modelling

PFmax.	Mode d'estimation des perturbations fonctionnelles liées à l'endommagement de la route
PGB.	Pays du Grand Briançonnais
PGHM.	Peloton de Gendarmerie de Haute-Montagne
PGT.	Plan de Gestion de Trafic
PLU.	Plan Local d'Urbanisme
PMV.	Panneau à Message Variable
PMV.	Patch base Multi-View stereo
PPRN.	Plan de Prévention des Risques Naturels
ROMMA.	Réseau d'Observation Météo du Massif Alpin
RouteFinder.	Route Planner Simulator
RTM.	Service de Restauration des Terrain de Montagne, organisme public rattaché à l'ONF
SAREA.	Société des Autoroutes de Rhône-Alpes
SAFRAN.	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques adaptés à la Nivologie
SCA.	Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes
SCAMPEI.	Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes
SDIS.	Service Départemental d'Incendie et de Secours
SFM.	Structure From Motion
SFTRF.	Société Française du Tunnel Routier du Fréjus
SGMB.	Société Géologique et Minière du Briançonnais
SIFT.	Scale Invariant Feature Transform
SIG.	Système d'Information Géographique
SMA.	Système Multi-Agents

Table des Matières

Sommaire	2
Résumé/Abstract.....	3
Remerciements	4
Introduction Générale.....	7
Chapitre 1 – La vulnérabilité des réseaux de transport routier : Aspects généraux.....	10
1. La notion de risque.....	10
2. La vulnérabilité des réseaux de transport : cadre conceptuel et terminologie	13
2.1. Du risque à la vulnérabilité des réseaux.....	13
2.1.1. La notion de vulnérabilité.....	13
2.1.2. Les réseaux routiers : définition et usage	15
2.2. Typologie des vulnérabilités et modes d’endommagement du réseau	18
2.2.1. La vulnérabilité directe.....	19
2.2.2. La vulnérabilité indirecte.....	20
2.2.3. Les dommages dits tangibles et intangibles.....	22
2.3. Les processus de dysfonctionnement du réseau	24
2.3.1. Les arbres des défaillances.....	24
2.3.2. Vulnérabilité et Résilience.....	27
3. Les aléas naturels dommageables sur le réseau routier – État de l’Art.....	33
3.1. Les principaux aléas impliqués	33
3.2. La spécificité des phénomènes hydro-gravitaires en montagne.....	34
Conclusion et problématique	42
Chapitre 2 – Laves torrentielles et réseau routier alpin : Une situation représentative du Risque- Réseau	44
1. L’aléa lave torrentielle : Terminologie, dynamique et stratégies de protection.....	44
1.1. Terminologie et définition du système torrentiel	44
1.2. Morphologie et cinématique.....	47
1.2.1. L’initiation du phénomène	47
1.2.2. La phase de propagation	49
1.2.3. La phase de dépôt	51
1.3. Les stratégies de protection contre l’aléa torrentiel.....	51
2. Interaction : dynamique torrentielle/enjeux réseaux dans les Alpes françaises	53
2.1. Contexte historique et géographique	53

2.1.1. Répartition spatiale et temporalité des évènements	53
2.1.2. Cadre fonctionnel : le maillage routier alpin.....	60
2.1.3. Cadre démographique.....	65
2.1.4. Cadre culturel et économique.....	68
2.2. L'apport des travaux du projet SCAMPEI	69
2.2.1. Modalités d'endommagement physique des tronçons routiers.....	69
2.2.2. Estimation des perturbations fonctionnelles des tronçons vulnérables.....	72
3. Présentation des sites d'étude	77
3.1. Le choix des sites	77
3.2. Description morphologique et analyse des évènements torrentiels	81
3.2.1. Le site d'étude principal : le bassin-versant du Rif Blanc	82
3.2.2. Les sites d'étude secondaires : les bassins-versants de Malefosse et du Rieu Sec.....	91
3.3. La place des réseaux routiers impactés au sein du maillage routier alpin.....	102
3.3.1. La Départementale D1091 (D1091).....	102
3.3.2. La Nationale N94	105
3.3.3. La Départementale D1006 et l'Autoroute A43	106
Conclusion	109
Chapitre 3 – Occurrence des précipitations et évènements torrentiels dommageables	110
1. La relation précipitations – laves torrentielles.....	110
1.1. Les conditions météorologiques favorables au déclenchement - Alpes françaises.....	110
1.2. Changement climatique et évolution de l'activité lave torrentielle.....	111
1.3. La corrélation entre les régimes de pluies et les évènements dommageables au réseau ..	112
2. Description des données météorologiques.....	113
2.1. Le réseau d'observations météorologiques	113
2.2. Les limites des données pluviométriques	116
2.3. Fréquence et temps de retour	117
3. Distribution statistique des précipitations	119
3.1. Intensité des précipitations maximales par évènement	119
3.1.1. Cumuls journaliers.....	119
3.1.2. Cumuls horaires.....	123
3.2. Analyse fréquentielle des précipitations.....	125
3.2.1. Fréquence journalière	125
3.2.2. Fréquence journalière cumulée et temps de retour	131
Synthèse et limites d'exploitation des données météorologiques.....	139

Chapitre 4 – La modélisation des écoulements torrentiels comme indicateur d’impact réseau	141
1. Le choix d’un modèle numérique 2D	141
1.1. La diversité des modèles existants	141
1.2. Principes de fonctionnement du modèle MassMov2D	145
1.2.1. Description du modèle	145
1.2.2. Les conditions initiales et les paramètres d’entrée du modèle	146
1.2.3. Les formats de sortie du modèle	149
2. Constitution des bases de données	150
2.1. Le domaine de simulation	150
2.1.1. Création du MNT sur le Rif Blanc	150
2.1.2. Correction des MNT sur Malefosse et le Rieu Sec	153
2.2. Positionnement des zones de contribution et finalisation des cartes en entrée du modèle	155
2.3. L’estimation des volumes et calage du modèle	158
2.3.1. Une appréciation difficile	158
2.3.2. L’estimation des volumes à partir d’une vidéo d’évènement : le Rif Blanc	159
2.3.3. L’estimation des volumes à partir des données historiques : Malefosse	161
2.3.4. L’estimation des volumes selon les méthodes empiriques : Le Rieu Sec	164
3. Résultats cartographiques	167
3.1. Scénario reproductif d’un évènement dommageable au réseau routier : le 4 juin 2012 sur le Rif Blanc	167
3.2. Scénarii prédictifs d’atteinte et d’impact au réseau routier : Malefosse	173
3.3. Scénarii prédictifs d’atteinte et d’impact au réseau routier : Le Rieu Sec	177
Conclusion et limites	183
Chapitre 5 – Les acteurs institutionnels du risque-réseau : Décryptage des protocoles de gestion de crise	185
1. Le contexte théorique de la gestion de crise routière	186
1.1. Rappels sur l’organisation des acteurs institutionnels et la gestion d’un risque naturel en France	186
1.2. La gestion des situations de crises routières : complexité organisationnelle et planification supposée des actions	190
1.3. Diagnostic préventif et plans de gestion de trafic	194
2. Méthodes d’investigation	197
2.1. Les acteurs informels	197
2.2. Travail préparatoire et attendus des entretiens auprès des acteurs de la gestion de crise	200

2.2.1. Enquête par entretien semi-directif.....	200
2.2.2. Entretien avec les acteurs clés	201
2.2.3. Questions posées et hypothèses de départ	203
3. La gestion de crise routière selon les acteurs opérationnels : l'exemple du 4 juin 2012	205
3.1. Chronologie de l'évènement torrentiel du 4 juin 2012.....	205
3.1.1. Compte-rendu général des entretiens	205
3.1.2. Reconstitution du processus décisionnel et des modes d'intervention lors de la gestion de crise routière	206
3.2. Planification des actions en vue d'assurer la continuité du service.....	211
3.2.1. Étude de cas : l'alternat de circulation.....	211
3.2.2. La mise en place des déviations	212
3.3. Discussion et limites	215
3.3.1. Éléments de réponse aux hypothèses de départ	215
3.3.2. Limites organisationnelles.....	217
3.3.3. Les conséquences indirectes de l'évènement.....	219
Conclusion	222
Chapitre - 6 : Les pertes d'accessibilité territoriale comme outils de mesure de la vulnérabilité indirecte du réseau.....	224
1. L'intérêt des calculs d'accessibilité dans l'étude des réseaux.....	225
1.1. Qu'est-ce que l'accessibilité ?	225
1.2. Enjeux et mesure de l'accessibilité.....	226
2. Méthodes et outils utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité indirecte	229
2.1. Les indicateurs d'accessibilité	229
2.2. Modélisation du réseau routier.....	229
2.2.1. Le logiciel <i>RouteFinder</i> : principe et fonctionnement	229
2.2.2. Rappel sur les bases de données utilisées.....	231
2.2.3. Paramétrage des vitesses	232
2.3. Choix des scénarii	233
2.3.1. Scénario reproductif d'un évènement dommageable au réseau : le Rif Blanc.....	233
2.3.2. Scénario à priori d'un évènement dommageable au réseau : Le Rieu Sec	235
2.3.3. Scénario à priori d'un évènement dommageable au réseau: l'exemple de la vallée de Zermatt (Suisse).....	235
3. La dégradation de l'accessibilité territoriale : résultats	238
3.1. Distance, temps et coûts	238
3.1.1. Comparaison d'itinéraires : l'axe Grenoble-Briançon	238

3.1.2. Comparaison d'itinéraires: l'axe Lyon-Turin	241
3.2. Cartographie de la dégradation de l'accessibilité territoriale	243
3.2.1. Temps d'accès sur l'axe Grenoble-Briançon	243
3.2.2. Indicateurs socio-économiques comme marqueurs supplémentaires des pertes d'accessibilité : l'exemple du Pays du Grand Briançonnais.....	247
3.2.3. La dégradation de l'accessibilité en fond de vallée : Zermatt (Suisse).....	250
Conclusion	252
Conclusion Générale.....	255
Références bibliographiques	261
Glossaire et abréviations	289
Table des Matières	292
Table des Figures.....	297
Table des Tableaux	303
Table des Annexes.....	305
Annexes	306

Table des Figures

Figure 1. Courbe des risques selon Farmer	11
Figure 2. La relation offre-demande du réseau de transport routier (Gleyze et Reghezza, 2007)	16
Figure 3. La vulnérabilité directe/indirecte du réseau routier (Utasse, 2010).....	25
Figure 4. Arbre des défaillances (Utasse, 2010, adapté de Cojean et al., 2002).....	26
Figure 5. La dimension temporelle de la vulnérabilité sur les réseaux (adapté de Gleyze et Reghezza, 2007).....	28
Figure 6. Les indicateurs de résilience des réseaux de transport (adapté de Lhomme et al., 2010)....	29
Figure 7. Représentation schématique d'un bassin-versant torrentiel. (Source à Gauche : IRSTEA) ...	45
Figure 8. Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau (Meunier, 1991).....	46
Figure 9. Morphologie générale d'une lave torrentielle (adapté de Remaître, 2006).....	50
Figure 10. Localisation des bassins-versants alpins actifs de 1950 à 2012 (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence)	55
Figure 11. Localisation des bassins-versants alpins actifs de 1950 à 2012, proportion d'évènements avec et sans impacts sur le réseau routier (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence).....	56
Figure 12. A. Part totale d'évènements lave torrentielle par département, B. Part des évènements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus)	57
Figure 13. A. Répartition interannuelle du total des évènements lave torrentielle par département, B. Répartition interannuelle du total des évènements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus).....	58
Figure 14. A. Répartition mensuelle du total des évènements lave torrentielle par département, B. Répartition mensuelle du total des évènements lave torrentielle avec impacts sur les réseaux de transport par département (Période 1950-2012, routier et ferré confondus).....	59
Figure 15. Cartographie du réseau routier principal et secondaire selon la 'BDTOPO' (IGN) (départements : Savoie, Hautes-Alpes et Alpes de Haute-Provence).....	61
Figure 16. A. Parts du réseau routier impacté par les bassins-versants torrentiels tous départements confondus selon le critère IMPORTANCE de la BDTOPO (IGN), B. Parts du réseau routier impacté par les bassins-versants torrentiels tous départements confondus selon le critère CLASSE ADMINISTRATIVE de la BDTOPO (IGN).....	64
Figure 17. Répartition des densités de population résidente pour les départements de la Savoie, des Hautes et des Alpes de Haute-Provence (source : données carroyées 1km – INSEE)	67
Figure 18. Nombre d'impacts physiques par tronçon routier de 1950 à 2009 (Léone et Deymier, 2011)	71

Figure 19. Nombre d'impacts fonctionnels par tronçon routier (Léone et Deymier, 2011)	74
Figure 20. Exemple d'indice de dysfonctionnement par tronçon (Léone et Deymier, 2011)	75
Figure 21. A. Localisation du bassin-versant du Rif Blanc, B. Topographie du bassin-versant du Rif Blanc (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant du Rif Blanc et interaction torrent/réseau routier (D1091), D. Profil en long du chenal principal du Rif Blanc et interaction torrent/réseau routier (D1091).....	83
Figure 22. A. L'ouvrage de franchissement au niveau de la route D1091 pour le torrent du Rif Blanc, B. La buse d'écoulement des eaux du torrent sous la route départementale D1091	85
Figure 23. Vue en coupe de l'ouvrage de franchissement au niveau de la route D1091 pour le torrent du Rif Blanc.....	85
Figure 24. Catalogue photographique des évènements torrentiels de 2008 sur le Rif Blanc (source : CG05) A. Vue générale de l'apex et des dégâts sur la route D1091 depuis le col du Lautaret, B. Vue plongeante en amont du torrent depuis un hélicoptère, C. Vue latérale de l'apex et des dégâts sur la route D1091 depuis un hélicoptère, D. Vue en contrepied de l'apex et dégâts sur la route D1091, E. Vue des dommages depuis la route D1091 sur l'apex sens Col du Lautaret – Briançon, F. Remorquage du véhicule emporté.....	89
Figure 25. Catalogue photographique de l'évènement du 4 juin 2012 sur le torrent du Rif Blanc (source : CG05), A. Vue latérale de la première crue depuis la route D1091 sur l'apex sens Briançon - Col du Lautaret, B et C vues générale depuis la D1091 sens Col du Lautaret après le passage de la seconde crue	91
Figure 26. A. Localisation du bassin-versant de Malefosse, B. Topographie du bassin-versant de Malefosse (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant de Malefosse et interaction torrent/réseau routier (N94), D. Profil en long des chenaux de Malefosse et interaction torrent/réseau routier (N94).....	92
Figure 27. A. Chenal principal du torrent de Malefosse, vue en amont de l'ouvrage de franchissement routier, B. Chenal principal du torrent de Malefosse et ouvrage de franchissement de la route nationale N94 (pont à deux voies)	94
Figure 28. A. Localisation du bassin-versant du Rieu Sec, B. Topographie du bassin-versant du Rieu Sec (MNT), C. Vue 3D supports orthophotoplans du bassin-versant du Rieu Sec et interaction torrent/réseau routier (D1006/A43), D. Profil en long des chenaux du Rieu Sec et interaction torrent/réseau routier (D1006/A43).....	97
Figure 29. A. Bloc rocheux déposé par la lave torrentielle de 2007 à environ 50 mètres en amont des ponts routiers de la D1006 et de l'A43 sur le torrent du Rieu Sec, B. Vue amont du chenal principal du Rieu Sec à l'entrée du pont de la D1006 (On note la dégradattion du pont par les coulées au niveau du tablier inférieur du pont) C. Vue latérale droite du lit torrentiel du Rieu Sec sous le point de l'A43, D. Vue aval du lit torrentiel du Rieu Sec en direction des points de l'A43 et de la D1006	99
Figure 30. Liaison routière Grenoble-Briançon via le Rif Blanc (D1091)	102
Figure 31. Comparaison entre la répartition mensuelle des évènements du Rif Blanc et la fréquentation routière journalière mensuelle, tous sens confondus, station de comptage de Monétier-les Bains – 2010 (Source : CG05, RTM)	104

Figure 32. Liaison routière Gap-Briançon via Malefosse (N94).....	105
Figure 33. Liaison routière Chambéry-Modane via le Rieu Sec (D1006).....	106
Figure 34. Liaison routière Lyon-Turin via le Rieu Sec (A43/E70)	107
Figure 35. Localisation des stations météorologiques de référence pour les bassins-versants du Rif Blanc et de Malefosse	113
Figure 36. Localisation des stations météorologiques de référence pour le bassin-versant du Rieu Sec	114
Figure 37. Intensité des pluies journalières par évènement – Rif Blanc (stations : Monétier-Les Bains, Col du Lautaret).....	119
Figure 38. Intensité des pluies journalières par évènement – Malefosse (stations : Briançon, Montgenèvre).....	121
Figure 39. Intensité des pluies journalières par évènement – Rieu Sec (stations : St-Martin La Porte, St-Jean de Maurienne)	122
Figure 40. Intensité / durée cumulée des pluies – Rif Blanc, tous évènements	123
Figure 41. Intensité/durée des pluies par évènement (données ré-analysées SAFRAN).....	124
Figure 42. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Rif Blanc	126
Figure 43. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc	127
Figure 44. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Malefosse.....	128
Figure 45. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Malefosse.....	129
Figure 46. Fréquence des pluies journalières par évènement (jour J) – Rieu Sec.....	130
Figure 47. Fréquence des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec.....	130
Figure 48. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (jour J) – Rif Blanc	131
Figure 49. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc	133
Figure 50. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement - Malefosse	134
Figure 51. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) - Malefosse	135
Figure 52. Fréquence cumulée des pluies par évènement – Rieu Sec.....	136
Figure 53. Fréquence cumulée des pluies journalières par évènement (Jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec.....	138
Figure 54. Points de correspondance entre les photographies aériennes, algorithme SIFT - capture d'écran VisualSFM	151
Figure 55. Triangulation 3D des photographies aériennes et création du nuage de points – capture d'écran VisualSFM	151
Figure 56. Reconstruction complète du modèle numérique d'élévation du versant nord-est de la vallée de la Guisane, incluant le bassin-versant du Rif Blanc – Capture d'écran CPMVMS.....	152

Figure 57. 1. MNT original du Rif Blanc avant creusement du chenal au niveau de l'ouvrage-réseau, 2. MNT après correction avec surcreusement du chenal au-dessus du tunnel routier de la D1091.....	153
Figure 58. MNT de base et creusé et la carte des flux associée pour le bassin-versant de Malefosse	154
Figure 59. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant du Rif Blanc – capture d'écran PCRaster A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map.....	155
Figure 60. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant de Malefosse – captures d'écran PCRaster A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map.....	156
Figure 61. Cartes en entrée du modèle MassMov2D, bassin-versant du Rieu Sec – captures d'écran PCRaster. A. MNT-dem.map (m), B. Localisation des zones de contribution-hini.map, C. carte de distances-dist.map (m), D. Système ouvert/fermé-outlet.map.....	157
Figure 62. A. Position de la caméra, B. Extrait de la vidéo – évènement du 4 juin 2012 sur le Rif Blanc (source : CG05)	160
Figure 63. Hauteurs de dépôts relevés (m) et longueur impactée sur la chaussée (en mètres linéaires) pour l'évènement du 4 juin 2012 sur le Rif Blanc	161
Figure 64. Résultat de simulation MassMov2D pour un volume de 60 000m ³ - Malefosse	163
Figure 65. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 10 000m ³	168
Figure 66. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 15 000m ³	169
Figure 67. Hauteurs de dépôts sur le Rif Blanc avec un volume de 11 000m ³	170
Figure 68. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A-C-E) et des vitesses de déplacement (B-D-F) enregistrées avant le déversoir (Pt1) et au niveau de la chaussée de la départementale D1091 (Pt2) – Rif Blanc.....	171
Figure 69. Hauteurs de dépôts sur Malefosse avec un volume minimum requis de 40 000m ³ pour atteindre la nationale N94	174
Figure 70. Hauteurs de dépôts sur Malefosse avec un volume minimum requis de 47 000m ³ pour impacter la nationale N94	175
Figure 71. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A), et des vitesses de déplacement (B) enregistrées au niveau du pont de la nationale N94 - Malefosse.....	176
Figure 72. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec avec un volume minimum requis de 21 000m ³ pour atteindre la départementale D1006.....	178
Figure 73. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec avec un volume minimum requis de 42 000m ³ pour impacter la départementale D1006	179
Figure 74. A. Engravement du lit torrentiel du Rieu Sec sous les ponts de la départementale D1006; B. Et de l'autoroute A43 (2011- sac à dos pour échelle).....	180
Figure 75. Hauteurs de dépôts sur le Rieu Sec pour une lave torrentielle centennale de 58 000m ³ .	181

Figure 76. Profils graphiques des valeurs de hauteurs (A) et des vitesses de déplacement (B) enregistrées au niveau du pont de la départementale D1006 (Pt1) et du pont de l'autoroute A43 (Pt2) – Rieu Sec	182
Figure 77. Phases génériques de la gestion des risques (Tacnet et Burnet, 2007)	186
Figure 78. Chaîne de commandement du plan ORSEC (Ministère de l'Intérieur, 2012).....	187
Figure 79. Représentation du circuit de gestion de crise (Tacnet et Burnet, 2007)	189
Figure 80. Organisation décisionnelle supposée par les collectivités territoriales en cas de dangers naturels impactant le réseau routier en France	193
Figure 81. Coupure de presse, édition du Dauphiné Libéré du 13 juillet 2008.....	197
Figure 82. Coupure de presse, édition du Dauphiné Libéré du 1er juin 2010	198
Figure 83. Coupure de Presse, édition du Dauphiné Libéré du 5 juin 2012	199
Figure 84. Gestion de la crise selon les acteurs d'un événement lave torrentielle impactant le réseau routier départemental.....	207
Figure 85. Circulation en alternat sur la route départementale D1091 au tunnel du Rif Blanc lors de l'évènement du 4 juin 2012 (photo : CG05)	211
Figure 86. Exemple de carte de déviation en cas de coupure de la route départementale D1091 entre Grenoble et Briançon (CG05, 2011)	214
Figure 87. Les différentes notions d'accessibilité (Sétra, 2008).....	225
Figure 88. Le graphe du réseau routier : a. Tronçons, points et nœuds ; b. Poids des tronçons ; c. Points de départ et d'arrivée. (CERTU, 2006).....	230
Figure 89. Modes de représentation cartographique de l'accessibilité territoriale disponible dans RouteFinder (Léone et Deymier, 2011)	231
Figure 90. Localisation générale de la vallée de Zermatt (d'après Bollschweiler et Stoffel, 2012)	236
Figure 91. Itinéraires routiers permettant de relier les villes de Grenoble et Briançon	239
Figure 92. Comparaison des itinéraires reliant Grenoble à Briançon en distance temps (minutes), distance kilométrique et le coût associé (péage + carburant en euros)	240
Figure 93. Principaux itinéraires routiers suivis par les poids lourds permettant de relier les villes de Lyon et Turin.....	242
Figure 94. Comparaison des itinéraires reliant Lyon à Turin en distance temps (minutes), distance kilométrique et le coût associé (péage + carburant en euros).....	242
Figure 95. Temps d'accès en situation normale de : A) Grenoble à Briançon, B) Briançon à Grenoble	244
Figure 96. Temps d'accès en situation perturbée de : C) Grenoble à Briançon, D) Briançon à Grenoble	246
Figure 97. Population potentiellement impactée par les pertes d'accessibilité du territoire au Grand Briançonnais dans le sens Grenoble – Briançon	247

Figure 98. Nombre de lits (offre touristique par commune) potentiellement impactés par kilomètre linéaire par les pertes d'accessibilité du territoire du Grand Briançonnais dans le sens Grenoble – Briançon.....	248
Figure 99. Répartition des secteurs d'intervention par commune pour chaque centre de secours dans la vallée de la Guisane.....	250
Figure 100. A. Accessibilité depuis Täscher en situation normale ; B. Accessibilité depuis Täscher en situation de coupure par le Ritigraben (Perche, 2013)	251

Table des Tableaux

Tableau 1. Les niveaux de vulnérabilité (Bouchon, 2006).....	19
Tableau 2. Vision holistique/globale des problématiques concernant l'analyse des infrastructures de transport routier.....	31
Tableau 3. Terminologie des mouvements de terrain de type écoulement dans la littérature anglophone (d'après Le Mignon, 2004)	46
Tableau 4. Valeur de l'attribut IMPORTANCE, classe ROUTE de la BDTOPO (Source : Métadonnées BDTOPO 2011 - IGN).....	62
Tableau 5. Valeur de l'attribut CLASSE ADMINISTRATIVE, classe ROUTE de la BDTOPO (Source : Métadonnées BDTOPO 2011 - IGN)	63
Tableau 6. Kilométrage routier par classe administrative et par département en kilomètres (INSEE)	65
Tableau 7. Fréquentation touristique année 2011 par département en nombre de nuitées (INSEE)..	68
Tableau 8. Typologie des dommages physiques (DP) du réseau routier (Léone et Deymier, 2011, adapté de Léone, 1996).....	70
Tableau 9. Volumes, épaisseurs et longueur des dépôts lave torrentielle estimés sur la chaussée routière sur 68 événements renseignés de 1950 à 2009 pour les départements 73, 05 et 04 (Léone et Deymier, 2011)	72
Tableau 10. Typologie des perturbations fonctionnelles (PF) du réseau routier (Léone et Deymier, 2011, adapté de Léone, 1996).....	73
Tableau 11. Critères retenus pour le choix des sites d'étude	78
Tableau 12. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant du Rif Blanc.....	82
Tableau 13. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant du Rif Blanc	86
Tableau 14. Synthèse des événements lave torrentielle sur le torrent du Rif Blanc et leurs conséquences sur le réseau routier	87
Tableau 15. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant de Malefosse	93
<i>Tableau 16. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant de Malefosse</i>	<i>94</i>
Tableau 17. Synthèse des événements lave torrentielle sur le torrent de Malefosse et leurs conséquences sur le réseau routier	95
Tableau 18. Caractéristiques topographiques générales du bassin-versant du Rieu Sec.....	96
Tableau 19. Évènements torrentiels et impact réseau sur le bassin-versant du Rieu Sec.....	100
Tableau 20. Synthèse des événements lave torrentielle sur le torrent du Rieu Sec et leurs conséquences sur le réseau routier	101
Tableau 21. Tableau de comptage routier 2011 tous véhicules pour les stations de La Grave et de Monétier-Les-Bains MJM : Moyennes Journalières Mensuelles. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)	103

Tableau 22. Tableau de comptage moyen journalier routier 2011 poids lourds pour les stations de la Grave et de Monétier-Les-Bains, MJM : Moyennes Journalières Mensuelles. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)	104
Tableau 23. Tableau de comptage routier 2009/2012/2013 tous véhicules et poids lourds pour le tronçon Briançon-Montgenèvre et le Col de Montgenèvre. MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05).....	106
Tableau 24. Tableau de comptage routier 2008/2013 tous véhicules et poids lourds pour le tronçon Chambéry-Modane, MJA : Moyennes Journalières Annuelles (Source : CG05)	107
Tableau 25. Trafic de marchandises aux principaux points de passage avec l'Italie (Source : Alpinfo, CG73).....	108
Tableau 26. Recensement des stations météorologiques situées proche des bassins-versants et plage de données pluviométriques disponibles (Données observées)	115
Tableau 27. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Rif Blanc	132
Tableau 28. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Rif Blanc	133
Tableau 29. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Malefosse.....	134
Tableau 30. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Malefosse	135
Tableau 31. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J) – Rieu Sec.....	137
Tableau 32. Synthèse de l'occurrence pluviométrique par évènement (jour J + J-1 à J-3) – Rieu Sec	138
Tableau 33. Différentes approches de modélisation dynamique des laves torrentielles.....	143
Tableau 34. Paramètres rhéologiques utilisés pour le modèle MassMov 2D (source : notice explicative du modèle)	147
Tableau 35. Méthodes d'estimation des volumes de lave torrentielle	158
Tableau 36. Critères de notation des enjeux généraux en vue d'estimer le degré de vulnérabilité du réseau départemental (CG05, 2011).....	195
Tableau 37. Critères de notation des enjeux détaillés en vue d'estimer le degré de vulnérabilité du réseau départemental (CG05, 2011).....	196
Tableau 38. Organismes rencontrés lors des entretiens.....	202
Tableau 39. Thèmes abordés lors des entretiens auprès des acteurs-clés.....	204
Tableau 40. Rubriques de présentation des procédures de déviation de la RD1091 (CG05, 2011) ...	212
Tableau 41. Échelle d'intensité des perturbations du réseau (adapté du CG05).....	213
Tableau 42. Exemple d'outils et logiciels permettant de modéliser d'accessibilité routière	227
Tableau 43. Paramétrage du sens de circulation dans RouteFinder à partir du champ IMPORTANCE de la BD TOPO (IGN).....	232
Tableau 44. Classes de vitesses renseignées dans RouteFinder (véhicules légers)	233
Tableau 45. Classification des routes dans la Vallée de Zermatt	237

Table des Annexes

Annexe 1. Coût global des dommages directs.	306
Annexe 2. Fiche intempéries, Conseil Général Hautes-Alpes.	307
Annexe 3. Cartographie du réseau routier départemental.....	309
Annexe 4. Intensité des pluies journalières – Rif Blanc.....	310
Annexe 5. Intensité des pluies horaires – Rif Blanc.....	311
Annexe 6. Histogrammes de fréquence des pluies horaires – Rif Blanc.....	314
Annexe 7. Exemple d’itérations – MassMov2D.	319
Annexe 8. Jeux de cartes en entrée par défaut – MassMov2D.....	320
Annexe 9. Fiche évènement Risques Naturels, Conseil Général/RTM Hautes-Alpes.	321

Annexe 1. Coût global des dommages directs.

Estimation du coût moyen global des dommages directs (SCAMPEI, 2011)

	Intensités de dommages physiques						Coût moyen estimé (en k€ 2011)	
	D	D1	D3	D4	D5	DP		
Coût moyen (en k€ 2011)	14,3	4,2	14,3	27,5	705,3	352,7		
	Fréquence annuelle des intensités de dommages physiques						Annuel	1950-2009
Alpes de Haute-Provence	0,17	0,03	0,27	0,00	0,00	0,00	6,4	380,2
Hautes-Alpes	0,71	0,00	0,92	0,05	0,07	0,10	108,4	6392,7
Savoie	0,97	0,00	0,53	0,03	0,05	0,05	76,1	4487,4
Total 3 départements	1,85	0,03	1,71	0,08	0,12	0,15	190,9	11260,3

Annexe 2. Fiche intempéries, Conseil Général Hautes-Alpes.

FICHE INTEMPERIES



RD	PR	Phénomène	Date	PRIORITE
1091	22+400	Crue torrentielle du torrent du Rif Blanc	29 mai et 1 ^{er} juin	1, 2 ou 3
Commune		Lieu-dit	Maison Technique	
Le Monétier les Bains		Rif Blanc	La Grave	

Description de l'événement

De fortes pluies pendant une semaine fin mai qui ont accéléré la fonte de la neige, le débit du torrent du Rif Blanc a considérablement augmenté. Les berges ont été érodées, avec formation d'embâcles et transport de laves torrentielles contenant de gros éléments.

Nature des dégâts

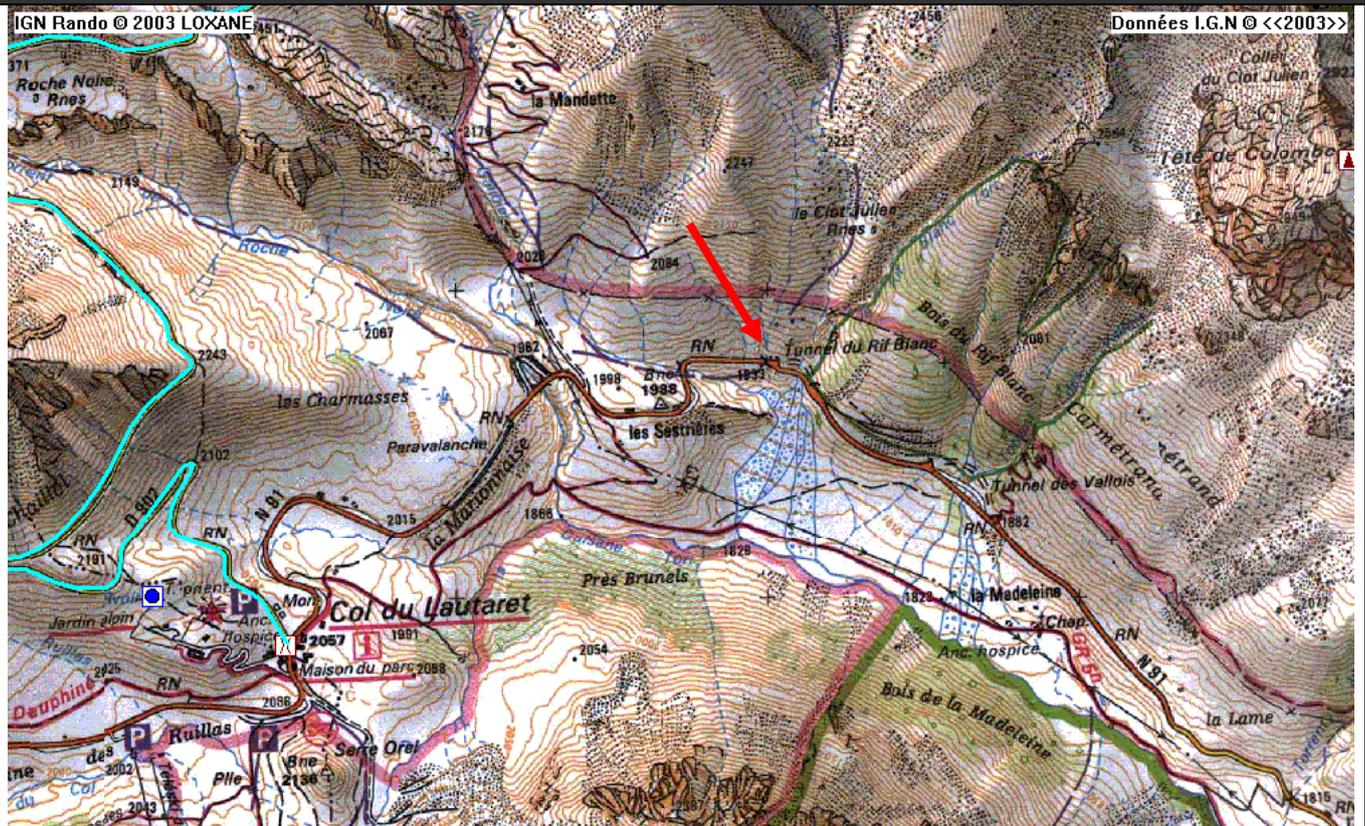
La buse métallique sous la déviation du tunnel a été totalement obstruée par des laves torrentielles qui se sont également déposées sur la route. L'eau s'écoule sur la chaussée et ravine le talus aval.

Travaux de sécurisation

Enjeux /diagnostic	Maintien du trafic Briançon Grenoble. Rétablissement de la circulation à l'intérieur du tunnel avec alternat par feux.		
Travaux de 1^{ère} urgence	Dérivation du torrent de son lit principal, débouchage manuel de la buse sur une longueur de 12 m environ, rétablissement de l'écoulement dans la buse, reconstitution du talus aval et de la chaussée		
Travaux pouvant être envisagés	Remplacement de la buse par un ouvrage de plus grande section pouvant être débouché mécaniquement si besoin était		
Estimation coût	Travaux de 1^{ère} urgence (très court terme)	Mesures conservatoires (court terme)	Mesures définitives (moyen-long terme)

	125 000 € HT	€ HT	€ HT
Délais	Débouchage ouvrage et reconstitution du talus	Modèle : « Travaux entrepris semaine 45, terminés semaine 48 ».	RAS ou à préciser par l'Agence ou le SMOE
Observations			

Plan de situation



Annexe 3. Cartographie du réseau routier départemental.

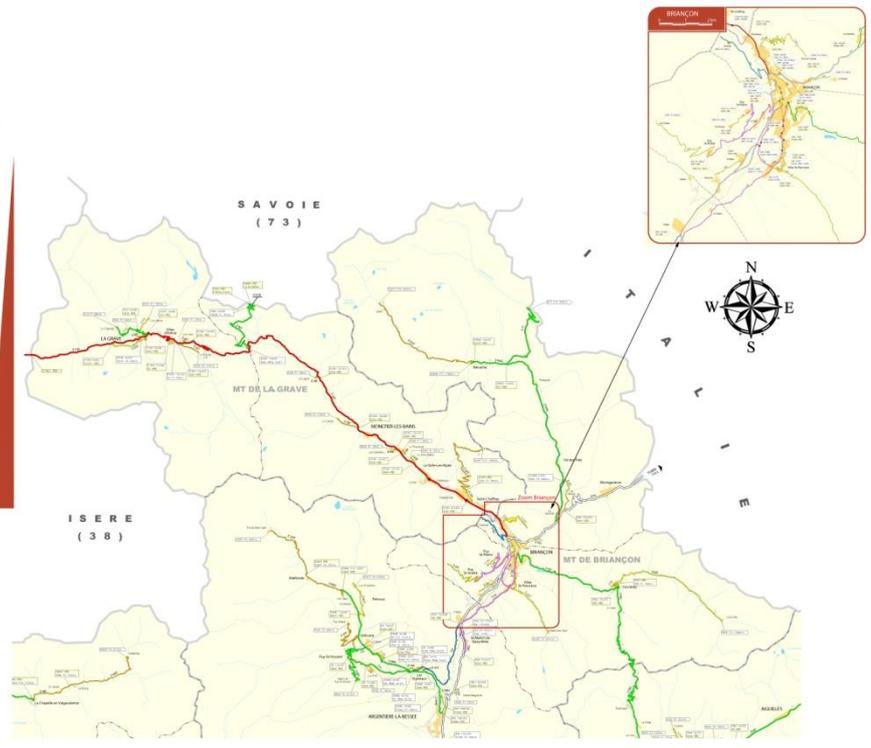


DEPARTEMENT DES HAUTES-ALPES

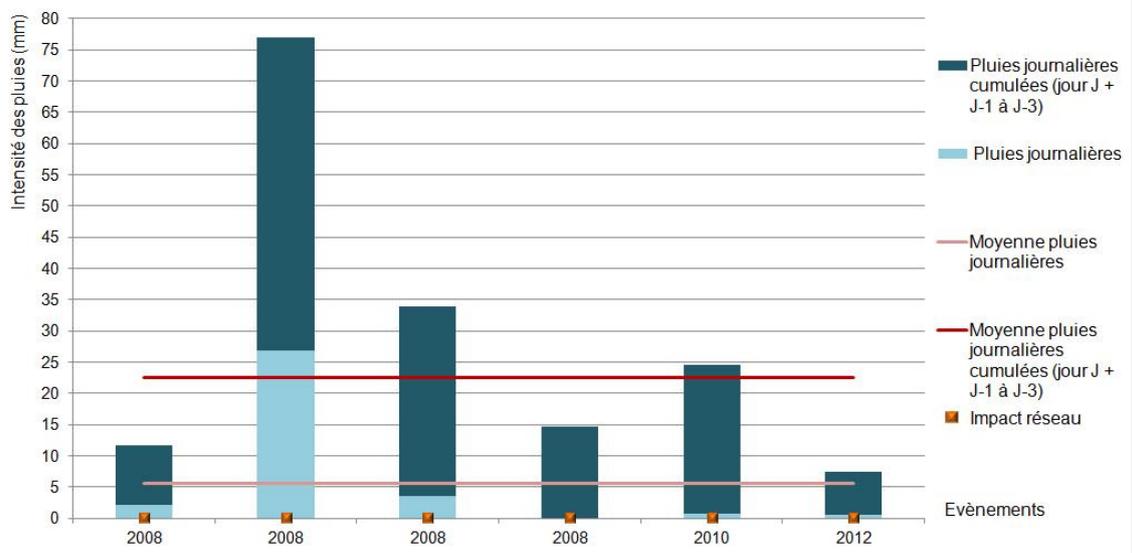
RESEAU ROUTIER DEPARTEMENTAL

ROUTES DEPARTEMENTALES Classement Catégoriel	
ITINERAIRES STRATEGIQUES	Classement Catégoriel
	Grand axe économique (GAE)
	Itinéraire d'intérêt touristique majeur (ITM)
RESEAU STRUCTURANT	
	Réseau primaire périurbain (RPP)
	Réseau de desserrement du milieu rural (RDAR)
RESEAU SECONDAIRE	
	Réseau secondaire à vocation touristique suburbaine (RSVS)
	Réseau secondaire de desserte locale (RDSL)
	Autosole
	Road nationale
	Via communale
	Via forest
	Limite de rattachement technique (LRT)
	Limite de canton
	Limite de commune

18/10 novembre 2010 CG05 / Service Entretien et Exploitation de la Route

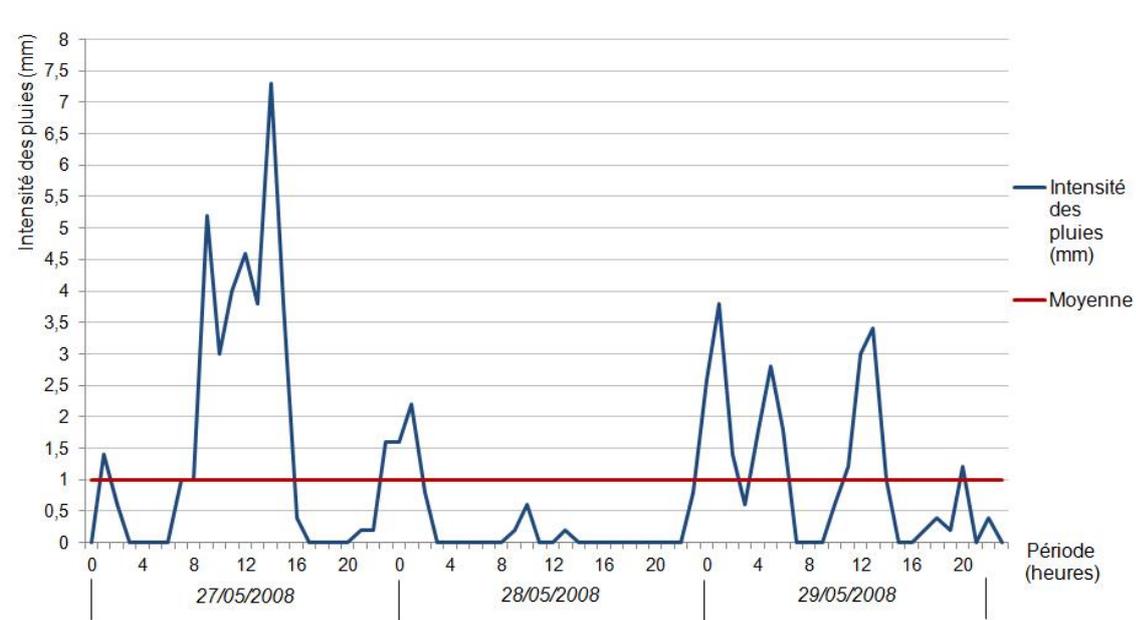


Annexe 4. Intensité des pluies journalières – Rif Blanc.

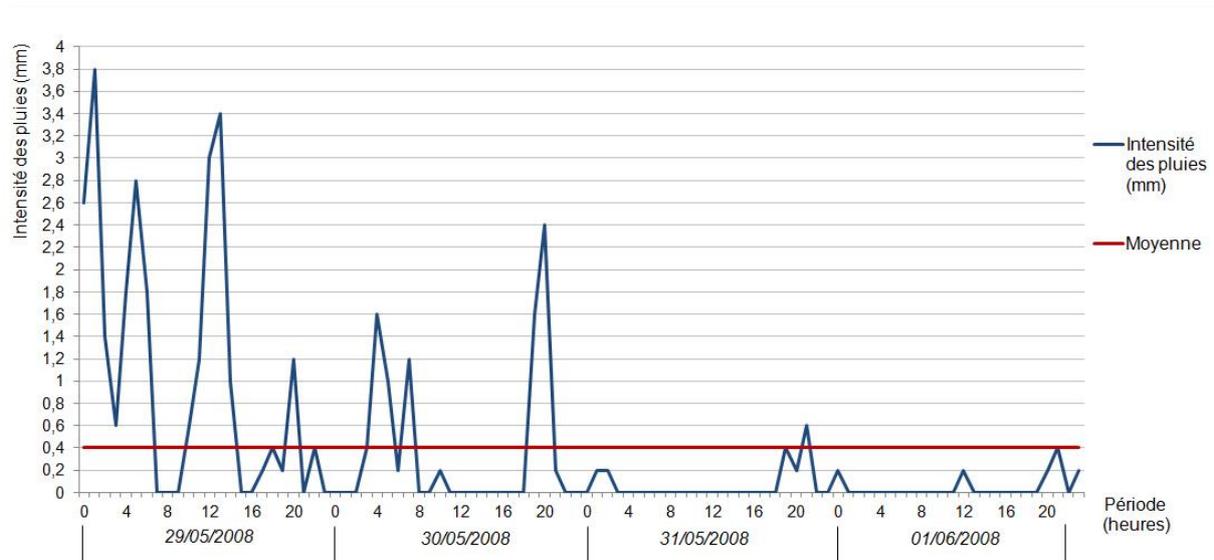


Intensité des pluies journalières observées par événement – Rif Blanc (station : Briançon)

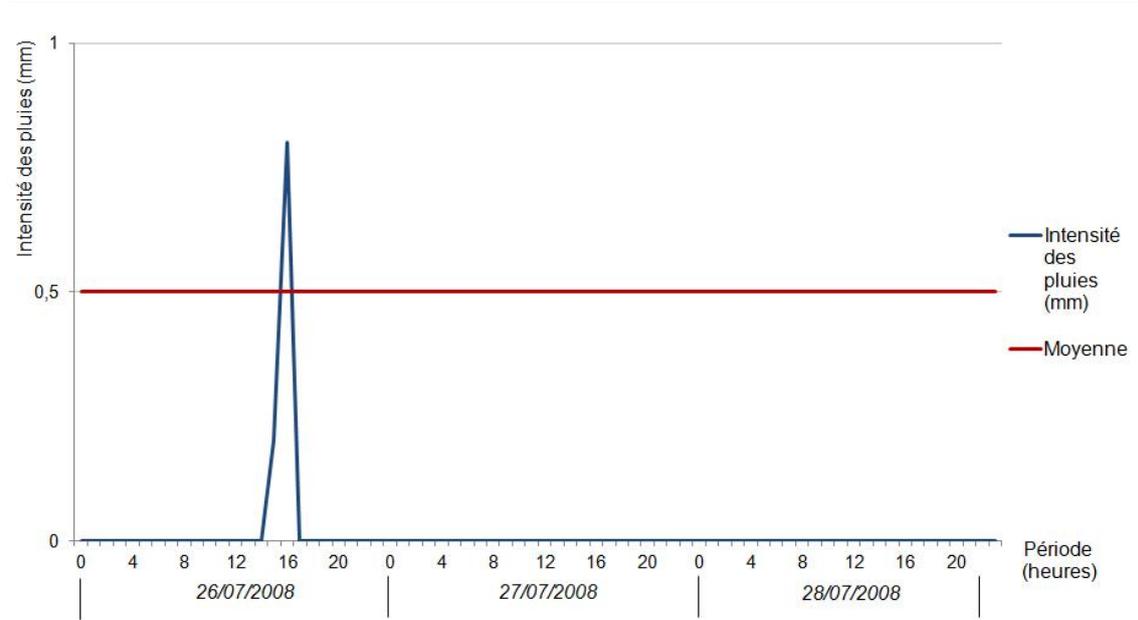
Annexe 5. Intensité des pluies horaires – Rif Blanc.



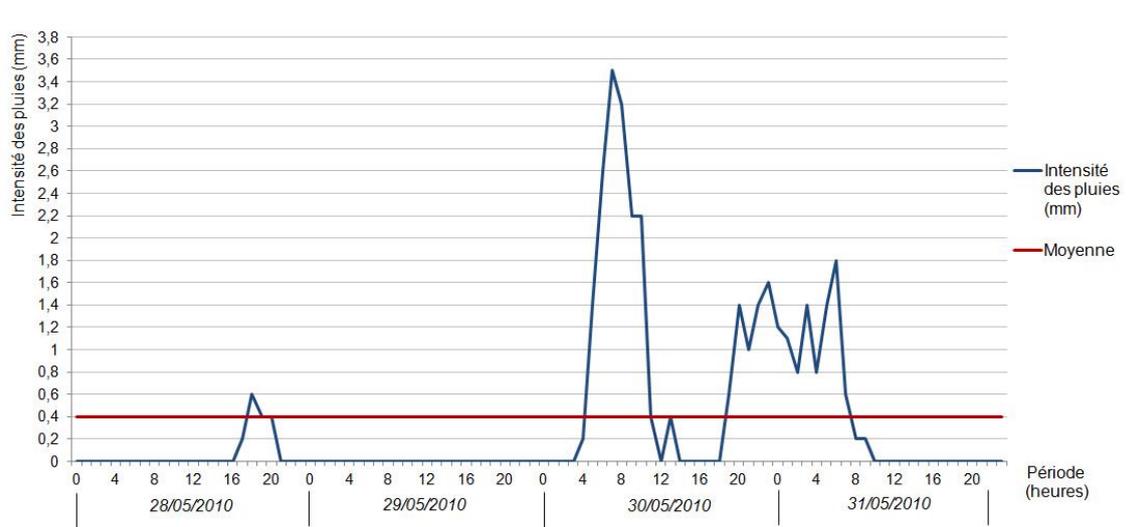
Intensité des pluies horaires – Rif Blanc Évènement 29 mai 2008



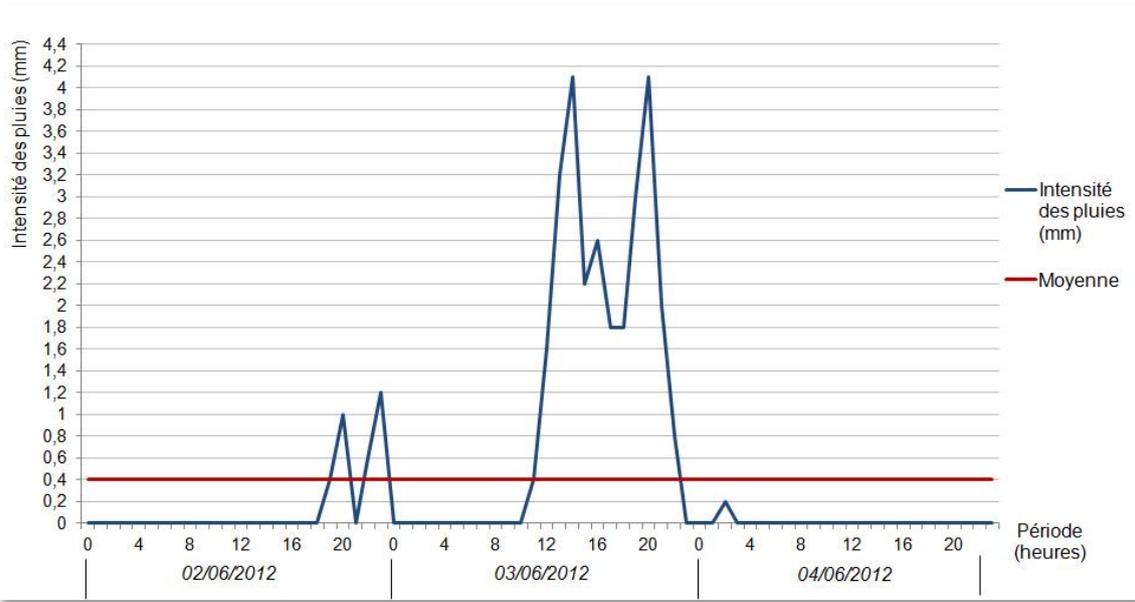
Intensité des pluies horaires – Rif Blanc Évènement 1^{er} juin 2008



Intensité des pluies horaires – Rif Blanc Évènement 28 juillet 2008



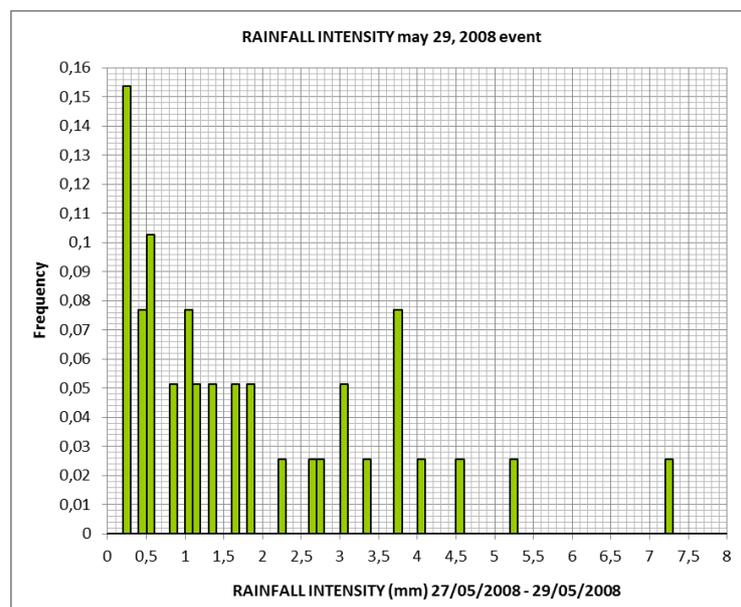
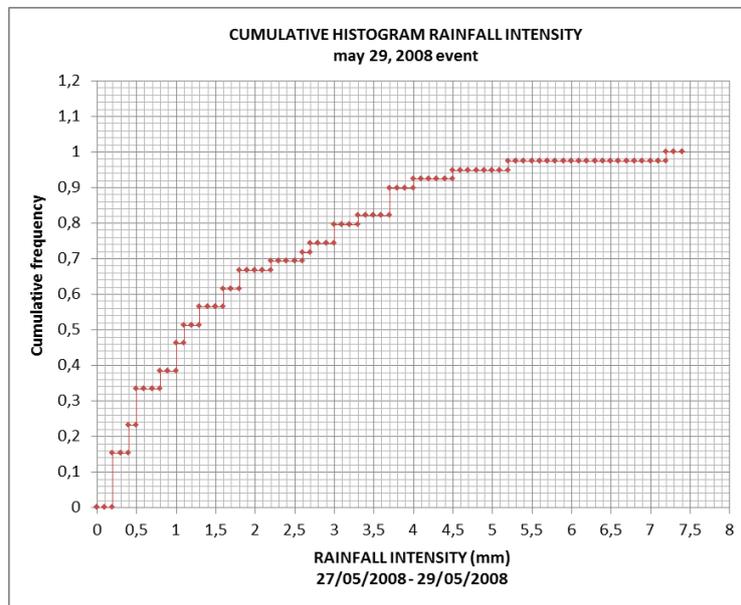
Intensité des pluies horaires – Rif Blanc Évènement 31 mai 2010

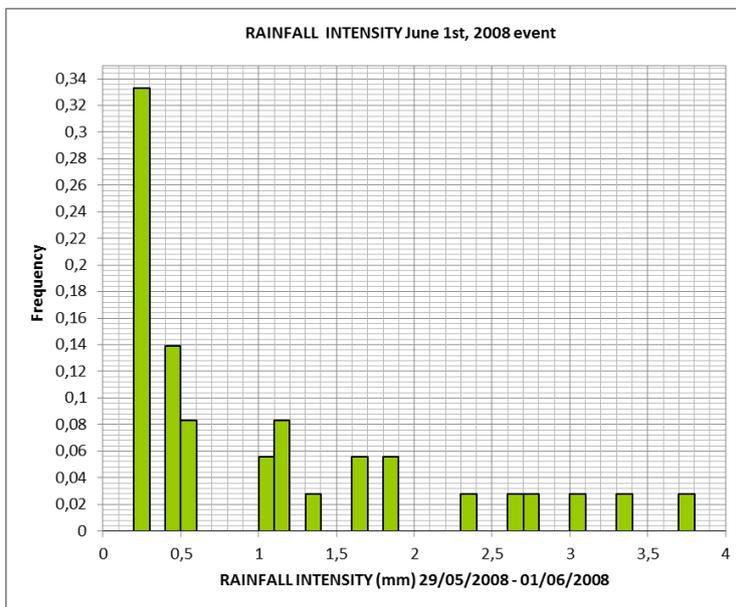
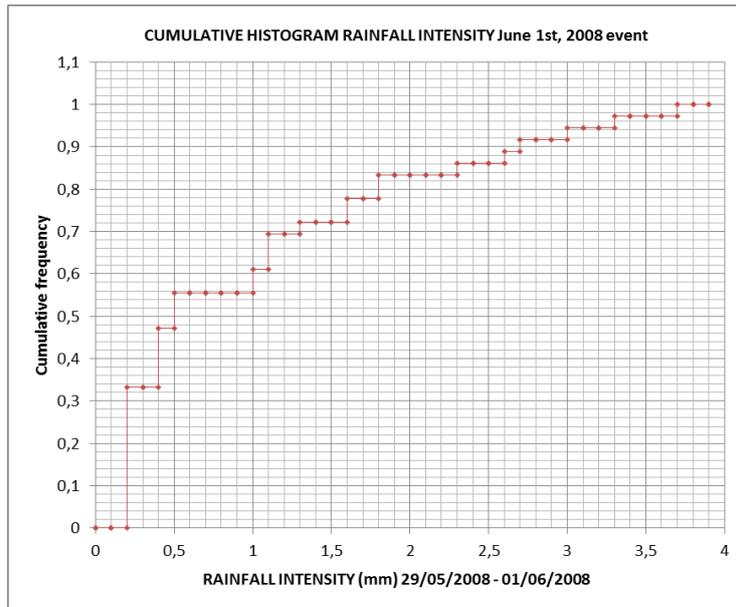


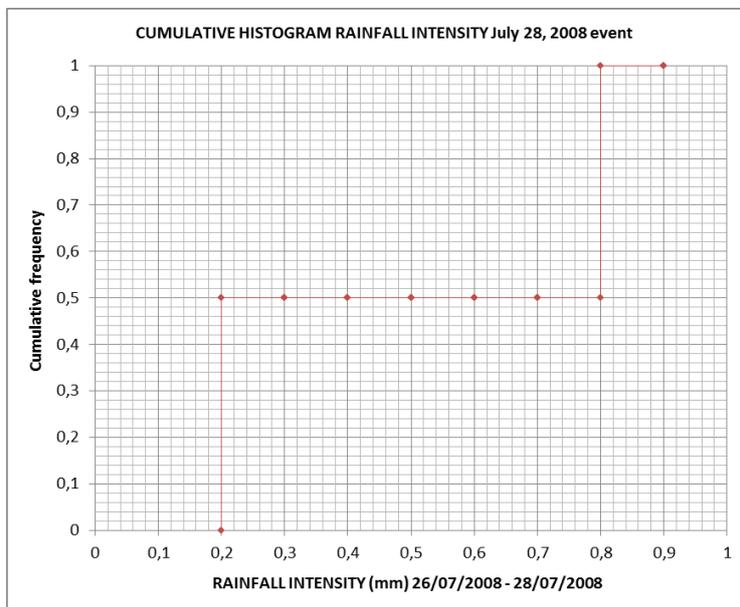
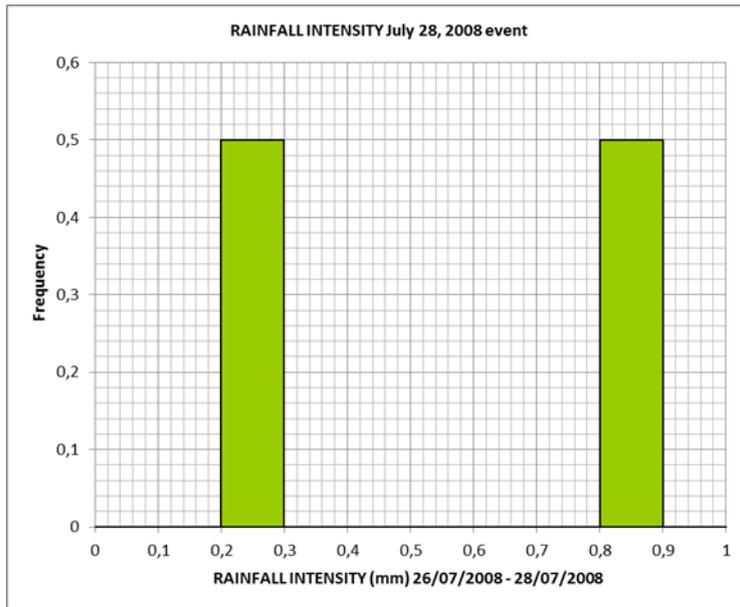
Intensité des pluies horaires – Rif Blanc Évènement 4 juin 2012

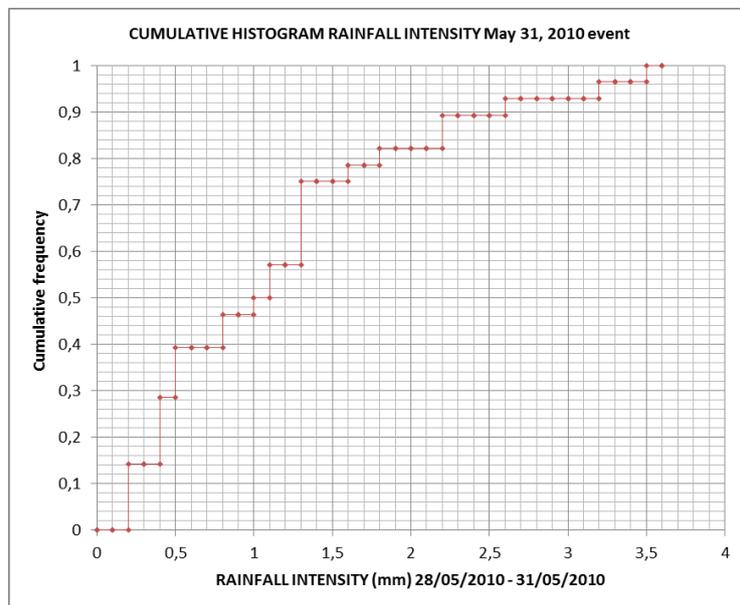
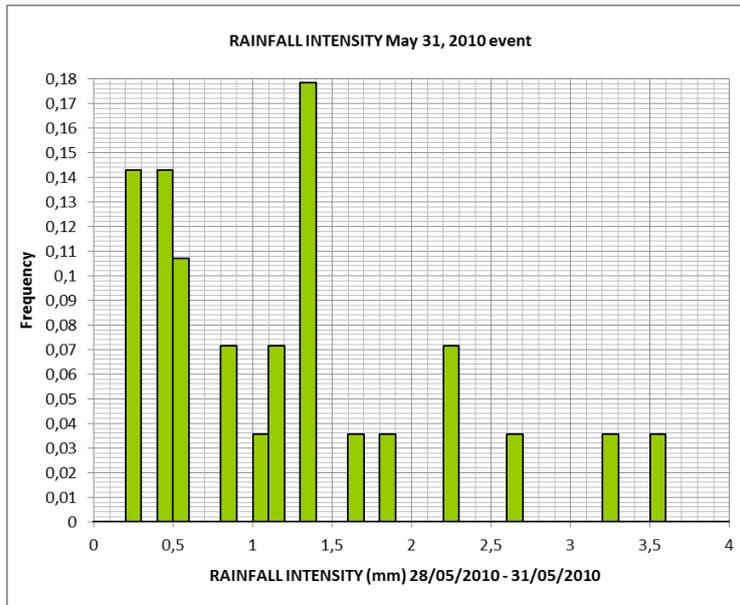
Annexe 6. Histogrammes de fréquence des pluies horaires – Rif Blanc.

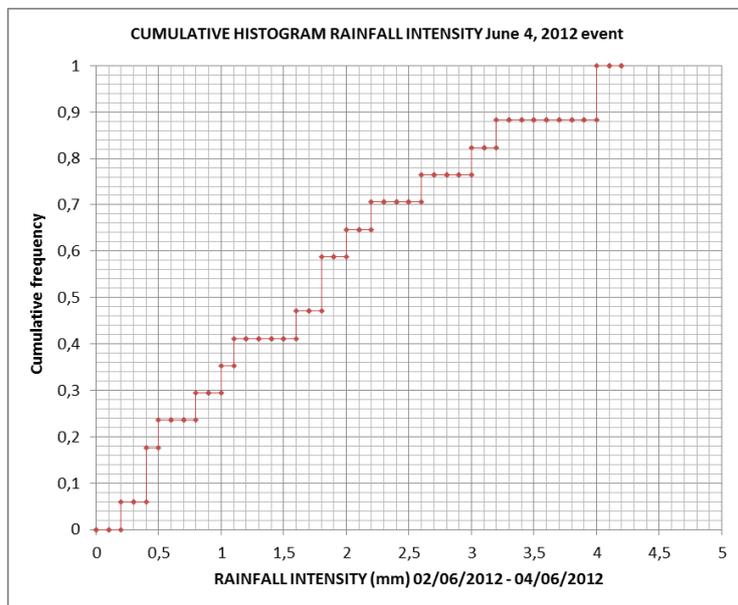
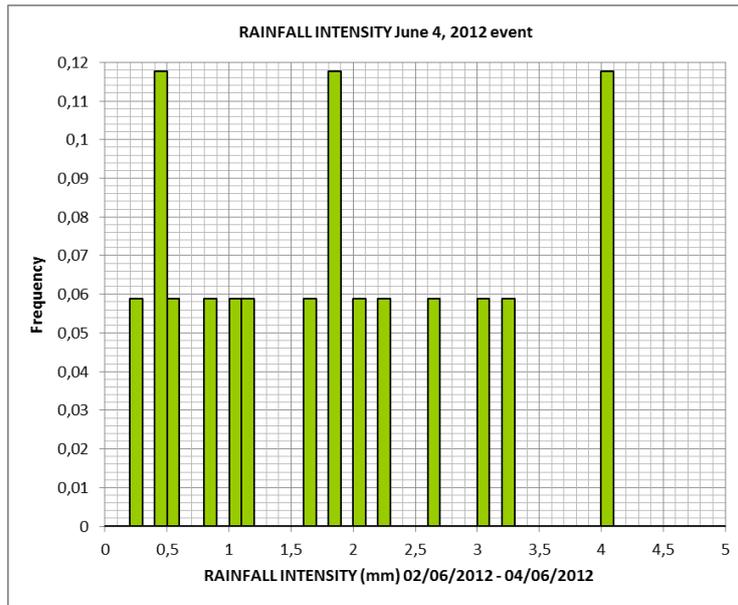
Histogramme de fréquence / Histogramme de fréquence cumulée des pluies horaires par évènement sur le bassin versant du Rif Blanc (jour J + 3 jours) :



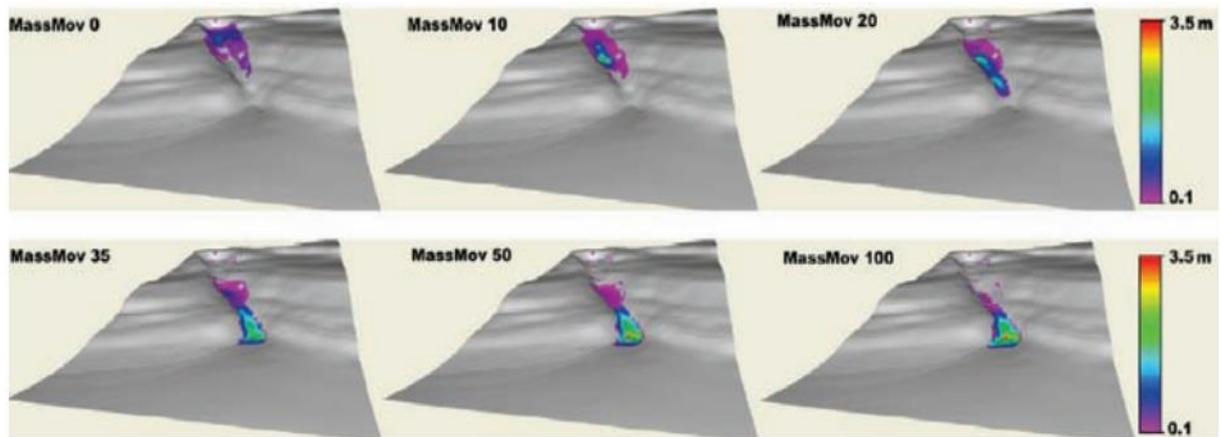






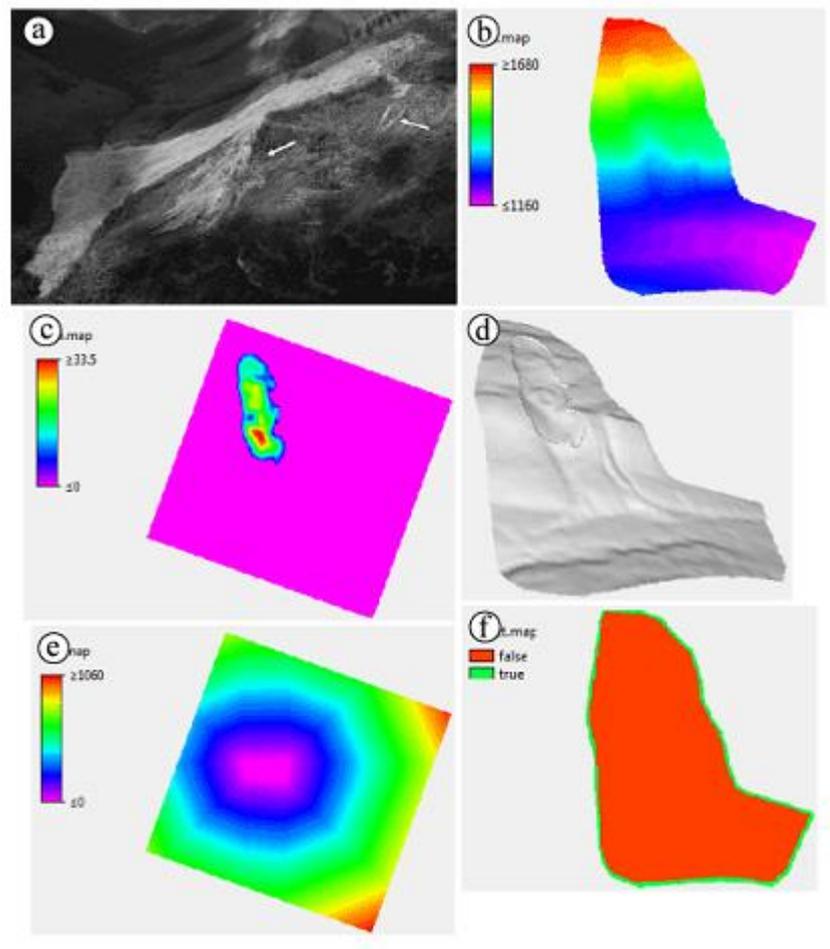


Annexe 7. Exemple d'itérations – *MassMov2D*.



Évolution temporelle de la hauteur de la lave torrentielle du Peringalam (Inde) modélisée par *MassMov2D* – Exemple d'itérations au cours de la simulation (Quan Luna, 2012)

Annexe 8. Jeux de cartes en entrée par défaut – *MassMov2D*.



Jeu de cartes proposé par défaut dans *MassMov2D*, exemple du glissement de Turnoff Creek en Colombie Britannique (Geertsema et al., 2006).

a) photographie de 2002 du site ; b-d) topographie 2D et 3D ; c) hauteur initiale de la masse glissée ; e) distances à partir du pied de la masse glissée f) domaine spatial de simulation et la résolution utilisée.

Annexe 9. Fiche événement Risques Naturels, Conseil Général/RTM Hautes-Alpes.



FICHE EVENEMENT RISQUES NATURELS

Conditions de la visite			
Date		2010	
Conditions météo			
Matériel nécessaire			
Accessibilité	<input type="checkbox"/> Sans équipement spécial	<input type="checkbox"/> Cordiste	
Effectuée par			

SITUATION					
RD		PR début		PR fin	
Altitude (m NGF)		GPS début	E N	GPS fin	E N
Commune(s)	Lieu-dit				

ORIGINE DE L'INFORMATION	
<input type="checkbox"/> Interne :	<input type="checkbox"/> MT <input type="checkbox"/> Autre, préciser :
<input type="checkbox"/> Externe :	<input type="checkbox"/> Gendarmerie <input type="checkbox"/> CODIS <input type="checkbox"/> Particulier <input type="checkbox"/> Autre (préciser) :
Obs. événement	

NATURE DE L'ÉVÈNEMENT				
Chutes de blocs, éboulements rocheux				
Type	<input type="checkbox"/> Chutes de blocs (10 dm ³ <V< 5 m ³)	<input type="checkbox"/> Éboulement en masse (5 m ³ <V< 100 m ³)	<input type="checkbox"/> Éboulement en grande masse (V> 100 m ³)	
Origine	<input type="checkbox"/> Talus-falaise à l'aplomb			
	<input type="checkbox"/> Versant intermédiaire			
	<input type="checkbox"/> Falaise sommitale déportée			
Volume éboulé	m ³	Emprise sur RD	ml	
Fréquence	<input type="checkbox"/> Exceptionnelle	<input type="checkbox"/> Rare	<input type="checkbox"/> Fréquente	<input type="checkbox"/> Très fréquente <input type="checkbox"/> ?
Obs. événement				

Glissements de terrain			
Localisation	<input type="checkbox"/> Talus amont		
	<input type="checkbox"/> Talus aval		
Volume glissé	m ³	Emprise sur RD	ml
Antécédents	<input type="checkbox"/> Secteur connu pour être instable	<input type="checkbox"/> Nouvelle instabilité	<input type="checkbox"/> ?
Obs. événement			

Inondations et crues torrentielles			
Type	<input type="checkbox"/> Lave torrentielle	<input type="checkbox"/> Charriage (eau+blocs)	<input type="checkbox"/> Inondation (eau)
Nom du torrent			
Emprise sur RD	ml	Épaisseur maxi	m
Autres phénomènes hydrauliques	<input type="checkbox"/> Remontée de nappe		<input type="checkbox"/> Accumulation d'eau
	<input type="checkbox"/> Autre (préciser) :		
Obs. événement			

Avalanches - Coulées de neige - Congères			
Type d'avalanche	<input type="checkbox"/> Neige lourde	<input type="checkbox"/> Poudreuse	<input type="checkbox"/> Aérosol
Nom du couloir	N° CLPA		
Coulée de neige (talus)	<input type="checkbox"/> Précisions :		
Congère (vent)	<input type="checkbox"/> Précisions :		
Emprise sur RD	ml	Épaisseur maxi	m
Fréquence	<input type="checkbox"/> Exceptionnelle	<input type="checkbox"/> Rare	<input type="checkbox"/> Fréquente <input type="checkbox"/> Très fréquente <input type="checkbox"/> ?
Obs. événement			

DIT - SMOE
Mise à jour janvier 2009
1/3



EVOLUTION DE LA SITUATION

Sous	<input type="checkbox"/> 24h	<input type="checkbox"/> Aggravation	<input type="checkbox"/> 48h	<input type="checkbox"/> Aggravation	<input type="checkbox"/> 1 semaine	<input type="checkbox"/> Aggravation
		<input type="checkbox"/> Stabilisation		<input type="checkbox"/> Stabilisation		<input type="checkbox"/> Stabilisation
		<input type="checkbox"/> Amélioration		<input type="checkbox"/> Amélioration		<input type="checkbox"/> Amélioration
Obs. éven.						

ETAT DE LA CHAUSSEE ET DES OUVRAGES

Pas de dégâts	<input type="checkbox"/>	
Dégâts ponctuels	<input type="checkbox"/> Sur chaussée	<input type="checkbox"/> Impacts de bloc <input type="checkbox"/> Epanchement - engrèvement <input type="checkbox"/> Erosion Obs. éven.
	<input type="checkbox"/> Sur ouvrage de protection (OPF)	<input type="checkbox"/> OPF détérioré <input type="checkbox"/> OPF ruiné Obs. éven.
	<input type="checkbox"/> Autres (OA, réseaux...)	Préciser : Obs. éven.
Effondrement	<input type="checkbox"/> Partiel	Obs. éven.
	<input type="checkbox"/> Total	Obs. éven.

INCIDENCES SUR LA CIRCULATION

Route impraticable	<input type="checkbox"/> Obs. éven.
Route praticable	<input type="checkbox"/> Obs. éven.
Route praticable sous réserves	<input type="checkbox"/> Route interdite aux PL <input type="checkbox"/> Route en sens unique <input type="checkbox"/> Alternat <input type="checkbox"/> Autre (préciser) :

INTERVENTION DE PREMIERE URGENCE - SUITE A DONNER

Première urgence	<input type="checkbox"/> Signalisation	Obs. éven.
	<input type="checkbox"/> Protections	Obs. éven.
Suite à donner	<input type="checkbox"/> Aucune, pour info	
	<input type="checkbox"/> Diagnostic	<input type="checkbox"/> Visite SMOE - RN <input type="checkbox"/> Intervention BE
	<input type="checkbox"/> Travaux	<input type="checkbox"/> Régie <input type="checkbox"/> Intervention entreprise Nature des travaux :
Obs. éven.		

01/07/2011

Code risque : T **Date de l'événement :** 28 juin 2011

Commune(s) : BRIANCON (Malefosse) / VAL-DES-PRES (Malefosse) **Site(s) :** TORRENT DE MALEFOSSE

Evt valide : **CatNat : expertise RTM :** **N° de classement :** 0502300139

Evt diffusable : **Reconnaissance CatNat :** **Intensité :** 2

Caractéristiques du phénomène

Durée du phénomène

Commentaires sur la durée

Nature du phénomène lave torrentielle de faible importance. Aucun dégât constaté

Causes du phénomène orage de fin de journée chaude. Grêle constatée à la Vachette

Zone de départ

Localisation pied de falaise altitude 2000 m environ

Description Eboulis et placages facilement mobilisables

Zone d'arrivée

Localisation dans la Durance altitude 1340 m

Description dépôt sur environ 50 ml et 15 m de largeur +/- 2m de hauteur

Impacts du phénomène

Commune (lieu-dit)	Victimes	Dégâts	Perturb	Commentaires
BRIANCON (Malefosse)	N	N	N	
VAL-DES-PRES (Malefosse)	N	N	N	

Commentaires

Documentation

Source	Date	Document
RTM	30 juin 2011	constat et photos de Gilles ASTIER



Dépôt dans la Durance



laissés de lave au niveau du radier