



Projet ANR-08-VMCS-00

SCAMPEI



**Vulnérabilités des réseaux routiers face
aux *debris flows* dans les Alpes**

Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale

FREDERIC LEONE & JULIEN DEYMIER

AVEC LA COLLABORATION DE

VINCENT JOMELLI, LAURENT CHAPELON, OLIVIER BOUHET, ALBERT COLAS, FREDDY VINET
JEAN-PHILIPPE CHEREL, LA PROMOTION 2010-2011 DU MASTER 2 GCRN

EA GESTER / UMR GRED / UNIVERSITE MONTPELLIER 3

MAI 2011

Citation de ce rapport :

Leone F., Deymier J., Jomelli V., Chapelon L., Bouhet O., Colas A., Vinet F., Cherel J. P., Master 2 GCRN (2011) – *Vulnérabilités des réseaux routiers face aux 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.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	4
PARTIE 1 - APPROCHE REGIONALE	
A VULNERABILITES DES RESEAUX ROUTIERS ET <i>DEBRIS FLOWS</i> : ASPECTS GENERAUX	6
A.1 Différentes approches de la vulnérabilité des réseaux routiers.....	6
A.2 Les debris flows.....	7
A.3 Modalités d'endommagement direct et indirect des réseaux routiers	10
A.3.1 Les dommages physiques (ou structurels).....	10
A.3.2 Les perturbations fonctionnelles	13
A.3.3 Préjudices économiques.....	15
A.3.4 Les pertes d'accessibilité du territoire comme préjudice induit.....	18
B LES VULNERABILITES PHYSIQUES ET FONCTIONNELLES A POSTERIORI DU RESEAU ROUTIER ALPIN	20
B.1 Zone d'étude et bases de données SIG constituées	20
B.2 Temporalités et cartographie des vulnérabilités physiques et fonctionnelles.....	24
B.2.1 Répartition temporelle des impacts	24
B.2.2 Distribution géographique des impacts	26
C MODELISER LE RESEAU ET L'ACCESSIBILITE ROUTIERE AU MOYEN DE GRAPHES	30
C.1 Graphes et accessibilité.....	30
C.2 Choix de la distance-temps comme valuation	32
C.3 Les matrices d'accessibilité	32
C.4 Solutions logicielles	33
C.4.1 Le logiciel MapNod.....	33
C.4.2 Fonctionnalités de Routefinder <i>in</i> MapInfo	34
C.5 Bases de données constituées pour la modélisation de l'accessibilité.....	39
C.5.1 BD réseau routier	39
C.5.2 BD cols.....	40
C.5.3 BD villes de plus de 10 000 habitants.....	41
C.5.4 BD communes	42
C.5.5 BD sites touristiques (stations de ski)	43

D	GEO-INDICATEURS ET INDICES DE RISQUE POUR LE RESEAU ROUTIER	46
D.1	Indicateur d'exposition du réseau routier	46
D.2	Indices de risque de perturbation fonctionnelle	48
D.2.1	Les composantes des indices	48
D.2.2	Indice de valeur fonctionnelle par destruction de lien du réseau (Id)	50
D.2.3	Cartographie du risque de dysfonctionnement	54
E	MODELISATION DE LA DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE TERRITORIALE PAR VOIE ROUTIERE	58
E.1	Un réseau routier stratégique mais vulnérable	58
E.2	Modélisation multipolaire de l'accessibilité à l'état normal	58
E.3	Plusieurs familles d'enjeux territoriaux considérés	61
E.3.1	Les stations touristiques (ski) : des moteurs économiques vulnérables	61
E.3.2	Les communes alpines faces à la dégradation de l'accessibilité routière	62
E.3.3	Des enjeux soumis à différentes temporalités	62
E.4	Modélisation de la dégradation de l'accessibilité territoriale pour deux scénarios à <i>debris flows</i>	64
E.4.1	Choix des scénarios	64
E.4.2	Commentaires des résultats	76
	CONCLUSION PARTIE 1	80
	BIBLIOGRAPHIE PARTIE 1	81
	PARTIE 2 - APPROCHE LOCALE	
F	PRESENTATION	84
G	LE BASSIN A RISQUE DE BARCELONNETTE	86
G.1	Les aléas torrentiels	86
G.2	Risque direct vs indirect lié à la perte d'accessibilité	88
H	CRITERES DE VULNERABILITE ET GEO-INDICES DE RISQUE	88
H.1	Les fiches de diagnostic	88
H.1.1	La fiche « bâti »	89
H.1.2	La fiche « ouvrage de franchissement »	90
H.1.3	La fiche torrent	93
H.2	Décrire la vulnérabilité des biens et des personnes	95
H.2.1	Les facteurs de vulnérabilités	95
H.2.2	Le choix des critères	95

I	LA MESURE DU RISQUE AU MOYEN D'INDICES.....	101
I.1	Une pondération « à dire d'expert ».....	101
I.2	Indices spécifiques de vulnérabilité.....	103
I.3	Indices spécifiques d'enjeux humains et économiques.....	105
I.4	Indices spécifiques de risques humain et économique	106
I.5	Variabilité saisonnière des enjeux humains	106
I.6	Indices globaux de risques humain et économique.....	107
J	RESULTATS CARTOGRAPHIQUES.....	109
J.1	Risque humain	109
J.2	Risque économique	112
K	SCENARIOS DE DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE.....	116
K.1	Présentation.....	116
K.2	Choix du réseau routier et paramétrage des vitesses.....	116
K.3	Indice de risque de coupure.....	119
K.4	L'accessibilité routière à l'état normal	123
K.5	Scénarios de dégradation de l'accessibilité.....	124
K.5.1	Scénario n°1, juin 1957	124
K.5.2	Scénario n°2, août 2003	125
K.5.3	Scénario 3 (prédictif)	127
L	INTEGRATION DE LA PERTE D'ACCESSIBILITE DANS LA MESURE DU RISQUE HUMAIN.....	129
L.1	Principe des indices.....	129
L.2	Résultats cartographiques	129
	CONCLUSION PARTIE 2	133
	BIBLIOGRAPHIE PARTIE 2.....	134

INTRODUCTION GENERALE

Que ce soit pour instaurer une dynamique économique ou pour réduire une fracture territoriale, les réseaux sont des éléments structurants indispensables à la vitalité des territoires. En espace montagnard, l'accessibilité routière revêt un caractère particulièrement stratégique pour le maintien des activités économiques, notamment celles liées aux stations touristiques, mais également pour les interventions de secours en cas de catastrophe naturelle. Or cette accessibilité, naturellement très dépendante du relief, présente une faible connectivité qui peut être dégradée davantage par l'occurrence de divers aléas naturels (avalanches, crues torrentielles, mouvements de terrain).

La vulnérabilité des réseaux routiers face à ces phénomènes, peut être analysée *a posteriori* ou *a priori*, sous plusieurs de ses formes : vulnérabilité physique (structurelle) de l'infrastructure routière, vulnérabilité fonctionnelle du réseau routier, vulnérabilité territoriale liée aux pertes d'accessibilité routière de différents types d'enjeux vitaux mis en relation par ces réseaux routiers (populations, activités économiques, centres de secours...).

Une première étape de notre travail a consisté à mesurer la fréquence, la gravité et le coût des dommages directs imputables aux *debris flows* (laves torrentielles) sur le réseau routier de trois départements français (Alpes-de-Haute-Provence, Hautes-Alpes, Savoie) depuis 1950. L'identification des tronçons les plus vulnérables permet de reconstituer par une approche statistique les coûts des dommages directs. Elle offre également la possibilité de construire des indicateurs de risque de dysfonctionnement de chaque tronçon qui intègrent les fréquences de coupure et les valeurs fonctionnelles des tronçons. A ce titre, plusieurs indicateurs de valeur fonctionnelle (ou stratégique) des tronçons ont été explorés. Enfin, l'identification de ces tronçons vulnérables permet de justifier plusieurs scénarios de dégradation de l'accessibilité routière et d'évaluation de ses conséquences, notamment territoriales.

Ainsi, plusieurs scénarios de coupure d'accès ont été modélisés, à différentes échelles spatiales et sur base SIG, en s'appuyant sur la théorie des graphes pour le calcul automatique des temps et distances d'accès par les plus courts chemins :

- Des scénarios explicatifs/reproductifs d'échelle régionale visant à modéliser les pertes de temps d'accès vers 57 sites touristiques et plusieurs communes (sur 3 départements). La dégradation de l'accessibilité territoriale y a été exprimée en nombre de journées-skieur, en effectif de population communale, et en surface territoriale atteintes en fonction du temps de trajet depuis 14 agglomérations régionales (**Partie 1 du rapport – approche régionale**).
- Des scénarios reproductifs et prédictifs d'échelle locale visant à modéliser les pertes de temps d'accès des secours vers plusieurs sites à risque torrentiel élevé (vallée de l'Ubaye, Alpes-de-Haute-Provence). Ces sites ont fait l'objet au préalable d'un diagnostic de risque intégré sur près de 300 bâtiments et 25 ponts. La dégradation de l'accessibilité des secours y a été exprimée en rallongement des temps de parcours depuis le centre de secours principal de Barcelonnette (**Partie 2 du rapport – approche locale**).

Partie 1

Approche régionale

Vulnérabilités des réseaux routiers et dégradation de l'accessibilité territoriale

—

Alpes-de-Haute-Provence
Hautes-Alpes
Savoie

A VULNERABILITES DES RESEAUX ROUTIERS ET *DEBRIS FLOWS* : ASPECTS GENERAUX

A.1 DIFFERENTES APPROCHES DE LA VULNERABILITE DES RESEAUX ROUTIERS

La vulnérabilité des réseaux routiers peut être analysée *a posteriori* ou *a priori*, sous plusieurs de ses formes (Leone et Vinet, 2008) : vulnérabilité physique (matérielle) de l'infrastructure routière, vulnérabilité fonctionnelle du réseau routier, vulnérabilité territoriale liée aux pertes d'accessibilité routière de différents types d'enjeux vitaux mis en relation par ces réseaux routiers (populations, activités économiques, centres de secours...).

Les réseaux routiers ont une répartition spatiale spécifique : objets linéaires immobiles, ils sont le support d'échanges entre différents lieux. Cette implantation linéaire les expose particulièrement aux aléas naturels. C'est dans cette dimension spatiale que les géographes des risques se sont en premier lieu intéressés à ces enjeux. Les premiers travaux se sont surtout penchés sur la connaissance des aléas affectant des routes ainsi que sur leurs impacts directs (répartition, types de dommages et coûts résultants sur l'infrastructure routière) (Leone, 1996). Une identification des phénomènes permet de déterminer les causes possibles des fermetures et d'anticiper ainsi les interruptions à partir de l'identification des tronçons les plus vulnérables (Dalziell et Nicholson, 2001).

Les recherches sur la vulnérabilité fonctionnelle des réseaux de transport sont plus récentes. Elles ont surtout été initiées par les spécialistes des transports qui se sont intéressés au problème en recourant en particulier à la théorie des graphes mais sans pour autant intégrer les risques naturels. Il s'agissait surtout de déterminer les conséquences d'une dégradation de la circulation liées à un incident, qu'importe son origine. Ces études ont souvent pour objectif d'estimer financièrement le coût de la perturbation induite sur le réseau. Elles se sont surtout appuyées sur deux notions : l'accessibilité et la fiabilité. Il apparaît que c'est le terme d'accessibilité qui correspond le mieux à la compréhension de la vulnérabilité fonctionnelle des réseaux. Ainsi Taylor (*in* Appert et Chapelon, 2006) considère que la vulnérabilité est relative aux conséquences du blocage. Berdica (2002) va dans ce sens en estimant que la vulnérabilité d'un système est considérée comme un problème d'accessibilité réduite.

Depuis quelques années il apparaît dans les différents axes de recherches une prise en compte des conséquences induites sur les sociétés humaines. Gleyze (2005) note un lien entre la dépendance croissante des populations vis-à-vis des réseaux et l'augmentation de la vulnérabilité de ces mêmes réseaux. Les scientifiques cherchent à considérer l'accessibilité territoriale à travers l'étude de la vulnérabilité des réseaux. « La capacité qu'ont les individus de se déplacer est fondamentale pour tout territoire, tant au niveau de sa structuration, que de sa dynamique et de son évolution. Les mobilités quotidiennes témoignent de l'organisation des sociétés et des pratiques sociales prenant place à différentes échelles. Elles reflètent aussi le déroulement de l'ensemble des activités en œuvre sur un territoire » (Demoraes, 2009). Dans leurs études sur l'accessibilité territoriale Demoraes et D'Ercole (2009) prennent en considération les conséquences d'une perte de l'accessibilité d'un territoire suite à un phénomène naturel. Il s'agit avant tout de mettre en évidence toutes les séquelles sur le territoire que peut avoir un enclavement ou tout du moins une perte notable de l'accès à certaines zones vitales. On peut aussi noter les travaux de Chang (2002) sur la résilience des réseaux de transports suite à des catastrophes naturelles. Cet auteur a particulièrement étudié les conséquences des séismes sur les infrastructures routières, en tentant notamment d'établir une hiérarchie des tronçons routiers à rétablir en considérant les

temps de remise en état et du nombre d'habitants concernés par une dégradation de l'accès à leurs lieux de vie.

Aujourd'hui l'étude de la vulnérabilité des réseaux doit se nourrir de ces différentes approches. Il est nécessaire de prendre en compte l'aléa et ses processus d'endommagement tout en analysant la chaîne de conséquences qui en découle. Gleyze (2005) fait état de la nécessité d'associer l'identification des phénomènes naturels à l'analyse de la vulnérabilité des réseaux. Selon Berdica (2002), il est important de comprendre les propensions des réseaux routiers à mal fonctionner mais aussi de considérer au mieux les multiples préjudices induits. Toutes ces conséquences dépendent des caractéristiques du réseau ainsi que du type de phénomène ayant porté atteinte à son bon fonctionnement. Dans ces conditions il est essentiel d'avoir une approche unique pour chaque évènement, en établissant alors différents scénarios.

A.2 LES DEBRIS FLOWS

Tous les aléas naturels sont potentiellement dommageables pour les réseaux routiers. Les exemples de portions de routes affectées par un phénomène naturel ne manquent pas. On peut citer entre autre les chutes de neige de grande ampleur en France qui ont fortement perturbé le trafic routier en 2010. En 2002, des inondations dans le Gard ont paralysé 75% du réseau routier. Parmi les phénomènes présents dans notre zone d'étude, les mouvements de terrain sont les plus fréquents et les plus dommageables, en particulier les *debris flows et autres laves torrentielles*.

Debris flow est un terme anglo-saxon qui regroupe un certain nombre de phénomènes de mouvements de terrain rapides et brutaux avec une propagation à l'état remanié. Les classifications des *debris flow* au sein des mouvements de terrain sont nombreuses et peuvent varier en fonction du choix des critères. L'une des plus connue et à l'origine de nombreuses classifications postérieures est celle de Varnes (1978) (**tableau A1**).

Type of movement			Type of material		
			Bedrock	Engineering soils	
				Coarse	Fine
Falls			Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples			Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slides	Rotational	Few units	Rock slump	Debris slump	Earth slump
	Translational		Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
			Many units	Rock slide	Debris slide
Lateral spreads			Rock spread	Debris spread	Earth spread
Flows			Rock flow (deep creep)	Debris flow	Earthflow
Complex			combination of two or more principal types of movement		
			(soil creep)		

Tableau A1 - Classification des mouvements de terrain selon le type de mouvement et le type de matériau concerné (Varnes, 1978 in Remaître, 2006)

Dans certains cas, la frontière avec d'autres phénomènes reste floue. C'est notamment le cas pour la base de données des services RTM (04, 05, 73) où quelques évènements sont confondus avec des crues torrentielles. Il faut cependant bien différencier les *debris flows* des écoulements fluviaux en raison de la charge solide transportée (Remaître, 2006) (**figure A1**).

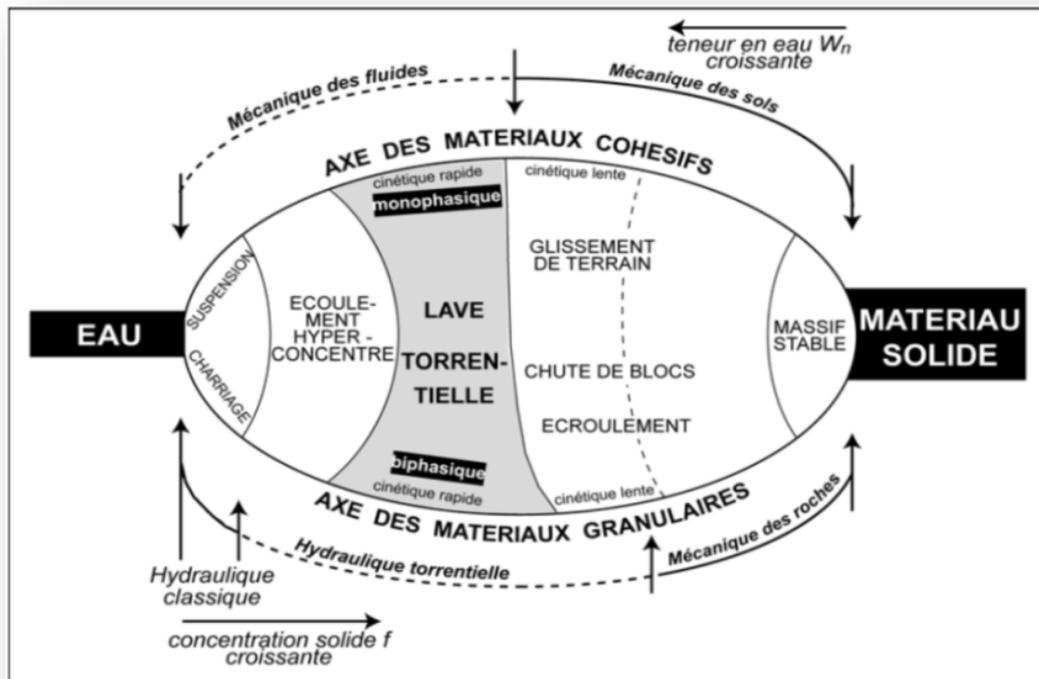


Figure A1 - Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau (Meunier, 1991 in Remaître, 2006).

Ces phénomènes de *debris flows* sont aussi appelés « laves torrentielles » en région alpine. Il s'agit de « phénomènes d'écoulement particuliers typiques des régions montagneuses où les bassins torrentiels présentent de fortes pentes. Ils se forment par enrichissement subit et considérable du débit d'un torrent en matériaux solides qui accroissent très fortement son pouvoir érosif (figure A2). L'enrichissement initial en matériaux solides du cours d'eau peut être dû : à une série d'arrachements des berges provoqués par une crue du cours d'eau ; à un ruissellement généralisé du bassin versant amenant une forte charge solide constituée essentiellement de limons, suite à de fortes pluies ; ou bien à la vidange subite d'un lac glaciaire ou d'une poche d'eau sous-glaciaire (cas de la catastrophe de Saint-Gervais, en 1892, dans le département français de la Haute-Savoie). Le processus ainsi amorcé s'amplifie selon une réaction en chaîne par arrachement de matériaux sur les berges du torrent, provoquant de nouveaux glissements avec obstructions successives et phénomènes d'embâcle-débâcle, puis affouillement et déstabilisation accrue des berges. Le processus ne prend fin que par tarissement des apports d'eau. Il peut cependant diminuer d'intensité quand le lit du torrent atteint le fond rocheux en place. Cependant, les seules précipitations ne suffisent pas à entraîner un déclenchement : en effet les *debris flows* supposent aussi l'existence d'une quantité de matériaux mobilisables suffisante pour que la masse imbibée puisse commencer à fluer. Si la masse critique n'est pas atteinte, de violentes précipitations entraîneront un écoulement torrentiel "simple" aux conséquences très différentes (inondations). Les *debris flows* sont, pour cette raison, caractérisés par un temps de retour lui-même lié à la vitesse d'érosion dans le bassin versant (Pech & Jomelli, 2001 ; Jomelli et al., 2003).

Par rapport aux autres coulées, ces laves torrentielles se distinguent morphodynamiquement par le transport de blocs pouvant atteindre de très grosses tailles (jusqu'à 200 m³ pour celle de Saint-Gervais, en 1892), par une concentration solide élevée (80 à 90 % du volume), des vitesses fortes (1 à 10 m/s), des débits élevés et des volumes considérables : par exemple jusqu'à 3 millions de m³ pour la lave torrentielle de Pontamafrey (Savoie, France) en 1965

(Goguel, 1968 in Sauret, 1987), ou bien 300 000 m³, dont un tiers déversé en 24 heures pour celle du torrent de la Ravoire près de Bourg-Saint-Maurice (Savoie, France) en 1981 (Flageollet, 1989).



Figure A2 - Morphologie et entités fonctionnelles d'une lave torrentielle (Remaître, 2006)

Les phénomènes de *debris flows* sont donc fréquents en milieu montagnard. Pour les départements des Hautes-Alpes, des Alpes-de-Haute-Provence et de Savoie, on a recensé entre 1950 et 2009 **999** évènements à *debris flows* dont 298 avec un impact décrit sur le réseau routier (30%) (Sources RTM, BRGM, CG05). Si la plupart du temps les phénomènes de *debris flows* ont de faibles impacts on en compte néanmoins un certain nombre aux conséquences particulièrement dommageables voire catastrophiques.

A.3 MODALITES D'ENDOMMAGEMENT DIRECT ET INDIRECT DES RESEAUX ROUTIERS

Un phénomène donné peut affecter de plusieurs façons les enjeux soumis à son influence. Il existe différentes façons de hiérarchiser les effets des *debris flows*. Leurs conséquences peuvent directes ou indirectes, s'exercer dans la zone d'aléa ou au-delà par le jeu d'interactions en chaîne, agir sur l'instant, ou à des échéances plus longues (moyen, long terme). Les **dommages physiques** s'appliquent aux infrastructures, ici de communication et de transport routier. Les **dommages fonctionnels** décrivent les perturbations engendrées sur les communications et services assurés habituellement par ce réseau. Certains coûts associés à ces conséquences peuvent être mis en évidence : **coûts directs** de réparation, de remplacement, de mise en sécurité, de contournement ; **coûts indirects** dus au rallongement de trajet, à la limitation de gabarit ou au ralentissement imposé, voir ceux induits par l'enclavement total d'une portion du territoire, c'est-à-dire liés à une **dégradation de l'accessibilité**.

A.3.1 LES DOMMAGES PHYSIQUES (OU STRUCTURELS)

Une infrastructure routière est une composante d'un système qui constitue une condition de possibilité préalable au fonctionnement de ce système (Levy et Lussault, 2003). Elle est composée de différents éléments :

- d'une ou de plusieurs chaussée(s) de largeurs variables,
- d'« à-côtés » (bande d'arrêt d'urgence, bas côtés),
- de ponts sur lesquels reposent les plates formes routières,
- d'installations annexes (barrières, rambardes, panneaux de circulations).

Suivant son mécanisme d'action (processus d'endommagement), sa magnitude (volume, vitesse, champ des déformations), sa durée et surface d'interaction avec l'infrastructure, un phénomène de type *debris flow* va provoquer des dommages variables en intensité et en nature. Leone (1996) décrit 4 familles de processus d'endommagement liés aux mouvements de terrain. Ils s'appliquent potentiellement tous aux *debris flows*, en rendant ces phénomènes particulièrement dommageables :

- des déplacements et déformations associées ;
- des pressions, résultat d'un impact ou d'une poussée latérale ;
- des accumulations, résultat d'une propagation ;
- des ablations (ou affouillement), résultat d'une érosion.

L'intensité des dommages va également varier suivant la nature (forme, longueur, résistance) de l'infrastructure routière. En se basant sur un retour d'expérience très détaillé mené après les intempéries de janvier 1994 dans la région du Diois (Drôme) (Leone, 1996), nous avons pu établir une échelle d'intensité des dommages physiques du réseau routier comportant 4 classes de gravité croissante affectées chacune d'un coût moyen de réparation et du type de dysfonctionnement le plus fréquemment induit. Ces coûts ont été réactualisés en euros 2011 dans le **tableau A2**.

Typologie des dommages physiques	Coût moyen des réparations (euros, 2011)
Dégradation de la chaussée	4200 euros
Affaissement de la plateforme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m ³)	9200 euros
Obstruction de la chaussée de volume élevé (centaine de m ³)	19300 euros
Rupture de la plateforme	27 500 euros

Tableau A2 - Typologie des dommages physiques maximaux d'un réseau routier et coûts moyens associés (réactualisé d'après Leone, 1996)

Dans le cadre du projet Scampeï, un léger affinage de cette typologie des dommages physiques (DPmax) routiers a été effectué de manière à intégrer un maximum d'évènements dommageables répertoriés dans les bases de données des services RTM, du BRGM et du Conseil Général des Hautes-Alpes (Direction des Infrastructures) (tableau A3). Elle fait apparaître 6 classes de dommages physiques d'intensité maximale croissante (DP à D5), plus deux classes sans distinction possible des dommages (SD et D). En effet, plusieurs évènements ayant affecté le réseau routier ne sont pas suffisamment décrits dans les bases mais méritent d'être retenus malgré tout. Par ailleurs, certains évènements concernent des dégradations de ponts (rambarde de sécurité, tablier ou piliers) ayant conduit à une fermeture de route à titre préventif (classe DP).

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

Tableau A3 – Typologie des dommages physiques (DP) du réseau routier (adaptée de Leone, 1996)

Dans le cas des laves torrentielles et autres *debris flows*, le type de dommage dominant correspond à de l'obstruction de chaussée. Ce type représente 43% des évènements dommageables recensés entre 1950 et 2009 sur nos trois départements alpins (figure A3). Les débordements surviennent en général au niveau des ouvrages de franchissement des torrents (gués, ponts), de surcroît lorsqu'ils sont sous-dimensionnés pour accepter les volumes en transit.

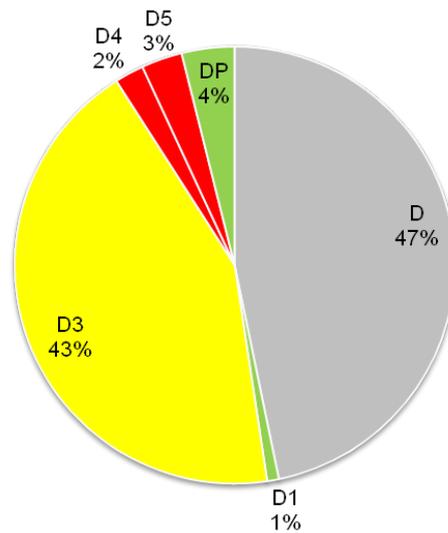


Figure A3 - Répartition des événements par type d'endommagement physique du réseau routier (départements 04, 05, 73, période 1950-2009)

La durée de coupure du réseau est logiquement fonction du volume déposé sur la chaussée et des capacités de déblaiement. Dans notre zone d'étude des volumes de 20 à 10 000 m³, des épaisseurs de dépôts pouvant aller jusqu'à 5 mètres et des longueurs de chaussée obstruées de 10 à 400 m linéaires ont été recensés dans les bases de données précédemment citées. Le **tableau A4** résume les principales gammes de valeurs disponibles depuis 59 ans d'observations sur les trois départements (04, 05, 73).

	Volume (m ³)	Epaisseur (m)	Longueur (m)
Minimum	20	0.20	10
Maximum	10000	5	400
Moyenne	1026	0,80	102

Tableau A4 - Volumes, épaisseurs et longueurs (critères de magnitude) des dépôts de *debris flows* sur les chaussées alpines (départements 04, 05, 73, période 1950-2009) (sur 68 événements renseignés)



Figure A4 - Exemple d'obstruction de chaussée par une lave torrentielle. Torrent du Rif Blanc, Hautes-Alpes (capture d'écran de Google Street View, 2010)

A.3.2 LES PERTURBATIONS FONCTIONNELLES

En qualifiant le réseau routier de support de flux, on considère que sa fonction principale est sa capacité à permettre une circulation routière. C'est donc cette fonction qui équivaut à un enjeu. Ces perturbations fonctionnelles sont considérées comme une forme d'endommagement indirect ou induit. Toujours en se basant sur les travaux menés après les événements du Diois de 1994 (Leone, 1996), nous avons établi une typologie des perturbations fonctionnelles maximales (P_{fmax}) permettant de différencier et de localiser les événements survenus depuis 1950 sur nos trois départements alpins (**tableau A5**). Cette typologie comporte 5 classes de dysfonctionnement routier dont la gravité est principalement fonction de la durée de l'interruption du trafic (heures, jours, semaines, mois, années). Notons que sur les trois départements, 48% des événements dommageables ne comportent pas d'informations sur le type de perturbation.

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)

Tableau A5 - Typologie des perturbations fonctionnelles (PF) du réseau routier (adaptée de Leone, 1996)

Sur notre zone d'étude, on constate qu'au moins 30% des événements ayant affecté le réseau routier ont entraîné une interruption du trafic routier supérieure à quelques heures, voire plusieurs jours (**figure A5**). Cela est à mettre en relation avec le type de dommage physique rencontré principalement, en l'occurrence les obstructions de chaussée, mais également avec certaines difficultés d'acheminement des engins de déblaiement dans des zones le plus souvent mal équipées ou mal desservies.

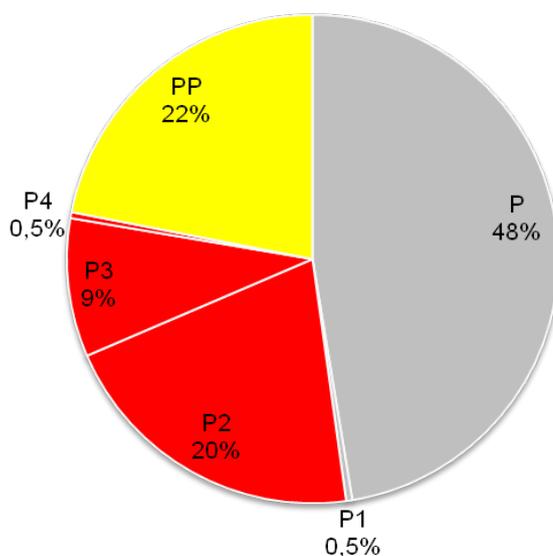


Figure A5 - Répartition des événements par type de perturbation fonctionnelle du réseau routier (départements 04, 05, 73, période 1950-2009) (sur 103 événements renseignés)



**Figure A6 - Exemple de perturbation fonctionnelle (ralentissement) liée au remplacement d'un pont endommagé avec itinéraire de contournement suite à une lave torrentielle (07/2009).
Torrent de l'Abéous, vallée de l'Ubaye (photo F. Leone, 02/06/2010)**

Une recherche de corrélation statistique entre dommages physiques et perturbations fonctionnelles a été tentée sur les événements bien décrits. Elle n'a pas donné de résultats satisfaisants. On peut néanmoins établir qualitativement cette relation par le biais du tableau A6. Cela suppose des moyens d'intervention et de déblaiement comparables au cours du temps et sur l'ensemble des zones géographiques concernées, autrement dit une vision très théorique, voire utopiste de la gestion de crise. On constate par ailleurs que la valeur fonctionnelle de la route (son importance stratégique par exemple) est un facteur influençant les moyens mobilisés pour rétablir son ouverture. Par conséquent, à des dommages physiques de même importance vont souvent correspondre des durées d'interruption très variables et difficiles à modéliser compte tenu des nombreuses variables, géographiques, décisionnelles, organisationnelles et souvent politiques qui entrent en jeu. Enfin, si l'on raisonne à l'échelle du tronçon routier, la durée d'interruption du trafic va également être conditionnée par le nombre de points de coupure par tronçon et pas seulement par l'intensité des dommages en un point donné.

RESEAU ROUTIER		DOMMAGES STRUCTURELS			
		D1	D2	D3	D4
PERTURBATIONS FONCTIONNELLES	P0				
	P1				
	P2				
	P3				
	P4				
	P5				

D1 : Dégradation de la chaussée
 D2 : Affaissement de la plateforme
 D3 : Obstruction de la chaussée
 D4 : Rupture de la plateforme

P0 : Aucune perturbation
 P1 : Limitation de gabarit
 P2 : Interruption momentanée du trafic (en heures)
 P3 : Interruption prolongée du trafic (en jours)
 P4 : Interruption durable à définitive du trafic (en semaines ou mois)

Probabilité nulle à très faible Probabilité faible à moyenne Probabilité forte à très forte

Tableau A6 - Corrélation théorique entre intensité des dommages physiques et perturbations fonctionnelles sur un réseau routier (modifié d'après Leone, 1996).

A.3.3 PREJUDICES ECONOMIQUES

La dégradation de l'infrastructure routière par un phénomène naturel de type *debris flows* entraîne une multitude de coûts (**figure A7**). Ces coûts ne sont pas forcément régis par la même logique. Ils découlent de l'intensité du phénomène, de la structure du réseau, de sa valeur et son état fonctionnel.

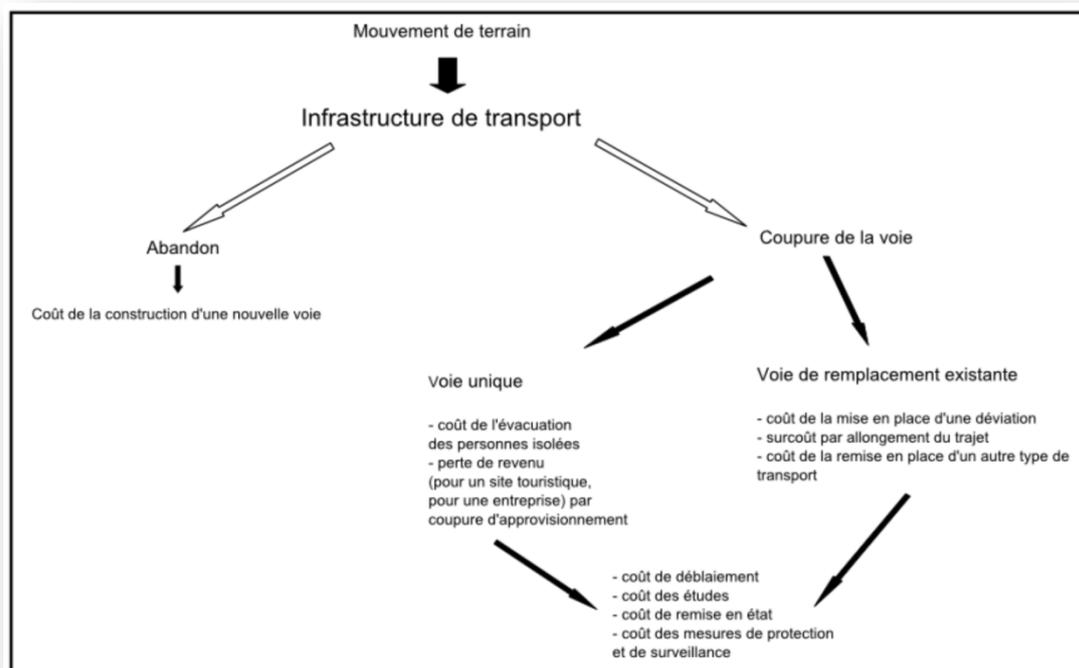


Figure A7 - Types de préjudices économiques directs et indirects (coûts) associés à l'endommagement d'une infrastructure de transport (modifié d'après Ledoux 1989)

A.3.3.1 Les coûts directs

Le coût direct d'un événement dommageable est modulé par l'intensité des dégâts et la valeur de l'infrastructure touchée. Cette valeur, matérielle du moins, dépend du nombre de voies, de chaussées, du type de revêtements, etc. Sa valeur d'usage est quant à elle beaucoup plus difficile à évaluer d'un point de vue économique. Pour tout dommage physique sur une infrastructure routière on peut différencier les coûts de déblaiement (suite à l'obstruction de la chaussée par des matériaux) et les coûts de remise en état (suite à la dégradation ou la destruction de la chaussée). Les coûts de déblaiement peuvent être estimés sur devis. En cas de destruction totale de la chaussée, on peut évaluer son coût de remplacement à partir de divers projets de construction dont une estimation est présentée dans le **tableau A7**.

Type de voie	Coût du mètre linéaire (en €)
Bretelle d'accès aux autoroutes et voies rapides	1750
Voie autoroutière	10500
Voie rapide	7000
Route nationale	7000
Chemin départemental	3500
Voie secondaire importante	3500
Boulevard (urbain)	3500
Avenue (urbaine)	3500
Rue (urbaine)	1750
Impasse	1750
Quai	3500

Tableau A5- Coût de construction d'infrastructures routières par mètre linéaire
(Glatron, 1997 in Gleyze, 2005)

L'OFROU (2009) (l'organisme fédéral suisse de gestion des routes) considère que le coût moyen d'un phénomène de type *debris flow* sur un objet linéaire revient à 20% de la valeur d'origine du mètre linéaire pour un phénomène d'intensité moyenne et à 30% pour un phénomène d'intensité forte. Par ailleurs, notre étude sur le Diois (**tableau A2**) nous a appris que les coûts moyens des dommages routiers imputables à des phénomènes de mouvements de terrain variaient dans une fourchette comprise entre 4,2 et 27,5 kilo-euros par évènement en fonction de l'intensité des dommages constatés.

Une tentative d'évaluation du coût moyen annuel et direct des *debris flows* sur les trois départements alpins étudiés est proposée. Faute de bilans économiques au sein des bases de données exploitées, nous avons privilégié une approche statistique dont les résultats sont présentés dans le **tableau A8** ci-dessous.

	Intensités de dommages physiques						Coût moyen estimé (en k€ 2011)	
	D	D1	D3	D4	D5	DP	Annuel	1950-2009
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

Tableau A8 – Estimation des coûts moyens directs des *debris flows* sur les routes des trois départements alpins étudiés. Approche statistique.

Les coûts moyens de chaque niveau d'endommagement physique issu de notre typologie (**tableau A3**) sont extraits, en partie, de l'étude menée en 1994 sur le Diois (Leone, 1996) et réactualisés en euros 2011 (**tableau A2**). Ils ont été complétés par des estimations. Ainsi, les coûts moyens des dommages de niveaux D1 et D4 (D2 n'est pas représenté sur notre zone) sont ceux obtenus pour le Diois (dégradation de la chaussée et destruction de la plateforme sans rupture de pont). Ceux du niveau D3 correspondent à une moyenne des coûts d'obstruction de chaussée également obtenus pour le Diois. Pour le niveau indifférencié D (dommage mais sans précision) nous avons appliqué le coût du dommage le plus fréquent, à savoir celui du niveau D3. Pour le niveau D5 correspondant à une destruction de pont, nous sommes basés sur deux études du Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (Sétra 1996 et 2008) pour établir le coût moyen de remplacement d'un pont. Ces deux études statistiques portent respectivement sur des ponts routiers français de

type courant terminés en 1996 (268 ponts) et 2006 (130 ponts). Les coûts moyens ont été actualisés en euros 2011 TTC. Il en ressort que le prix moyen d'un pont courant est de 705 300 euros TTC, sans différenciation des projets nouveaux ou de reconstruction. Ces mêmes études nous apprennent que sur les deux inventaires, la surface moyenne des ponts dits courants est de 317 m² et que le coût moyen du m² est de 2225 euros TTC. La principale difficulté a été d'apprécier le coût du niveau DP (endommagement du pont sans destruction), sachant que ce type de dommage peut à terme conduire ou non, au remplacement total du pont. Par conséquent, nous avons arbitrairement fixé ce montant à 50% de la valeur de remplacement du pont.

Nous avons ensuite multiplié chaque coût moyen par la fréquence annuelle du niveau de dommage correspondant établie sur la période 1950-2009 à partir des différentes bases de données exploitées pour reconstituer les impacts routiers des *debris flows*. Ces fréquences s'étendent de 0 à 0,97. La valeur maximale est obtenue pour le niveau D sur le département de la Savoie. Le résultat final nous donne une estimation statistique du coût moyen annuel des impacts de *debris flows* sur les réseaux routiers des trois départements qui est de 190 900 euros, ce qui cumulé sur 59 ans représente un cout global direct pour la collectivité proche de **11,3 millions d'euros**. C'est le département des Hautes-Alpes qui enregistre les coûts les plus élevés, suivi de près par la Savoie et de très loin par les Alpes-de-Haute-Provence. Il ne s'agit que d'ordres de grandeur purement indicatifs qui reposent sur une méthode entachée d'incertitudes mais susceptible d'être améliorée.

A.3.3.2 Les coûts indirects

En complément de ces coûts directs liés à l'endommagement des infrastructures, il est nécessaire de souligner l'importance des coûts indirects liés à l'altération du trafic routier. On peut identifier en premier lieu les coûts d'évacuation de personnes éventuellement isolées. Cependant, les coûts cumulés indirects les plus élevés sont sans doute imputables aux allongements de trajets suite à des déviations. Dans des zones où le réseau routier est peu développé, les distances, et donc les durées de déviation suite à la coupure d'un tronçon peuvent être importantes. Une augmentation de la distance de parcours implique obligatoirement une augmentation du coût du trajet. Dans leur étude sur l'impact des événements naturels sur le réseau routier néo-zélandais, Dalziell et Nicholson (2001) retiennent des valeurs de 0.20 euros/km (véhicule) et 0.20 euros/mn (conducteur) pour estimer ce coût supplémentaire. On comprend aisément le surcoût que peut entraîner une déviation de plusieurs kilomètres pendant plusieurs jours sur des centaines voire des milliers d'usagers. Dans cette même étude, les auteurs nous font part de simulations sur les surcoûts entraînés par les fermetures du trafic routier sur le réseau néo-zélandais à la suite d'évènements naturels dommageables : les évènements liés à la neige coûtent en moyenne chaque année 1 087 000 euros, ceux liés aux évènements sismiques 858 097 euros et ceux liés aux évènements volcaniques 114 413 euros.

De plus, la mise en place de trajets de déviation entraîne un report des flux routiers sur d'autres axes qui ne sont pas forcément adaptés, entraînant alors de nouvelles perturbations. On peut aussi aller plus loin en prenant en considérations les pertes économiques que peuvent connaître des entreprises, des sites, des zones qui subissent une défaillance du réseau routier. Par exemple une entreprise peut se retrouver pénalisée, soit par les difficultés

qu'ont ses employés et/ou ses clients de la rejoindre, ou bien par l'incapacité de desservir ses marchandises en temps et en heure.

Ainsi, au regard des préjudices provoqués par un phénomène naturel sur le réseau routier mais aussi sur les sociétés humaines bénéficiant de ce réseau, il apparaît nécessaire de prendre un compte une notion centrale et intermédiaire entre dommages physiques et préjudices territoriaux (conséquences économique, sociales, humaines): la notion d'accessibilité du territoire et sa problématique de dégradation en cas d'évènement naturel.

A.3.4 LES PERTES D'ACCESSIBILITE DU TERRITOIRE COMME PREJUDICE INDUIT

A.3.4.1 Etude de cas : la commune de Boulc (26), 1994

Nous avons eu l'occasion de mettre en évidence et d'analyser entre 1994 et 1996, l'ensemble des préjudices liés à une dégradation de l'accessibilité d'un territoire de moyenne montagne (Leone, 1996). Il s'agissait de la commune de Boulc (Drôme) dont la route d'accès principal avait été détruite par un glissement de versant de grande ampleur. La déviation mise en place imposait aux habitants du village un détour de 38 kilomètres. Cet isolement partiel a eu des répercussions psychologiques (fatigue, mal de vivre, perte d'appartenance à une communauté...), sociales (éloignement des centres de soins et de secours, difficultés à pouvoir pratiquer des activités culturelles, sportives...), économiques (baisse de la clientèle pour les entreprises de Boulc, difficultés d'approvisionnement...). Ces préjudices ont été également ressentis dans des communes avoisinantes dépendantes de la clientèle de Boulc pour leurs activités.

A.3.4.2 La notion d'accessibilité

Qu'est ce que l'accessibilité ?

Selon Bavoux et al. (2005), l'accessibilité d'un lieu est la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un (unipolaire) ou de plusieurs autres lieux (multipolaire), à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants.

Si les lieux sont importants en tant que point de départ et point d'arrivée, c'est avant tout leurs attributs qui importent. Les lieux associés à une forte population, à des offres de services, nécessitent une bonne accessibilité. Lorsque l'on étudie la vulnérabilité des réseaux routiers cette notion d'accessibilité est primordiale. En effet, le réseau a pour fonction première de permettre l'échange de flux (humain, matériel, immatériel) entre lieux. Ces échanges de flux sont vitaux pour la cohésion d'un territoire et ses relations avec les autres entités territoriales. Sans accessibilité, les moteurs économiques principaux d'une région comme les stations touristiques de sports d'hivers n'auraient pas la clientèle suffisante pour se maintenir. L'accessibilité permise par le réseau est donc un enjeu capital de la dynamique territoriale et du développement.

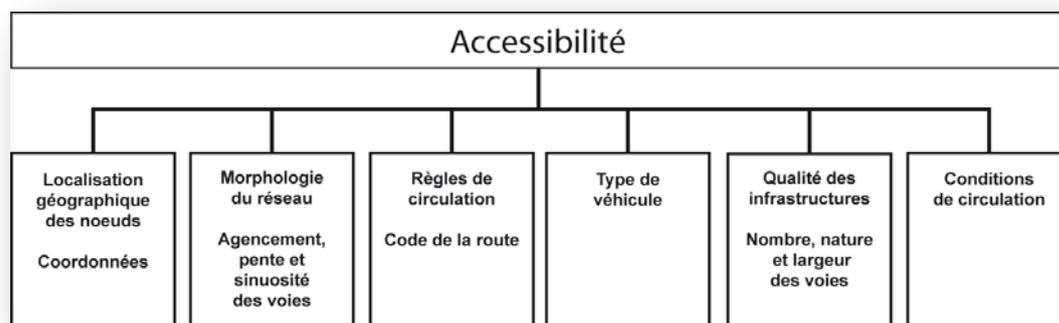


Figure A8 - Les composantes de l'accessibilité routière

Les recherches sur l'évaluation de la performance des réseaux de transport ont permis d'identifier plusieurs composantes susceptibles d'influencer les niveaux d'accessibilité (Chapelon, 2006 ; Appert et Chapelon, 2003). Il s'agit notamment de composantes liées à la morphologie du réseau (agencement, pente et sinuosité des voies) et à sa qualité (nature des voies) (**figure A8**).

La mesure de l'accessibilité

Le plus souvent, cette accessibilité est mesurée en fonction de la distance. Si la distance augmente pour aller d'un point A à un point B, l'accessibilité diminue. Cependant, face aux différences de vitesses permises par les différents types de route mais aussi en fonction des différences de véhicules, l'accessibilité peut être exprimée dans la même logique que précédemment mais en prenant en compte la durée du trajet ou le coût du trajet. Le meilleur temps de parcours est couramment utilisé comme indicateur de synthèse dans les études d'accessibilité. 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. La matrice résultante est ensuite exploitée et analysée (Bavoux et al., 2009).

L'approche multipolaire présente l'avantage de fournir des résultats synthétiques agrégés spatialement. Elle implique de définir avec précision les lieux d'origine ou de destination des déplacements car les résultats dépendent de leur densité. Dans de nombreuses applications, l'important n'est pas tant l'accessibilité à l'ensemble des nœuds du réseau que l'accessibilité à un service donné.

En complément, il est également possible d'extraire la surface du territoire ou la quantité de population, de richesse, d'emplois, de clients accessibles en un temps donné à partir de chacun des lieux ou de l'ensemble des lieux les plus proches (Bavoux et al., 2009). La restitution s'opère notamment sous la forme de courbes avec en abscisse le temps de parcours et en ordonnée la surface ou la quantité accessible correspondante (en valeur absolue ou en pourcentage du total). Il est ainsi possible de confronter sur un même graphique différents scénarios d'accessibilité, par exemple à l'état normal ou en situation de réseau dégradé. C'est cette approche qui sera illustrée plus loin dans cette étude pour différents scénarios de coupure de routes par des phénomènes de *debris flows*.

La dégradation de l'accessibilité

En situation normale, un réseau (non altéré) n'a pas une accessibilité homogène ni totale. Certains lieux bénéficient d'une meilleure accessibilité que d'autres, même à l'état normal. Dans le cas où le réseau subit une dégradation, on peut assister à une altération de l'accessibilité se traduisant par une augmentation de la difficulté pour atteindre un autre lieu. Cette dégradation a pour origine une perturbation dans l'écoulement du trafic routier. L'origine des perturbations est multiple : accidents de la route, manifestation sur la chaussée, ou comme dans le cas de notre étude, des impacts de phénomènes naturels. C'est donc indirectement qu'un évènement de type *debris flow* engendre une dégradation de l'accessibilité routière.

Une dégradation de l'accessibilité est synonyme de perte de temps, de surcoûts, de trajet moins agréable pour les usagers de la route. Une perte totale de l'accessibilité peut quant à elle amener à l'enclavement d'un lieu. Cette forme d'isolement géographique est d'autant plus facilitée dans les Alpes que les vallées sont profondes, longues et étroites, et que les cols ne sont pas toujours ouverts.

B LES VULNERABILITES PHYSIQUES ET FONCTIONNELLES A POSTERIORI DU RESEAU ROUTIER ALPIN

B.1 ZONE D'ETUDE ET BASES DE DONNEES SIG CONSTITUEES

Une première phase de cette étude s'intéresse à la vulnérabilité physique et fonctionnelle du réseau routier de trois départements alpins de moyenne et haute montagne : Alpes-de-Haute-Provence (04), Hautes-Alpes (05), Savoie (73). La vulnérabilité y a été caractérisée d'un point de vue géographique et mesurée *a posteriori* au moyen d'indicateurs et d'indices agrégés sur les tronçons routiers exposés aux *debris flows*. Nous nous sommes focalisés sur les bassins versants actifs recensés par le LGP de Meudon et sur les tronçons routiers exposés qui les traversent.

La délimitation des principaux bassins versants actifs (285) a été fournie par l'équipe du LGP de Meudon (BD BV) avec une première extraction des évènements recensés depuis 1950 dans les bases des Services de Restauration en Montagne (BD RTM, *cf. encadré 1*) de l'Office National des Forêts (ONF). Cette base a ensuite été épurée, puis complétée et recoupée avec les bases du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, BDmvt, *cf. encadré 2*) et du Conseil Général des Hautes-Alpes (BD CG05, Direction des Infrastructures, *cf. encadré 3*). Nous en avons ensuite extrait tous les évènements signalant un impact physique ou fonctionnel sur le réseau routier entre 1950 et 2009. Mais au final, ce sont essentiellement les données RTM qui ont été intégrées dans nos bases de données (97,6%) (**figure B1**).

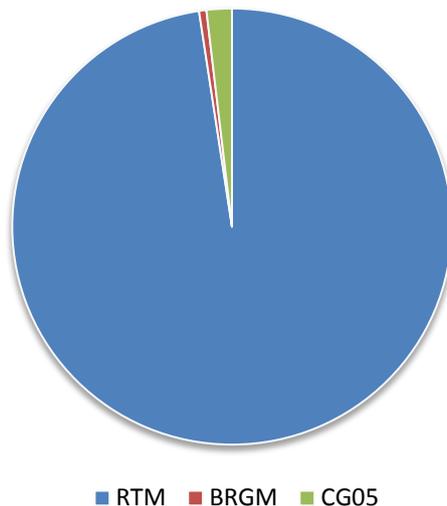


Figure B1 - Répartition des sources de la BD *Debris flows* : RTM (97,6%), BRGM (0,54%) et CG05 (1,86%)

Encadré 1 – Commentaires sur la BD RTM

Source : Service RTM (ONF) Période couverte : Juin 1950 – Aout 2009

La base de données RTM référence tous les événements naturels dommageables ayant affecté les départements 04, 05, 73. Ces événements bénéficient d'un certain nombre d'informations additionnelles permettant une bonne précision sur la connaissance du phénomène répertorié. Pour chaque événement ont été renseignés la date (et parfois l'heure), la commune, le cours d'eau concerné, la nature du phénomène, son mécanisme, ses causes, les zones de départ et d'arrivée. Parfois des informations complémentaires sur la localisation exacte ont été ajoutées. Cette BD indique aussi si des victimes, des dommages et des perturbations sont à signaler. Une description en est parfois donnée. Ex : « --DEGATS-- : route obstruée en 2 endroits -- PERTURBATIONS-- : circulation interrompue quelques heures ». Néanmoins cette BD n'a pas été établie pour fournir uniquement des informations sur les tronçons routiers touchés par de tels phénomènes. Dès lors on peut regretter l'absence d'une plus grande précision sur les routes concernées. Le N° administratif de la route est généralement (mais pas toujours) fourni sans pour autant préciser les coordonnées géographiques du tronçon.

Encadré 2 – Commentaires sur la BD Mvt

Source : BRGM Période couverte : 1950 – 1996

Cette base comporte tous les événements de type « coulée » recensés par le BRGM pour les départements 04, 05, 73. Si cette BD apporte un plus quantitatif, la précision des données est très moyenne : un certain nombre d'évènements n'ont pu être datés précisément. Il en est de même pour la géolocalisation de ces événements qui à défaut de précision est ramenée au centroïde des communes affectées.

Encadré 3 – Commentaires sur la BD CG05

Sources : BRGM, RTM, Alp'Géorisque, CG05 Période couverte : 1950 – Juillet 2008

Cette base de données provenant du Conseil Général des Hautes Alpes vient en complément de la BD RTM (d'où la nécessité d'opérer un tri afin d'éliminer les doublons). Dans cette base de données, sont retranscrits tous les événements (crue torrentielle et lave torrentielle) ayant nécessité l'intervention des services du conseil général du 05 dédiés à l'entretien des routes. La correspondance des N° de routes et des torrents concernés permet d'identifier avec plus ou moins de précision les tronçons concernés. De même que pour la BD RTM, les événements sont ici datés. Cependant on peut regretter l'absence de descriptif concernant les impacts et les conséquences sur le réseau routier. De plus, si le torrent concerné par l'événement est (pour la majorité des cas) notifié par son nom, nous avons parfois des événements non exploitables de par l'absence de localisation exacte (ce manque de précision quant à la localisation peut entraîner des doublons avec les autres BD utilisées, sans compter l'impossibilité d'associer avec certitude un tronçon routier).

Le réseau routier utilisé est issu de la base **Route500** de l'Institut Géographique National (IGN). Malgré l'absence des éléments les plus secondaires du réseau routier et des tracés parfois imprécis, cette base nationale présente l'avantage de fournir un graphe routier entièrement connecté et renseigné (vocation, ou type de la route en particulier). Les identifiants de chaque tronçon ont ainsi été affectés à chaque évènement dommageable. Chaque évènement dommageable a pu ainsi être rattaché manuellement au tronçon impacté au moyen de cartes topographiques et d'images aériennes (**figure B2 et encadré 4**).

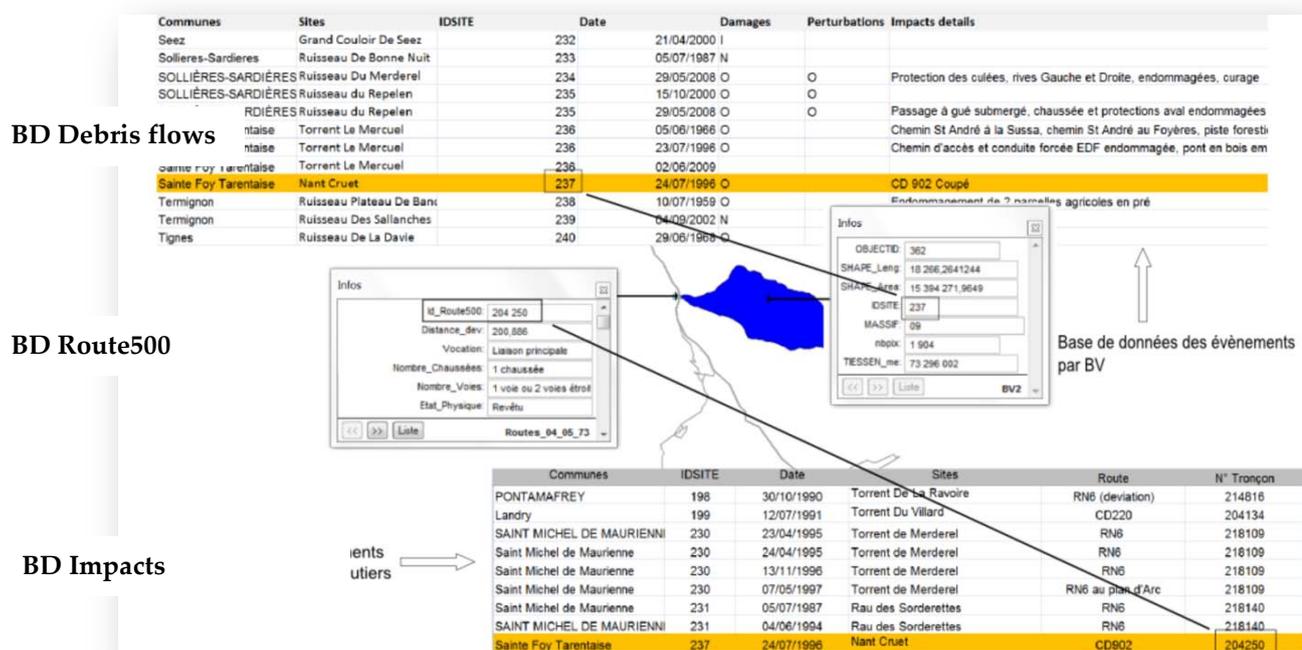


Figure B2 – Procédure de rattachement des tronçons routiers impactés à la base des évènements à *debris flows* par bassin versant (capture d'écran MapInfo)

Encadré 4 – Commentaires sur les difficultés rencontrés lors de l'établissement de la BD impacts

Carence dans les informations présentes dans les bases de données sur les évènements : Le principal problème pour l'identification des tronçons routiers affectés réside dans l'imprécision de certaines observations présentes dans les bases RTM, CG05, BRGM. En l'absence de données précises, il a été impossible de définir le tronçon routier de la base Route500 affecté. Nous pouvons prendre par exemple le cas de l'évènement ayant eu lieu à Bourg-Saint-Maurice le 24 Juillet 1996. La BD RTM signale une submersion du « pont de Vulmix » et d'une « circulation interrompue ». Or il apparaît suite aux témoignages, aux vidéos et aux archives sur l'évènement que le pont de la route nationale a dû lui aussi être fermé. C'est sans compter le recouvrement par la boue de toutes les rues voisines du torrent de l'Arbonne. L'obtention de données complémentaires peut nous permettre de retravailler notre base de données sur les tronçons impactés. Cela passe nécessairement par des enquêtes de terrain.

Plusieurs tronçons au sein d'un même cône de déjection :

Parfois, plusieurs tronçons routiers se trouvent dans le même cône de déjection. Pour éliminer les tronçons non concernés, nous avons tout d'abord regardé si les descriptions (n° administratif de la route, référence à un objet localisable, ...) de l'évènement fourni dans les bases de données nous permettaient de cibler le véritable tronçon affecté. Nous avons eu recours aux images aériennes du site Géoportail, à l'outil 3D de Google Earth, à l'outil « Street View » de Google Map et à des cartes topographiques pour visualiser la zone impactée. Dans les cas où plusieurs tronçons routiers ont été affectés par un même phénomène, l'évènement en question a été dédoublé dans la BD impacts.

flows depuis 1950 est celui de la Ravoire (commune de Pontamafrey-Montpascal, Savoie), avec 84 évènements répertoriés, dont 34 avec des conséquences décrites sur le réseau routier (le maximum) (**tableau B1**).

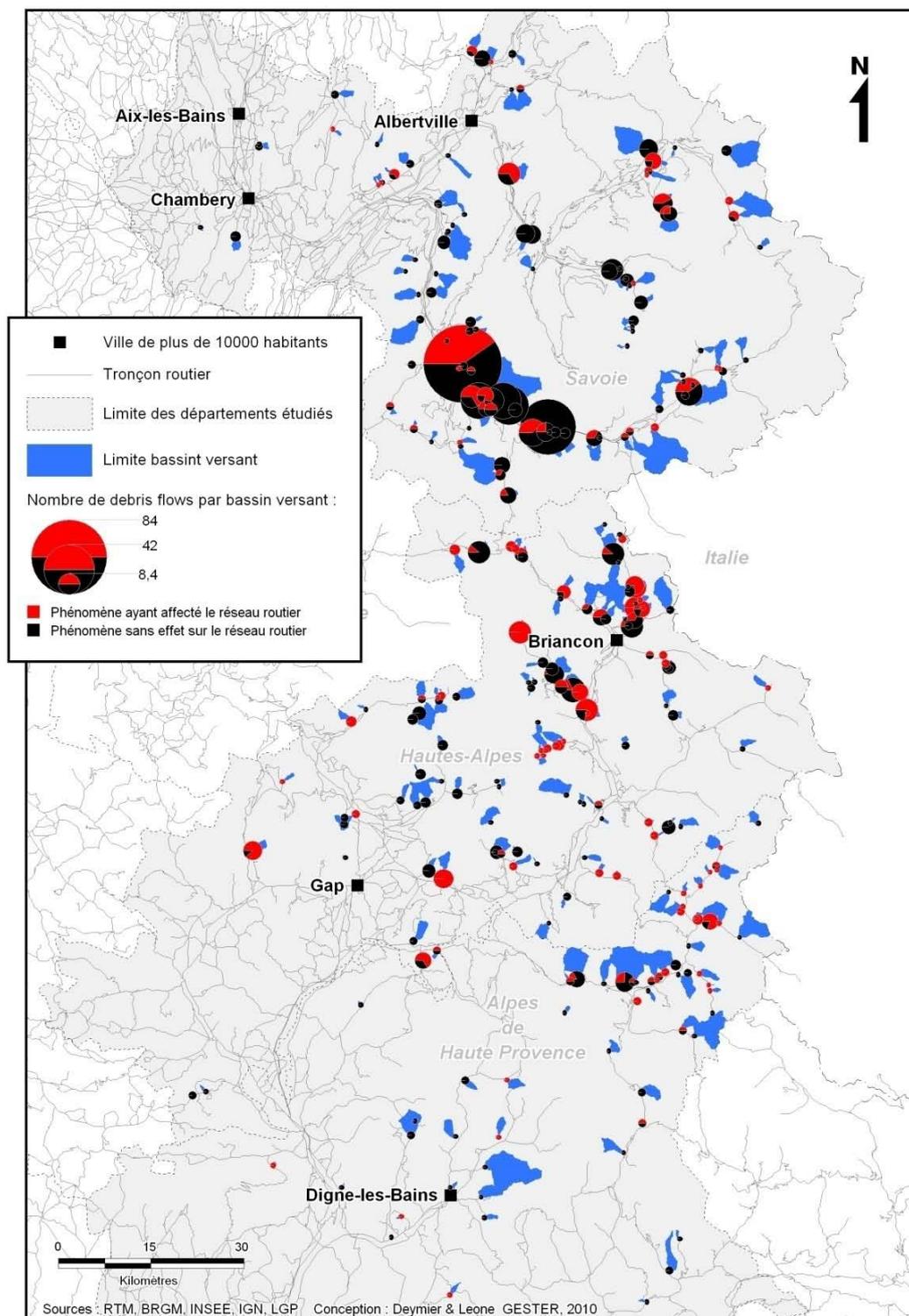


Figure B3 - Nombre d'évènements à *debris flows* par bassin (source BD *debris flows*) et part des évènements avec un impact sur le réseau routier (source BD impacts routes) (1950-2009, départements 04, 05, 73)

Idsite	Torrent	Debris flows	Impacts routes	Commune	Dpt
198	Torrent De La Ravoire	84	34	PONTAMAFREY-MONTPASCAL	73
188	Torrent Du Poucet	46	1	SAINT-MICHEL-DE-MAURIENNE	73
185	Torrent Du Rieu Sec	25	3	SAINT-MARTIN-DE-LA-PORTE	73
277	Ruisseau De Claret	22	0	SAINT-JULIEN-MONT-DENIS	73
197	Torrent Du Rieubel	21	1	VILLARGONDRAN	73
286	Torrent de Boscodon	16	2	CROTS	05
184	Torrent De L'Envers	15	6	SOLLIERES-SARDIERES	73
230	Torrent de Merderel	13	5	SAINT-MICHEL-DE-MAURIENNE	73
173	Torrent Du Rif Cros	11	2	LES VIGNEAUX	05
276	Ravin De Saint Julien	11	0	SAINT-JULIEN-MONT-DENIS	73

Tableau B1 - Top10 des torrents générateurs de *debris flows*
(source BD *debris flows* & BD RTM) (1950-2009, départements 04, 04, 73)

La base « **BD impacts routes** » comporte quant à elle **298 évènements** dommageables (30%). Les évènements ayant impacté plusieurs tronçons y ont été démultipliés. Au total, on recense **111 tronçons impactés** au moins une fois en un ou plusieurs endroits, dont 94 tronçons avec un impact physique décrit et 103 tronçons avec un impact fonctionnel décrit. Cette base comporte une typologie des dommages maximaux conforme aux classifications présentées plus haut (dommages physiques, Dpmax et perturbations fonctionnelles Pfmax). Cette différenciation a été réalisée à partir de l'interprétation des descriptions présentes des différentes bases de données intégrées. Ainsi, nous avons été en mesure d'agrèger le nombre d'évènements dommageables par tronçon routier de la base SIG Route500 avec différenciation du niveau d'endommagement, physique ou fonctionnel. Cela débouche sur une première famille d'indicateurs permettant de cartographier les tronçons les plus vulnérables depuis 1950. Il s'agit d'une évaluation *a posteriori* et empirique de la vulnérabilité, mesurée par l'endommagement constaté.

B.2 TEMPORALITES ET CARTOGRAPHIE DES VULNERABILITES PHYSIQUES ET FONCTIONNELLES

Cette partie repose sur le dépouillement statistique et cartographique des 298 évènements dommageables de la BD Impacts sur la période 1950-2009 pour les trois départements alpins considérés (04, 05, 73).

B.2.1 REPARTITION TEMPORELLE DES IMPACTS

Répartition mensuelle

Pour les trois départements ce sont les mois de juin, juillet et août qui ont enregistré le plus d'évènements dommageables sur le réseau routier (**figure B4**). D'un point de vue probabiliste, on peut ainsi minimiser l'influence des *debris flows* sur l'accès aux stations de ski en hiver, contrairement aux avalanches de neige. Il en va autrement en été, compte tenu de la forte fréquentation touristique de ces mêmes stations en juillet et août.

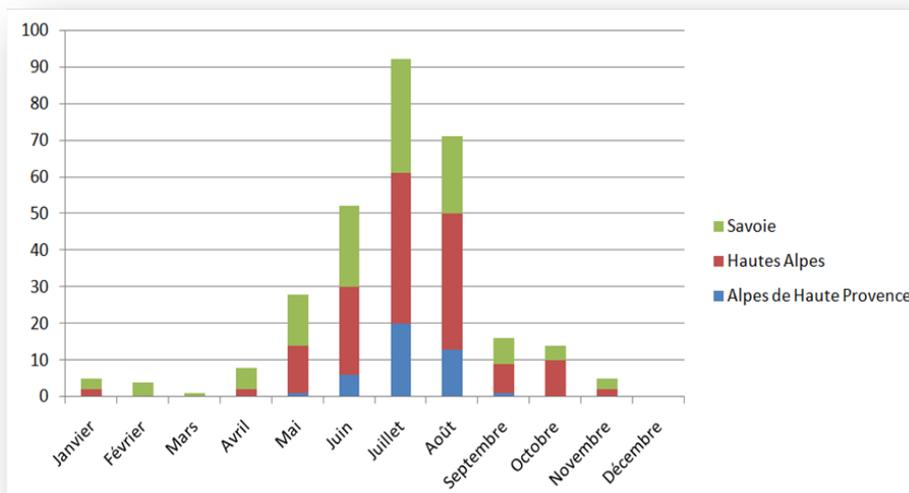


Figure B4 - Nombre total d'évènements ayant impacté le réseau routier par mois (source BD impacts, 1950-2009)

Répartition annuelle

L'année qui a connu le plus d'évènements sur le réseau routier est 1965, avec un record pour la Savoie (23 évènements sur un total 24). Mais on remarque depuis 1986 une tendance à l'augmentation du nombre d'années dépassant les cinq évènements dommageables par an (figure B5). Cela peut s'expliquer entre autre par un meilleur recensement des dommages.

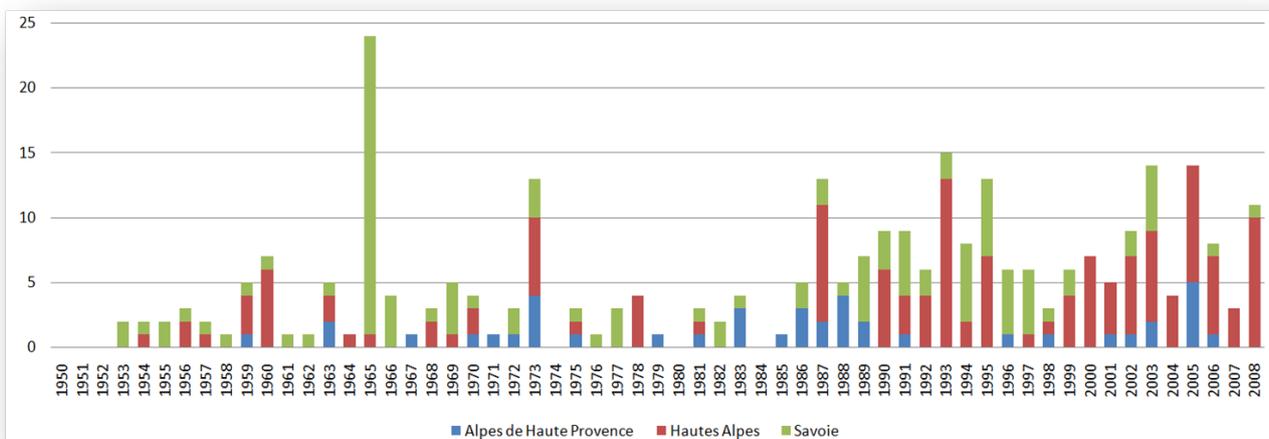


Figure B5 - Nombre total d'évènements ayant impacté le réseau routier par années (source BD impacts, 1950-2009)

Épisodes remarquables

Depuis 1950, on dénombre un certain nombre d'épisodes pluviométriques remarquables ayant provoqué plusieurs phénomènes de *debris flow* :

- 19-20-21-22 mai 1965 en Savoie,
- 3-4-5-6-7-8 juin 1965 en Savoie,

- 1-2-3-4-5-6-7 juillet 1965 en Savoie, plus précisément à Modane où la voie ferrée à été particulièrement endommagée. Des fermetures de route de plusieurs jours ont eu lieu.
- 5 mai 1973 dans les Hautes-Alpes,
- 11 août 1973 en Savoie,
- 15-16 août 1973 dans les Alpes-de-Haute-Provence,
- 4-5-6 juillet 1987 dans les Hautes-Alpes,
- 29 Juillet 1994 en Savoie,
- 24 juillet 1996 en Tarentaise (Savoie). Evènements particulièrement dommageables à Bourg-Saint Maurice et de Sainte-Foy-en-Tarentaise,
- 19-20-21 juin 2005 dans les Alpes-de-Haute-Provence et les Hautes-Alpes.

Des épisodes de cette intensité peuvent provoquer des perturbations du réseau routier de plusieurs jours et/ou sur plusieurs localités. De fait, l'accessibilité routière se trouve fortement dégradée par une perte de connectivité du réseau. C'est sur la base de tels évènements que nous avons établi nos scénarios.

B.2.2 DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE DES IMPACTS

La répartition départementale des évènements montre que les Hautes-Alpes ont été le plus impactées (48%), suivies de la Savoie et des Alpes de Hautes-Provence (**figure B6**). Cela n'est pas un reflet total de la réalité car ce département bénéficie de l'apport en évènements dommageables de la base de données du CG 05, sans équivalent pour les autres départements. Néanmoins, compte tenu du faible emprunt à cette base (1,86%), le biais introduit est à minimiser et la hiérarchie préservée. Cela n'exclut pas, comme dans toute base de données historique, d'autres biais ou carences liés à la collecte de l'information. C'est pour cette raison que nous avons fiabilisé nos données en ne retenant que les évènements postérieurs à 1950, encore bien inscrits dans la mémoire collective.

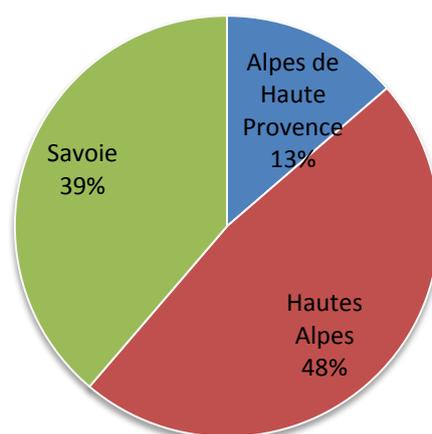
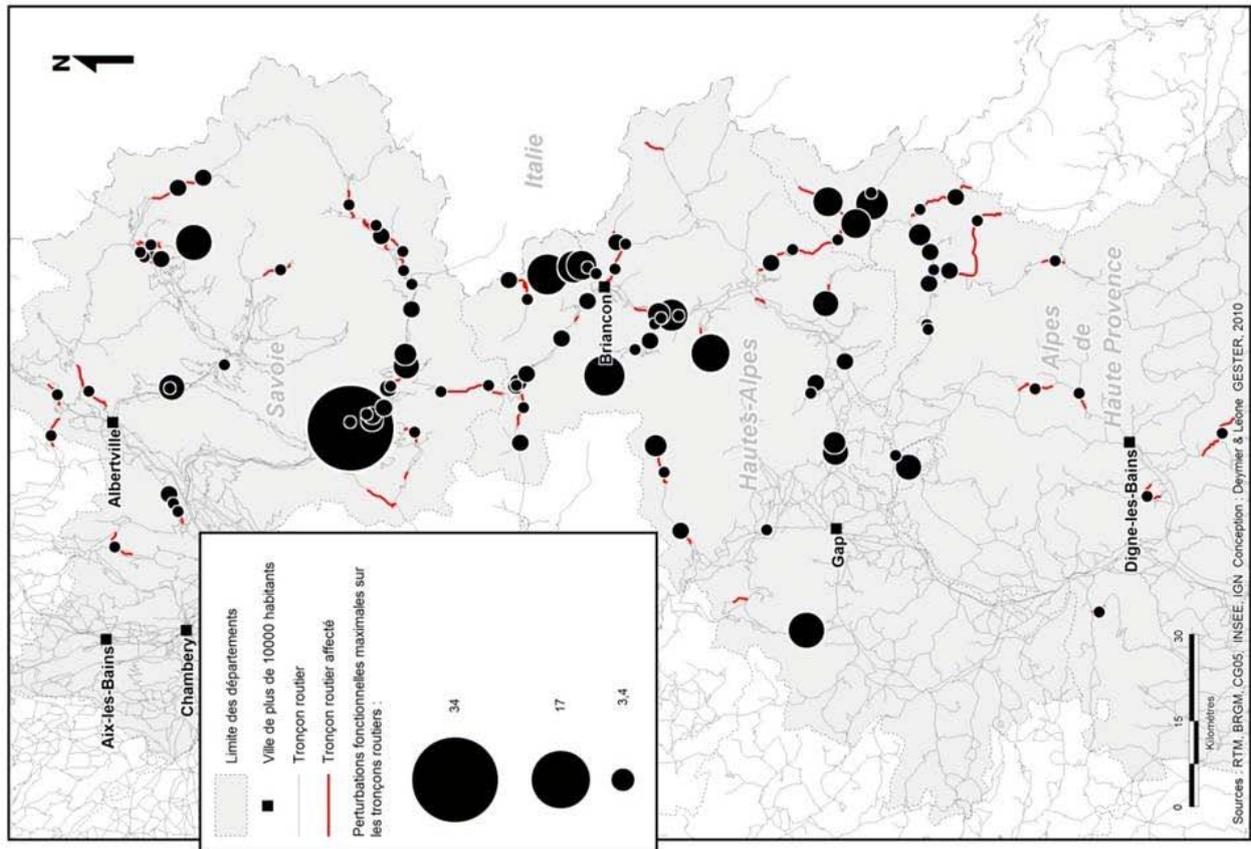


Figure B6 - Répartition par département des évènements ayant affectés le réseau routier (source BD impacts, 1950-2009)

Une cartographie des impacts physiques et fonctionnels par tronçon routier montre que les vallées de la Haute tarentaise (Savoie), de la Maurienne (Savoie), le Briançonnais (Hautes-Alpes) et la vallée de l'Ubaye (Alpes-de-Haute-Provence) ont été les zones les plus affectées depuis 1950 (**figure B7**).

→ 103 tronçons avec un impact fonctionnel



→ 94 tronçons avec un impact physique

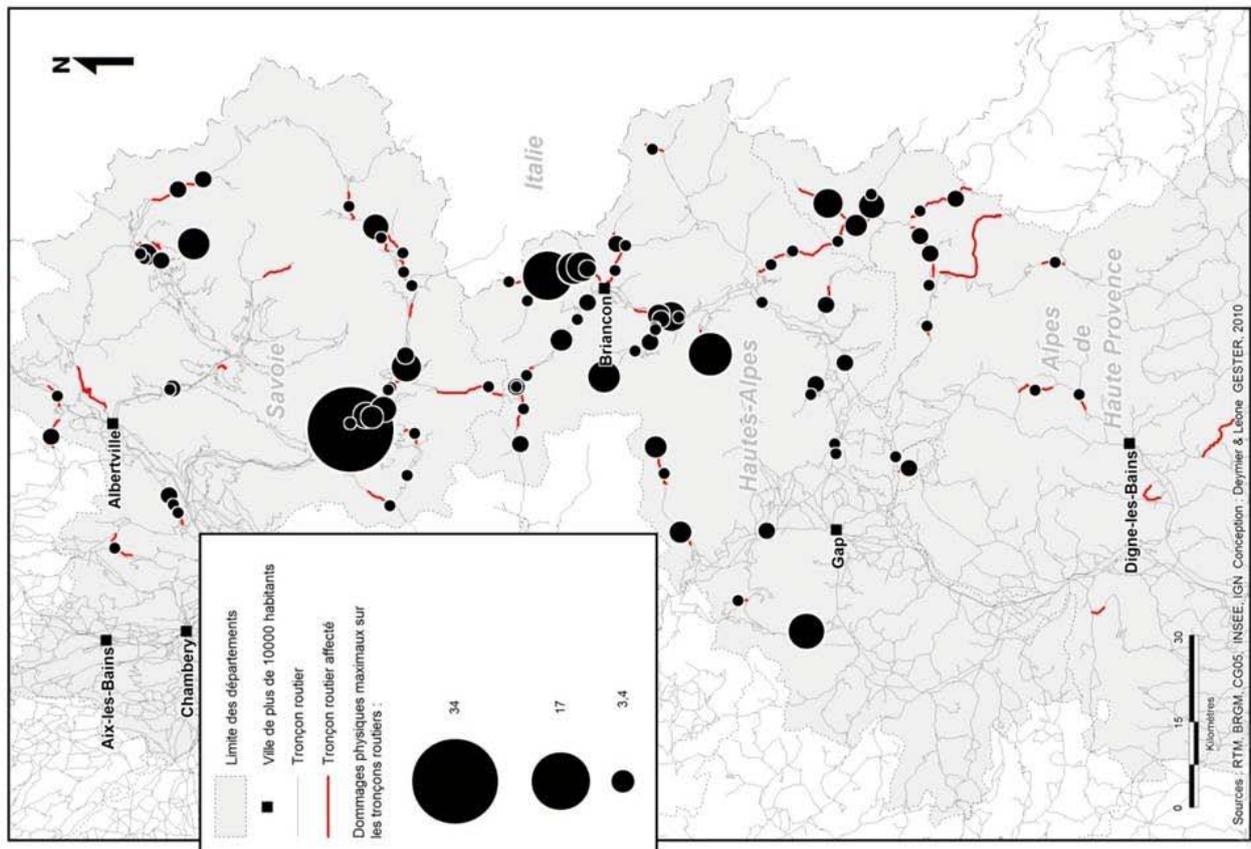


Figure B7 - Nombre d'impacts physiques et fonctionnels par tronçon routier (1950-2009) (source BD impacts)

Sur la base de ces témoignages de dommages, la portion de route la plus vulnérable de notre zone d'étude est la départementale D1006 (34 événements), sur un tronçon exposé aux laves torrentielles du torrent de La Ravoire à Pontamafrey-Montpascal (73) (**figure B8**). Notons que cette départementale D1006, tout comme la D994G, cumule des impacts sur deux tronçons, soit respectivement 39 et 19 impacts physiques recensés au total sur chacune. C'est un tronçon de la D238 sur la commune de Freissinières (05) (**figure B9**) qui recoupe le plus de torrents (7) à *debris flows* dommageables. Les 10 tronçons routiers les plus impactés sont listés dans le **tableau B2** et visualisables sur fond GoogleEarth.

ID_TRONCON	CODE	D	D1	D3	D4	D5	DP	P	P1	PP	P2	P3	P4	Total DP	Total PF	Torrents	Communes	Dpt
214816	D1006	19	0	15	0	0	0	32	0	0	1	1	0	34	34	Torrent De La Ravoire	PONTAMAFREY-MONTPASCAL	73
218109	D1006	3	0	2	0	0	0	3	0	0	1	0	0	5	4	Torrent de Merderel	SAINTE-MICHEL-DE-MAURIENNE	73
226796	D204T	1	0	3	2	0	0	2	0	2	5	0	0	6	9	Riou Blanc	PELVOUX	05
232138	D238	0	0	10	0	0	0	0	0	3	3	2	0	10	8	Combal des Croix	FREISSINIÈRES	05
																Combe de Chaux Sousteyrannes		
																Gramusat		
																Les Costilles		
																Ravins des Touisses		
																Torrent des Tronches		
																Torrent d'Allibrands		
236108	D25	0	0	5	0	0	0	1	0	0	4	0	0	5	5	Les Combes	SAINT-PAUL	04
																Vallon de Panestrel		
																Combe du Pic		
																Vallon de Chauvet		
																Les Becasses		
206631	D87	6	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	6	7	Ruisseau De Poncet	PEISEY-NANCROIX	73
																Nant Fesson		
																Ruisseau De Rosuel		
235715	D937	7	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	Torrent du Rabioux	MONTMAUR	5
223806	D994G	5	0	8	0	0	0	5	0	0	4	0	0	13	9	Torrent De La Pinatelle	VAL-DES-PRES	05
																Ravin Des Fourneous		
																Ravin des Sables		
225781	D994G	2	0	4	0	0	0	3	0	1	2	0	0	6	6	Torrent De La Ruine	VAL-DES-PRES	
230703	N94	2	0	3	0	0	0	1	0	0	4	1	0	5	6	Torrent Du Riou Sec	L'ARGENTIERE-LA-BESSEE	05

Tableau B2 - Top 10 des tronçons routiers les plus impactés (1950-2009) (source BD impacts)



Figure B8 - Tronçon le plus exposé aux *debris flows* de la zone d'étude : D1006 sur un tronçon exposé aux laves torrentielles du torrent de la Ravoire (34 évènements), Savoie. (Capture d'écran GoogleEarth et Google Map, sources BD BV LGP, BD impacts, BD Route500 IGN). En rouge : tronçon, en bleu : limites de bassins versants et cônes de déjection)

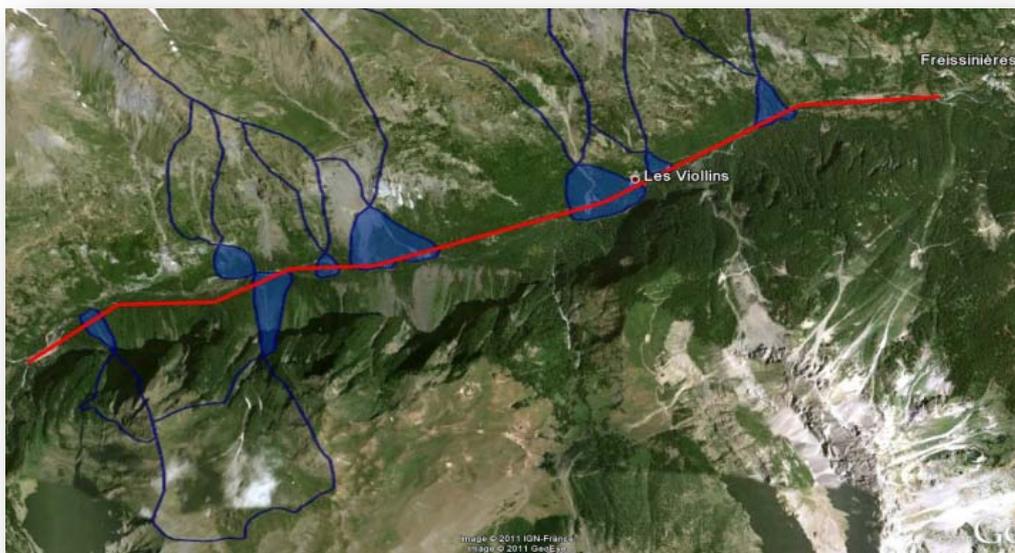


Figure B9 - Tronçon qui recoupe le plus de torrents (7) à *debris flows* dommageables de la zone d'étude : D238 sur la commune de Freissinières (05) (Capture d'écran GoogleEarth, sources BD BV LGP, BD impacts, BD Route500 IGN). En rouge : tronçon, en bleu : limites de bassin versants et cônes de déjection)

C MODELISER LE RESEAU ET L'ACCESSIBILITE ROUTIERE AU MOYEN DE GRAPHS

C.1 GRAPHS ET ACCESSIBILITE

C'est Euler en 1737 qui est à l'origine de la théorie des graphes¹. Utilisée aujourd'hui en informatique ou en économie, la théorie des graphes trouve tout particulièrement son intérêt dans le domaine des transports. En effet, la transformation d'un réseau routier « réel » en graphe offre la possibilité de multiples applications.

Si la théorie des graphes permet de simplifier le réseau visuellement, c'est avant tout dans les calculs et les représentations graphiques de l'accessibilité que la théorie des graphes devient la plus utile. Tout d'abord il faut transformer le réseau en graphe (**figure C1**), c'est-à-dire en un objet mathématique composé de sommets et d'arcs. Les sommets (les points) peuvent être associés aux nœuds du réseau, et les arcs (les liaisons entre les points) sont associés aux tronçons routiers.

Le graphe doit rendre compte fidèlement de la hiérarchie routière urbaine et donc distinguer les différents types de voies qui composent le réseau (Appert et Chapelon, 2006). Dans le cadre des réseaux routiers, il est important d'attribuer des valeurs aux graphes (graphe valué). En effet, les lieux de départs et d'arrivées sont situés dans l'espace et n'ont pas forcément le même poids : les routes ont des vitesses et des capacités différentes. Chaque arc est caractérisé par sa longueur en kilomètres (caractéristiques morphologiques) et par la vitesse de circulation automobile permise sur l'infrastructure qu'il représente (autoroute...) dans le respect du code de la route (caractéristiques qualitatives).

Grâce à la théorie des graphes, il est possible d'intégrer la notion d'accessibilité dans les systèmes d'information géographique. La représentation graphique d'un réseau couplée aux nombreux calculs d'accessibilité permet d'insérer la perte d'accessibilité dans la visualisation géographique de la vulnérabilité des réseaux routiers.

Les problèmes de cheminement sont des problèmes anciens de la théorie des graphes. Il existe de nombreux algorithmes de recherche des plus courts chemins dans un graphe : algorithme de Ford (1956), algorithme de Bellman (1958), algorithme de Moore (1957) et Dijkstra (1959) et ses variantes (Dantzig (1960), Whiting & Hillier (1960), algorithme de Floyd (1962). Ce dernier appartient à la famille des algorithmes matriciels, lesquels permettent de déterminer les plus courts chemins entre tous les couples de sommets du graphe.

Il est possible d'orienter ou non le graphe suivant les sens de circulation. Il faut préciser qu'à chaque graphe est associée une matrice comprenant les lieux d'origines et d'arrivées, mais aussi les temps et/ou distances entre ces lieux.

¹ Il s'agissait de faire traverser par un voyageur les 7 ponts de la ville de Königsberg dans un ordre quelconque et une seule fois.

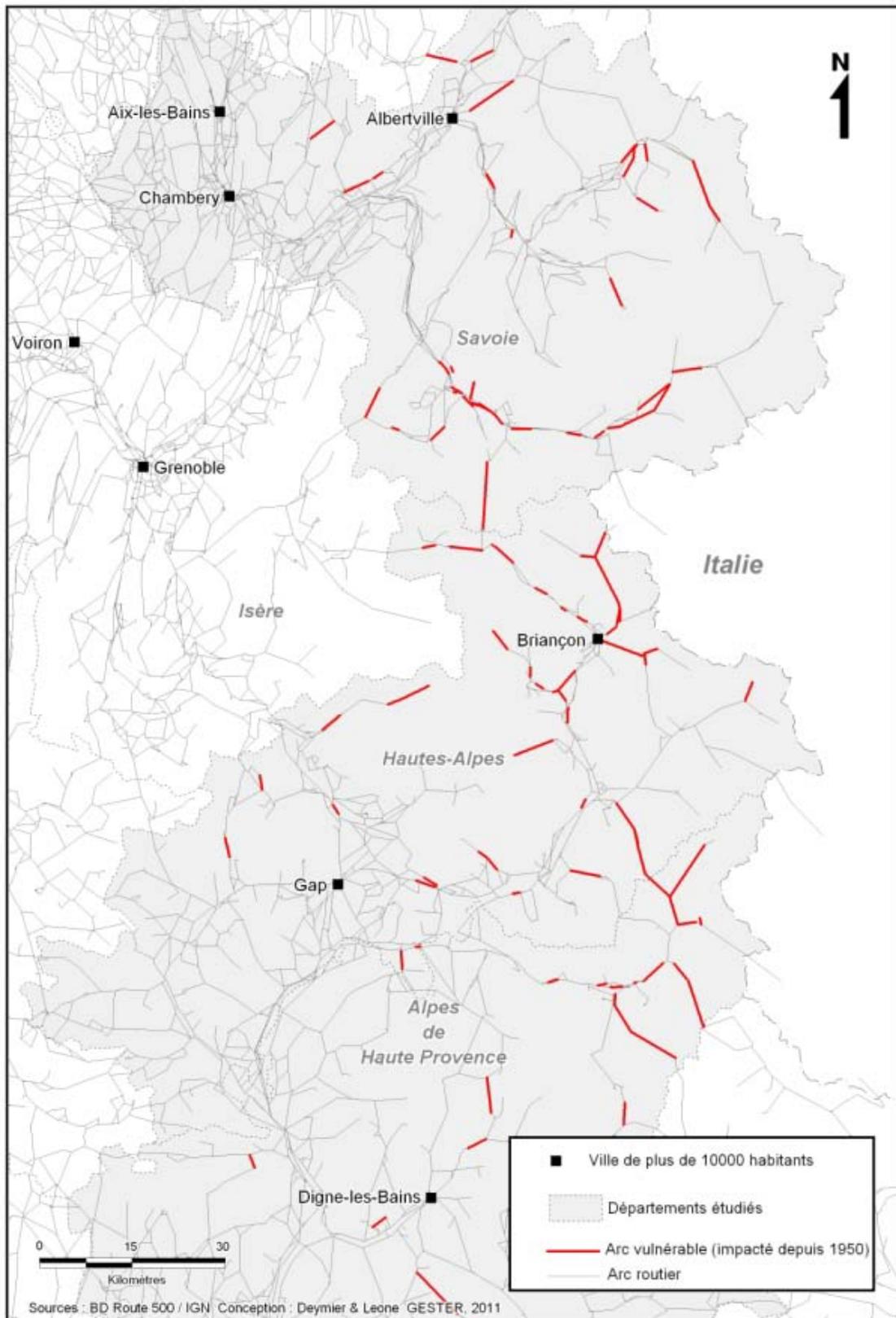


Figure C1 - Le graphe routier de notre zone d'étude constitué à partir de la base Route 500 de l'IGN (16775 nœuds et 12188 arcs). En rouge les tronçons vulnérables (impactés depuis 1950).

C.2 CHOIX DE LA DISTANCE-TEMPS COMME VALUATION

Un réseau peut être plus ou moins bien prédisposé à répondre à un incident survenant sur tel ou tel de ses liens. Outre la morphologie (profil en long), la qualité des voies (profil en travers) influence grandement cette prédisposition. Afin de prendre en compte ces deux critères simultanément dans les calculs d'accessibilité, nous utilisons le temps comme valuation du graphe. En effet, le temps de parcours dépend à la fois du profil en long et du profil en travers des infrastructures.

Cette valuation temporelle des arcs du graphe nécessite l'utilisation de vitesses de circulation spécifiques. Ainsi, à chaque classe d'infrastructures est associée une vitesse moyenne de circulation. Cette vitesse est donnée pour une automobile de cylindrée moyenne. Nous considérons ici un fonctionnement fluide du réseau qui permet des vitesses de circulation relativement proches de celles autorisées par le code de la route (fonctionnement normal hors congestion). Les vitesses tiennent également compte des limitations imposées par les caractéristiques techniques de voies.

Cette approche repose sur un compromis entre la volonté d'approcher au plus près la réalité des déplacements et celle d'offrir un niveau satisfaisant de généralité dans l'interprétation des résultats de l'étude. Généralité impossible à obtenir avec une approche désagrégée basée sur le calcul des temps d'accès à l'instant t et tenant compte de l'encombrement des voies. Deux arguments principaux permettent de justifier la préférence accordée à un fonctionnement non congestionné du réseau : d'une part, le caractère ponctuel et très aléatoire des phénomènes de congestion sur les liaisons interurbaines ; d'autre part, en milieu urbain, la relative concentration des pics de circulation au cours de la journée rendant les périodes de congestion très minoritaires.

Le temps de parcours $T(i)$ en minutes sur chaque arc i sera obtenu automatiquement en divisant sa longueur L_i par la vitesse V_j en km/h de la classe d'infrastructures j à laquelle appartient le tronçon.

$$T(i) = \frac{L_i}{V_j} \times 60$$

C.3 LES MATRICES D'ACCESSIBILITE

Les matrices permettent de calculer l'accessibilité et plus particulièrement les pertes ou dégradations d'accessibilité. Il est important de souligner deux points : les distances-temps sont toujours calculées entre couples de lieux et toute mesure d'accessibilité se rapporte à un instant donné et à un seul (Bavoux *et al.*, 2005). La perte d'accessibilité se calcule donc entre deux matrices du même graphe, l'une à l'état normal et l'autre à l'état altéré. On peut ainsi calculer l'accessibilité unipolaire et l'accessibilité multipolaire (**figure C2**).

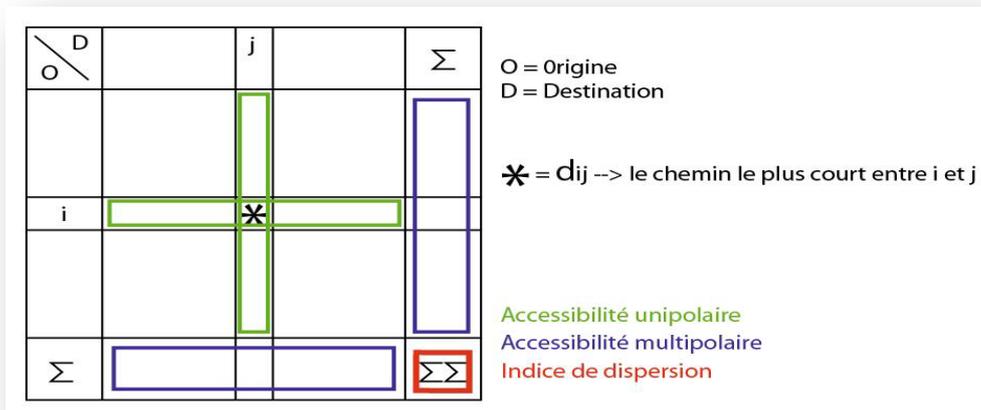


Figure C2 - Matrice d'accessibilité (modifié d'après Chapelon, support de cours master GCRN)

Si le calcul de cette différence entre la matrice à l'état normal et la matrice à l'état altéré montre une dégradation de l'accessibilité, cela signifie que le réseau a perdu une partie de sa connectivité, c'est-à-dire que le nombre d'itinéraires pour rejoindre un même lieu a diminué. De plus, si une partie du réseau se retrouve isolée, on peut dire que le réseau global a perdu de sa connectivité. Un réseau avec une bonne connectivité permet au réseau de maintenir sa connectivité.

C.4 SOLUTIONS LOGICIELLES

Dans notre étude, les différents calculs d'accessibilité et les indicateurs en découlant, ont été obtenus dans deux environnements logiciels différents sollicitant deux algorithmes différents de recherche des plus courts chemins dans un graphe :

- le premier est le logiciel **RouteFinder** (environnement SIG MapInfo) utilisant l'algorithme de Dijkstra (1959) (<http://www.routeware.dk>) ;
- le second est le logiciel **MapNod** et l'utilisation de l'algorithme de Floyd (1962) (<http://mapnod.free.fr>).

C.4.1 LE LOGICIEL MAPNOD

MapNod est un logiciel d'évaluation de modifications de l'offre de transport pour l'aide à la décision en aménagement. Il est développé conjointement depuis 1993 par Alain L'Hostis (IFSTTAR, Villeneuve d'Ascq) et Laurent Chapelon (UMR GRED ex. GESTER, Université Montpellier 3).

Basé sur la théorie mathématique des graphes et sur les outils de la Recherche Opérationnelle, MapNod offre une palette complète d'indicateurs d'analyse de réseaux et de services de transport. Il intègre un module cartographique permettant des représentations innovantes (arcs colorés, cartes en relief d'espace-temps). Adapté à tous les modes de transport, il est notamment utilisé pour évaluer les conséquences de coupures de réseaux, pour localiser de manière optimale des équipements comme les gares TGV, pour analyser la performance de grilles horaires de transports publics, pour évaluer les gains d'accessibilité offerts par une nouvelle infrastructure ou par de nouveaux services de transport.

C.4.2 FONCTIONNALITES DE ROUTEFINDER IN MAPINFO

Routefinder est un outil de MapInfo qui exploite directement dans un environnement SIG les données attributaires d'objets vectoriels linéaires. Il est donc adapté aux applications routières. Son rôle principal est d'obtenir les temps et distances de parcours minimaux entre différents lieux sélectionnés d'un territoire. La base routière utilisée ici est fournie par l'IGN (Route500).

C.4.2.1 Paramétrage des vitesses de déplacement

Routefinder requiert dans un premier temps de préparer la table du réseau routier. Cela se traduit par l'ajout de trois nouveaux champs qui vont accueillir plusieurs types de données, en particulier les vitesses de circulation (**figure C3**). Le paramétrage des vitesses est indispensable au bon fonctionnement de Routefinder. Cela nécessite d'attribuer à chaque tronçon une vitesse correspondante.

Nouveau champ accueillant le "Code vitesse"

Id_Route500	Vocation	Nombre_Chaussées	Nombre_Voies	Etat_Physique	Accès	Sens	Classement_Administratif	ID	Fcode	RF_result
100 818	Liaison principale	1 chaussée	2 voies larges	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	3	0,000
100 820	Liaison principale	1 chaussée	2 voies larges	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	3	0,000
100 829	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Sans objet	0	7	0,000
100 841	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 842	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 871	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 872	Liaison principale	1 chaussée	2 voies larges	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	3	0,000
100 874	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 877	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 895	Liaison régionale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	5	0,000
100 896	Liaison principale	1 chaussée	3 voies	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	3	0,000
100 897	Liaison principale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	3	0,000
100 898	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 899	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000
100 903	Liaison locale	1 chaussée	1 voie ou 2 voies étroites	Revêtu	Libre	Double sens	Départementale	0	7	0,000

Figure C3 – Champs nécessaires au fonctionnement de RouteFinder

Les tronçons issus de la base de données Route500 de l'IGN ont été classés en fonction de leurs vocations². Cette classification a pu être validée ou affinée en fonction du classement administratif de la route, du nombre de chaussées et de voies. On a ensuite attribué des vitesses à ces classes. Il nous a semblé pertinent d'utiliser des vitesses inférieures aux vitesses légalement autorisées pour tenir compte de la topographie accidentée de notre zone d'étude (sinuosité, pentes).

Plusieurs classifications des vitesses routières existent dans la littérature pour des voitures. Nous avons adapté celle de Chapelon (1996) (5 classes) à partir des travaux effectués par le CETE de l'Est pour l'outil d'analyse des itinéraires alternatifs (ANITA). Au final, nous avons retenu 5 classes de vitesses correspondant à 6 types routiers extraits de la base Route500 (**tableau C1**).

² Les vocations font partie des différentes informations fournies pour chaque tronçon routier de la base Route500 de l'IGN. Elles sont au nombre de 5 : type autoroutier, liaison principale, liaison régionale, liaison locale et bretelle.

Vocation (Route500)	Classement administratif	Vitesse (km/h)	Code Vitesse
Type autoroutier	Autoroute	110	1
Type autoroutier	National ou Sans Objet	70	2
Liaison principale	-	70	3
Liaison régionale	-	60	5
Liaison locale	-	50	7
Bretelle	-	40	9

Tableau C1 – Paramétrage des vitesses de déplacement par type de tronçon (pour voitures)

Ces vitesses ont été confrontées avec des calculateurs d'itinéraires sur internet. Les distances et les vitesses obtenues sur plusieurs itinéraires alpins sont assez similaires entre RouteFinder et « GoogleMap ». Cependant, « ViaMichelin » et « Mappy » nous fournissent des durées et des distances plus longues. Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux supports peuvent prendre en compte les différentes portions de route bloquées pour travaux. Par ailleurs, contrairement à ces supports en ligne, nous n'avons pas modulé les vitesses dans les zones urbaines en appliquant un coefficient de ralentissement.

Les codes « vitesses » sont inscrits dans une colonne spécifique de la table réseau routier. Il suffit de faire correspondre dans les options de vitesse de Routefinder, le code « vitesse » à la vitesse voulue (figure C4).

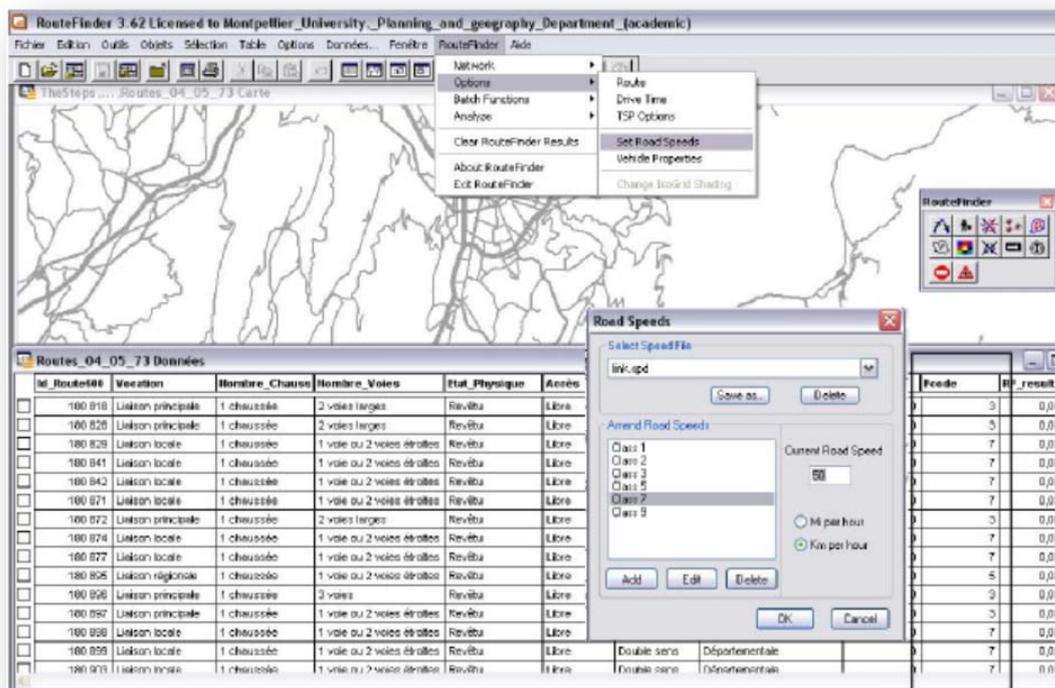


Figure C4 - Paramétrage des vitesses sous RouteFinder. Capture d'écran MapInfo

C.4.2.2 Fonctionnalités de Routefinder

Routefinder nous permet entre autre :

- Des calculs d'itinéraires en fonction de la distance,
- Des calculs d'itinéraires en fonction de la durée,
- De calculer des matrices d'accessibilité entre tous les lieux,
- De représenter cartographiquement l'accessibilité soit par des isochrone (surface), soit par isolinks (objets linéaires du réseau).

Les calculs d'accessibilité peuvent se faire selon deux modes : selon la distance la plus courte (mode SHORTEST), ou selon le temps de trajet le plus court (mode FASTEST) (**figure C5**). Dans les deux cas la distance et la durée sont fournies. Les résultats obtenus entre les deux modes, pour des mêmes lieux d'arrivées et de départs, peuvent donc être sensiblement différents. Dans les applications qui suivent, nous avons retenu uniquement le mode FASTEST.

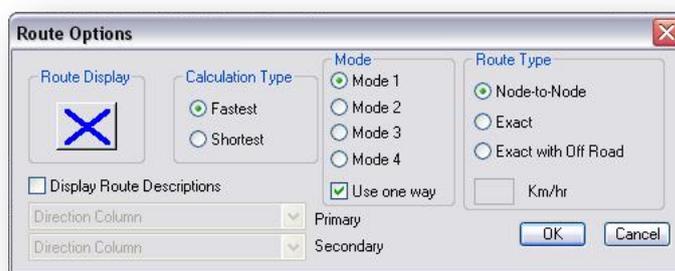


Figure C5 - Sélection du mode de calcul. Capture d'écran RouteFinder

Un autre point important est la sélection des lieux de départs et/ou d'arrivées. Là encore plusieurs solutions nous sont offertes. La plus simple consiste à placer ces lieux sur un nœud du réseau. Le cas échéant, Routefinder prendra automatiquement le nœud le plus proche comme point de départ ou d'arrivée. Dans ce cas de figure on peut aussi rentrer une vitesse moyenne hors réseau (mode Exact with Off Road). Le logiciel établira alors un itinéraire « invisible » utilisant cette vitesse entre le lieu choisi et le nœud le plus proche.

Enfin, Routefinder permet la fermeture (coupure) d'un tronçon de route sans avoir besoin de le supprimer. Cela s'avère particulièrement utile quand l'utilisateur doit mettre hors-service plusieurs tronçons d'un même réseau dans plusieurs scénarios différents. On peut alors faire toutes les manipulations avec la même table MapInfo du réseau routier. Pour « exclure » le tronçon voulu du réseau, il suffit de le sélectionner avec l'outil approprié (sens interdit). Tant qu'il sera marqué comme fermé il sera considéré par Routefinder comme inexistant dans les calculs d'itinéraire et d'accessibilité (**figure C6**).

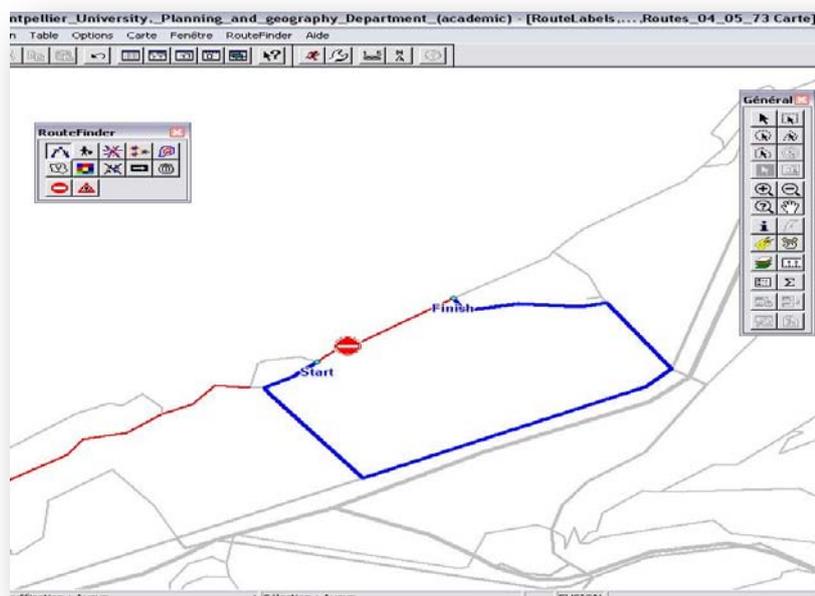


Figure C6 – Calcul d’itinéraire par le plus court chemin dans RouteFinder, capture d’écran

C.4.2.3 Restitutions cartographiques des résultats

La représentation cartographique s’avère être un des meilleurs moyens de visualiser les pertes d’accessibilité, en particulier multipolaires. Mais il faut pour cela prendre en considération les contraintes liées aux logiciels qui supportent le SIG. Ainsi, MapInfo (couplé à Routefinder) permet de produire 4 types de cartes pour représenter des temps d’accès au territoire (**figure C7**) :

- **Des cartes par symboles proportionnels** : il s’agit de sélectionner des lieux de départs et des lieux d’arrivées entre lesquels on calcule les durées de trajets (matrice des temps). Les temps d’arrivée sur chaque point de destination sont ensuite représentés au moyen de cercles proportionnels. Il en va de même pour les pertes d’accès après avoir calculé le différentiel de temps d’arrivée entre un réseau à l’état normal et un réseau à l’état altéré. Ce type de représentation est particulièrement adapté aux lieux d’arrivée implantés géographiquement sous forme de points, et si possible ancrés sur des nœuds du réseau (centre de secours, gare, station de ski, ...).
- **Carte par isochrones** (surfaccique) : Routefinder permet de représenter l’accessibilité en implantation surfaccique par des isochrones. Si cette représentation des surfaces accessibles du territoire peut sembler judicieuse au premier abord, le rendu disponible avec Routefinder n’est pas véritablement rigoureux. Par exemple, dans le cas des régions alpines, l’interpolation proposée par Routefinder n’exclut pas les zones de haute montagne totalement inaccessibles.
- **Carte par isolinks** (linéaire) : sur ces cartes, les temps d’accès sont représentés en implantation linéaire sur les tronçons routiers. Une variation de couleur est attribuée à chaque classe de temps de trajets pour atteindre chaque extrémité d’un tronçon. Ce type de visualisation est intéressant lorsque les lieux à mesurer se trouvent sur le

réseau ou lorsque l'on s'intéresse uniquement à l'accessibilité le long du réseau routier.

- **Carte par carroyage** (maillage surfacique) : la méthode consiste à construire une grille sur toute la zone d'étude ou uniquement sur les portions du territoire effectivement traversées par le réseau routier. La taille des mailles peut être adaptée suivant l'échelle d'étude et/ou le format des cartes à produire. Dans les applications qui suivent, nous avons retenu des mailles de 4 km² (2x2km). Toutes les mailles qui ne sont pas traversées par un tronçon de route y sont considérées comme naturellement isolées. On calcule les temps d'accès entre les lieux de départ et les centroïdes de chaque maille. Les résultats obtenus sont ensuite discrétisés en classes de couleurs. Cette méthode cartographique offre des avantages importants pour représenter et mesurer l'accessibilité territoriale. On peut faire varier la taille des mailles en fonction de la résolution du réseau. Cela permet également par le jeu des agrégations spatiales des données SIG d'affecter des données à ces mailles : bâti, population ; et de quantifier le volume des enjeux accessibles en fonction du temps (graphiques). Ce type de représentation permet aussi de s'affranchir des limites administratives.

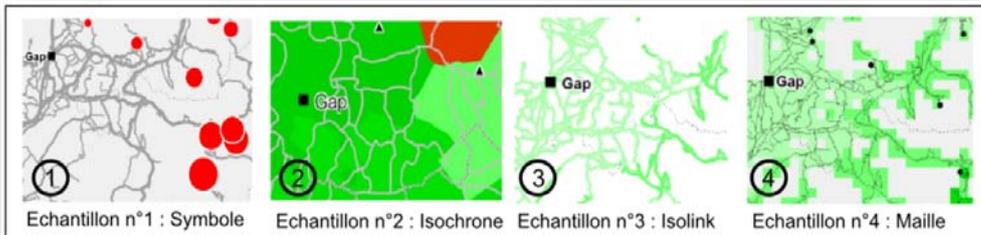


Figure C7 - Différentes représentations cartographiques de la mesure de l'accessibilité territoriale

Les données obtenues lors des calculs d'accessibilité peuvent ainsi être exportées dans un tableur pour construire des courbes d'accessibilité. En fonction du temps d'accès, on peut mesurer l'enjeu accessible (nombre d'habitants, emplois, clients, etc.). Le passage aux courbes permet d'apprécier l'impact territorial d'un scénario en superposant sur un même graphique les courbes d'accès à l'état normal et celles obtenues pour un réseau altéré.

C.5 BASES DE DONNEES CONSTITUEES POUR LA MODELISATION DE L'ACCESSIBILITE

Notre étude porte sur les départements des Hautes-Alpes, des Alpes-de-Haute-Provence et de Savoie. Nos différentes bases de données sur les enjeux territoriaux (population communale, journées skieurs) sont donc ciblées uniquement sur ces trois départements. Cependant, afin de ne pas fausser nos travaux sur l'accessibilité en tronquant arbitrairement le réseau routier, nous avons sélectionné un cadre d'étude plus large englobant le réseau routier des départements frontaliers (hors Italie). Cela représente une zone rectangulaire de 180*300 km centrée sur les 3 départements cités.

C.5.1 BD RESEAU ROUTIER

Le réseau routier utilisé est fourni par l'IGN au moyen de la base Route 500. Nous avons exploité deux types d'objets avec certaines de leurs données attributaires :

- Les nœuds, afin de géoréférencer sur le réseau d'autres objets tel que les villes ou les sites touristiques. Notre zone en comporte 12188.
- Les tronçons routiers qui ont servi de support aux calculs d'accessibilité. Notre zone d'étude en comporte 16775.

A chaque objet géoréférencé sont rattachées plusieurs informations (**figure C8**). Il s'agit par exemple pour les tronçons routiers, de leur longueur, du nombre de voies et de chaussées, de leur classe administrative.

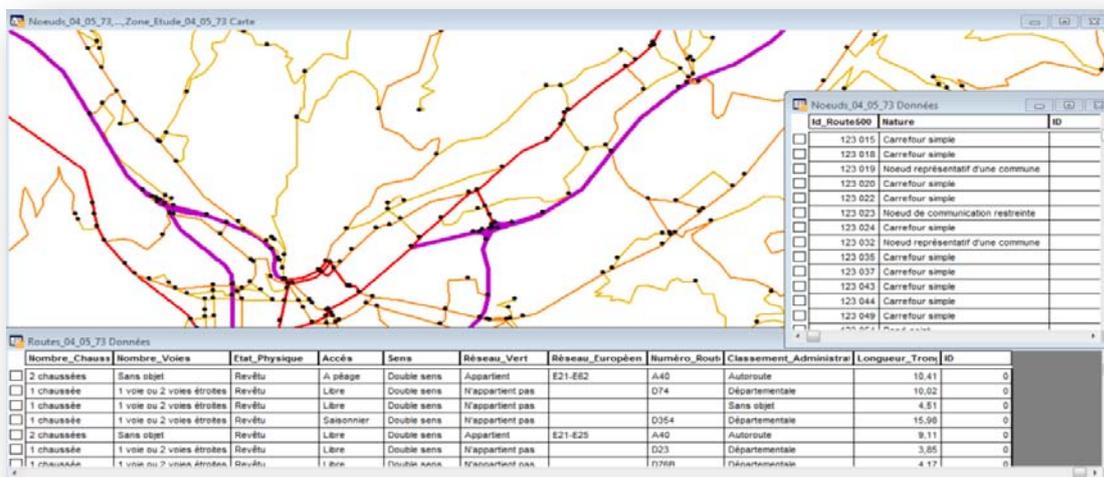


Figure C8 - Capture d'écran du SIG réseau routier Route500 de l'IGN et données attributaires (tronçons et noeuds)

Il est important de souligner le caractère imparfait de cette base de données Route 500 : le réseau local (chemin communal, route forestière, petite ruelle urbaine) n'y figure pas. Si ce travail exploratoire à l'échelle régionale ne nécessite pas l'emploi d'un réseau très détaillé, une base routière plus précise (et donc plus lourde) devra être utilisée pour des calculs d'accessibilité plus locaux et plus fins. Sur notre zone d'étude, le réseau routier est très contraint par le relief (vallées alpines encaissées). Il est constitué à près de 50% de tronçons de classe fonctionnelle locale (routes secondaires). Les autoroutes y sont très peu représentées (**figure C9**). Le réseau routier italien a été exclu de notre zone d'étude, faute de données disponibles.

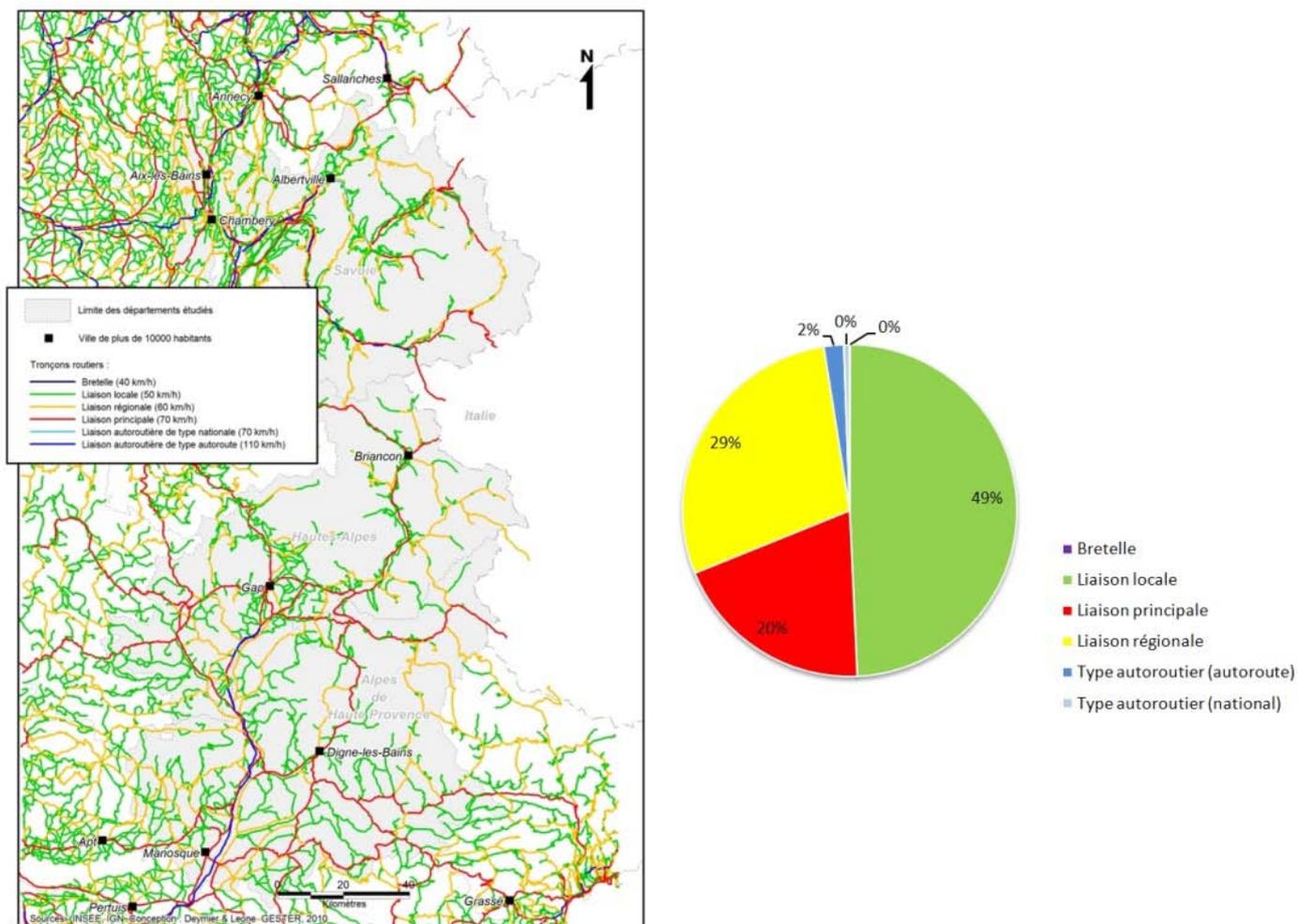


Figure C9 - Carte du réseau routier et répartition des classes fonctionnelles de tronçons de routes utilisés pour les calculs d'accessibilité (BD Route 500 de l'IGN)

C.5.2 BD COLS

Les calculs d'accessibilité sur un réseau routier montagnard nécessite de considérer les cols routiers et leurs périodes de fermeture, en particulier en période hivernale. Après enquête auprès des différents Conseils Généraux nous avons pu localiser les cols intramontagnards ayant une fermeture hivernale et leur attribuer une période de fermeture indicative. On a identifié 13 cols qui ouvrent au maximum des semaines 21 à 45 en fonction des conditions climatiques (figure C10).

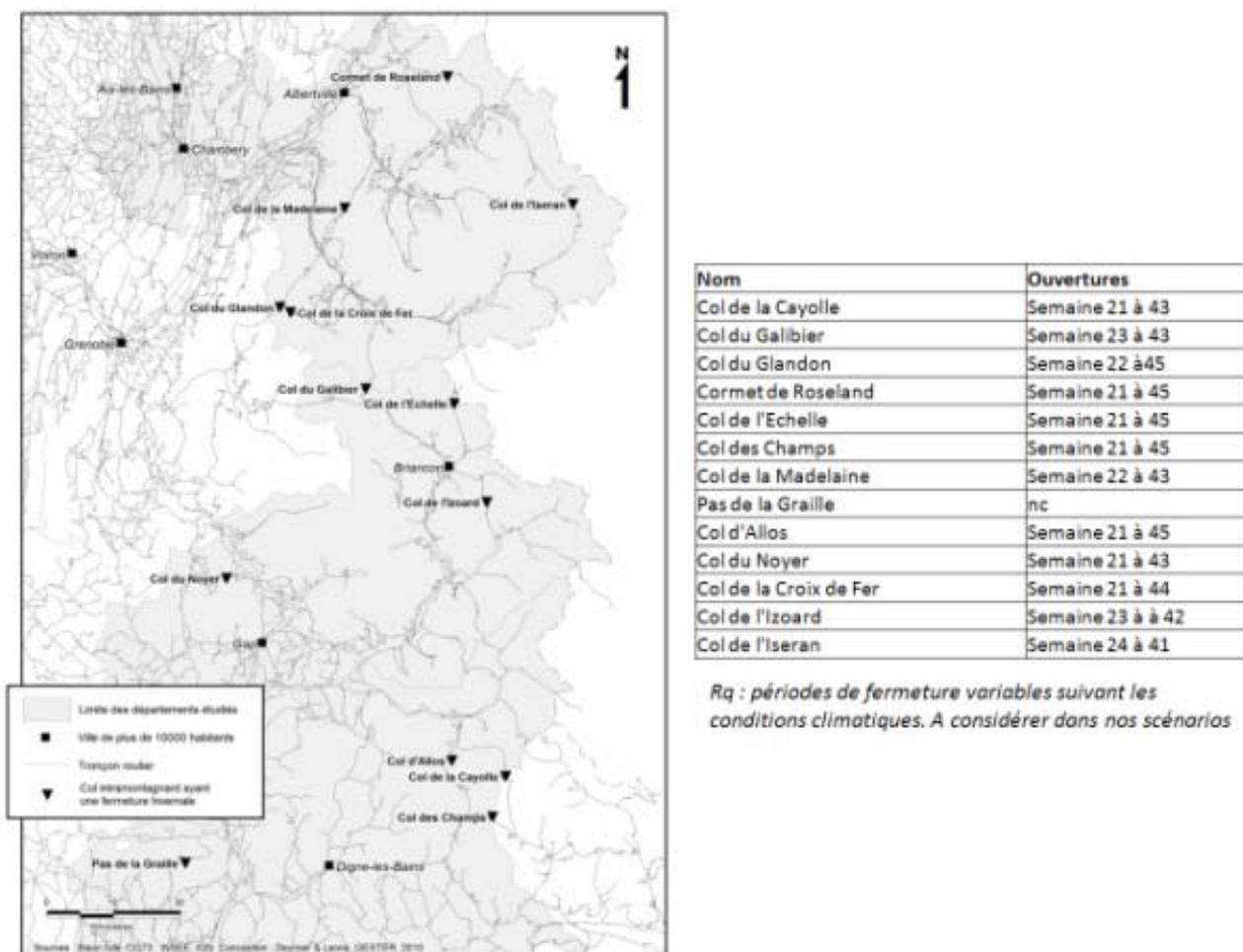


Figure C10 - Localisation des cols intramontagnards et périodes d'ouverture associées (sources diverses)

C.5.3 BD VILLES DE PLUS DE 10 000 HABITANTS

Les calculs d'accessibilité multipolaires ont été définis au départ 14 agglomérations de plus de 10 000 habitants (Insee, 2006) (**figure C11**). Nous avons considéré qu'à partir de ce seuil de population les villes bénéficiaient des équipements nécessaires pour justifier une étude d'accessibilité multipolaire (échangeurs autoroutiers, gares, hébergement, en équipements de soin et de secours). Il s'agit par ailleurs de lieux de passage quasiment obligatoires pour les populations extérieures à notre zone d'étude qui souhaitent se rendre dans les différentes vallées alpines.

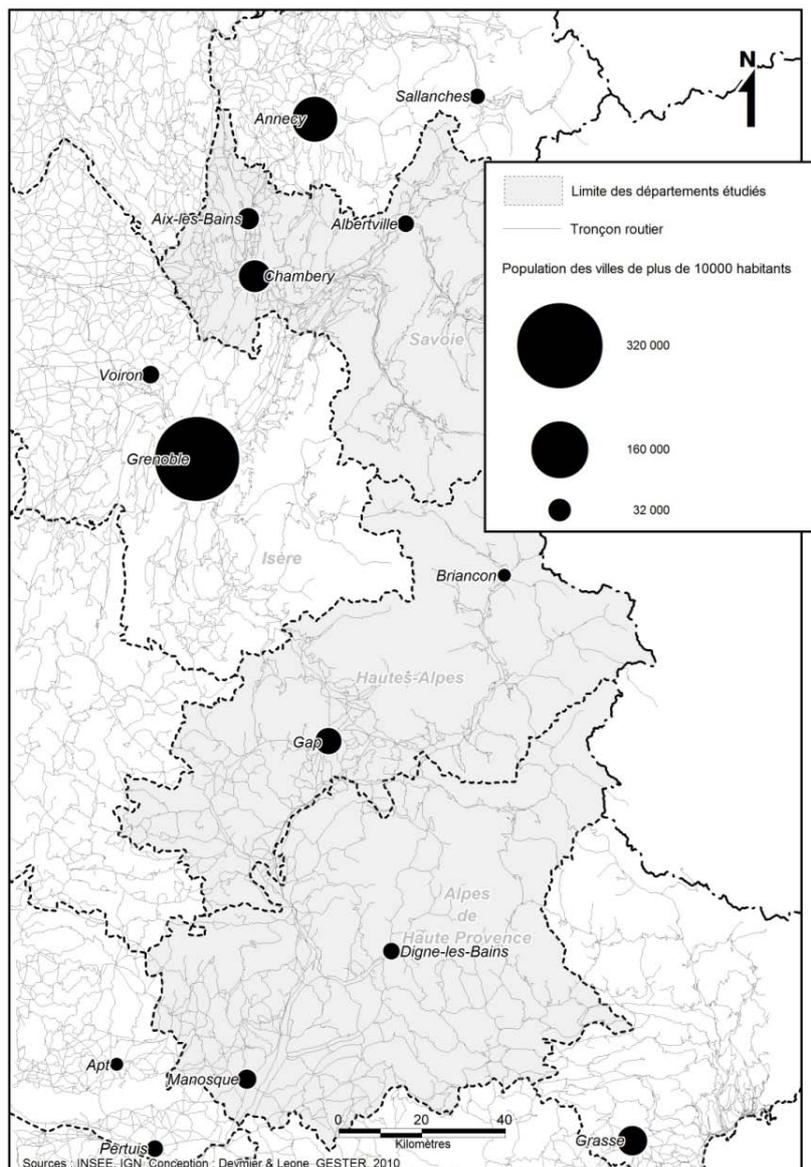


Figure C11 - Les 14 agglomérations de plus de 10 000 habitants considérées pour les calculs d'accessibilité multipolaire (source Insee, 2006)

C.5.4 BD COMMUNES

Afin de quantifier les enjeux accessibles à l'échelle communale, nous avons renseigné les communes des 3 départements étudiés avec le nombre d'emplois et la population communale. Les données proviennent du RGP (Insee, 2006). Cela représente au total 682 communes et 717 347 habitants sur les 3 départements (**figure C12**).

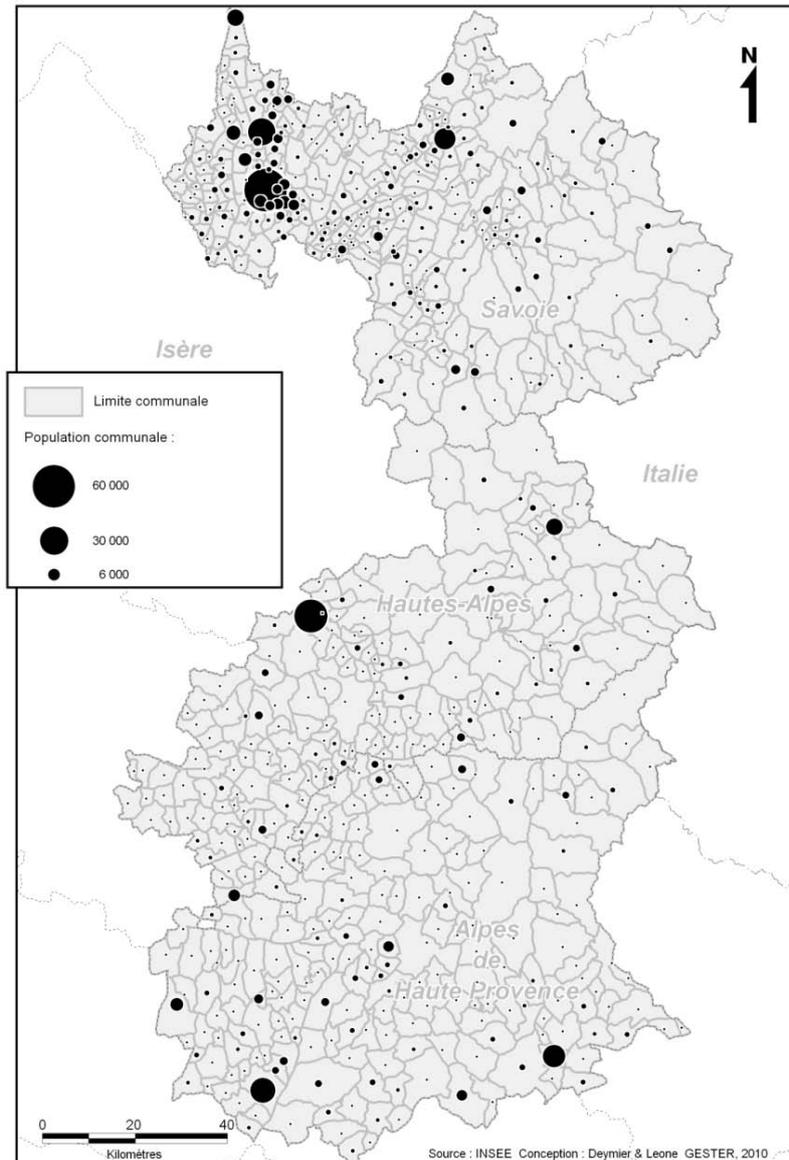


Figure C12 - Répartition de la population communale (source Insee, 2006)

C.5.5 BD SITES TOURISTIQUES (STATIONS DE SKI)

L'un des principaux atouts des départements alpins est la présence de stations de sports d'hiver et d'été. Nous avons par conséquent élaboré, non sans difficultés, une base SIG des sites touristiques (**figure C13**). Si les synthèses économiques sur le tourisme pour l'ensemble des départements sont nombreuses, il a été beaucoup plus difficile d'obtenir des informations pour chaque station. De plus, on s'aperçoit que les données fournies par les gestionnaires des stations de ski sont imprécises. Les limites entre domaine skiable, groupement de stations, entente entre les stations, *etc.* ne permettent pas d'obtenir des données claires pour chaque site touristique. Il faut aussi faire la distinction entre le service de remontées mécaniques, celui qui gère le domaine skiable et tous les services indépendants mais associés tels que les hôtels, les locations particulières, les restaurants, *etc.* Au final, nous avons pu recueillir les informations pour la plupart des stations de ski auprès d'une revue destiné aux professionnels : Montagne Leaders. Un article de ce magazine (2009) fournit des informations sur les chiffres d'affaires, les emplois et le nombre de journée-skieurs des stations ayant bien voulu répondre à une enquête. Les journées skieurs correspondent au nombre de forfaits journées vendus.

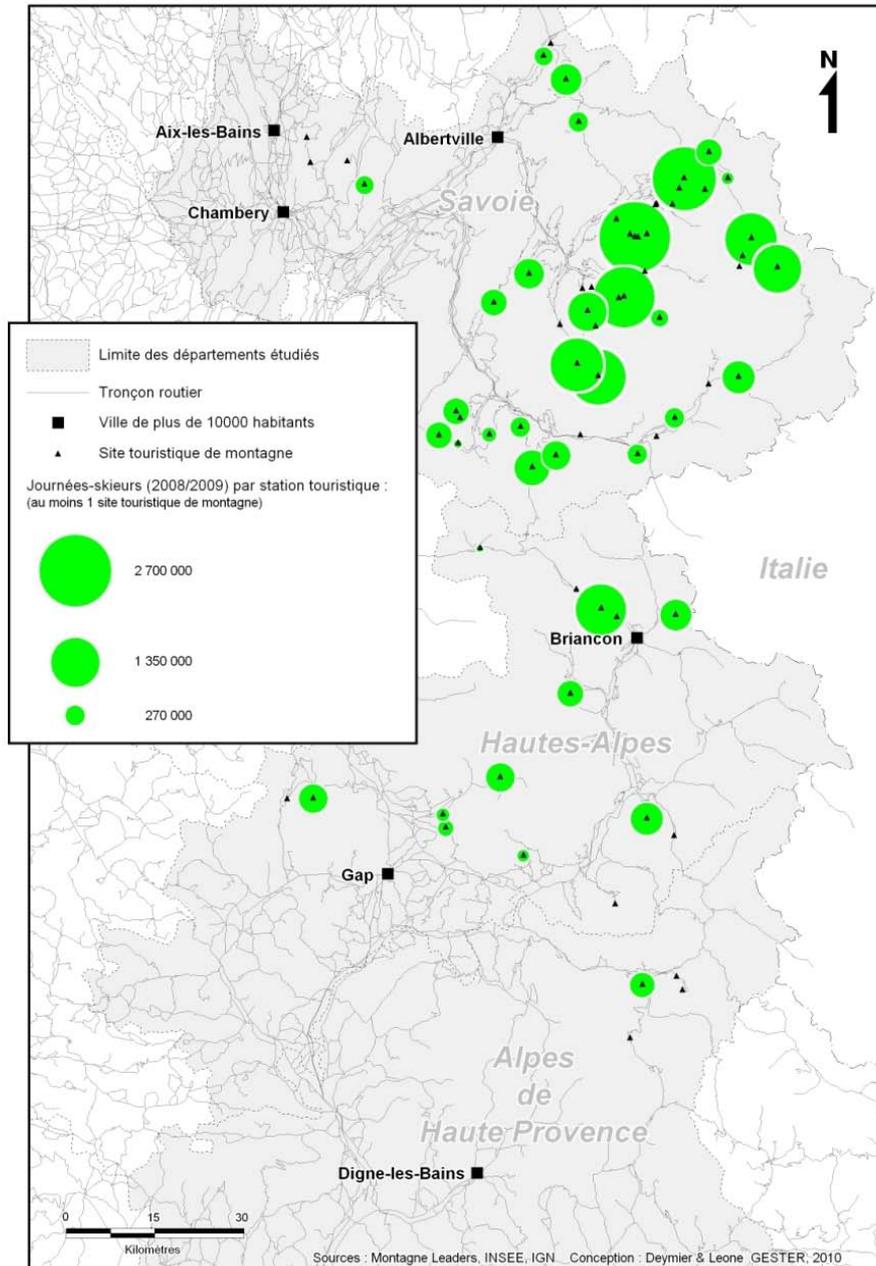


Figure C13 - Les sites touristiques et nombre de journées-skieurs associées

Les sites touristiques ont été géoréférencés manuellement à partir des fonds topographiques au 1/100 000^e sur des nœuds du réseau routier (**figure C14**). Deux variables principales ont été retenues : le nombre de journées skieurs (NJS) à l'année et le chiffre d'affaire annuel. Au total, cela représente 30 stations établies sur 57 sites pour un chiffre d'affaire global de 595 millions d'euros pour la saison 2008/2009 (Montagne Leaders, 2009). Dans le cas des stations à plusieurs sites, nous avons affecté les données attributaires au site principal.

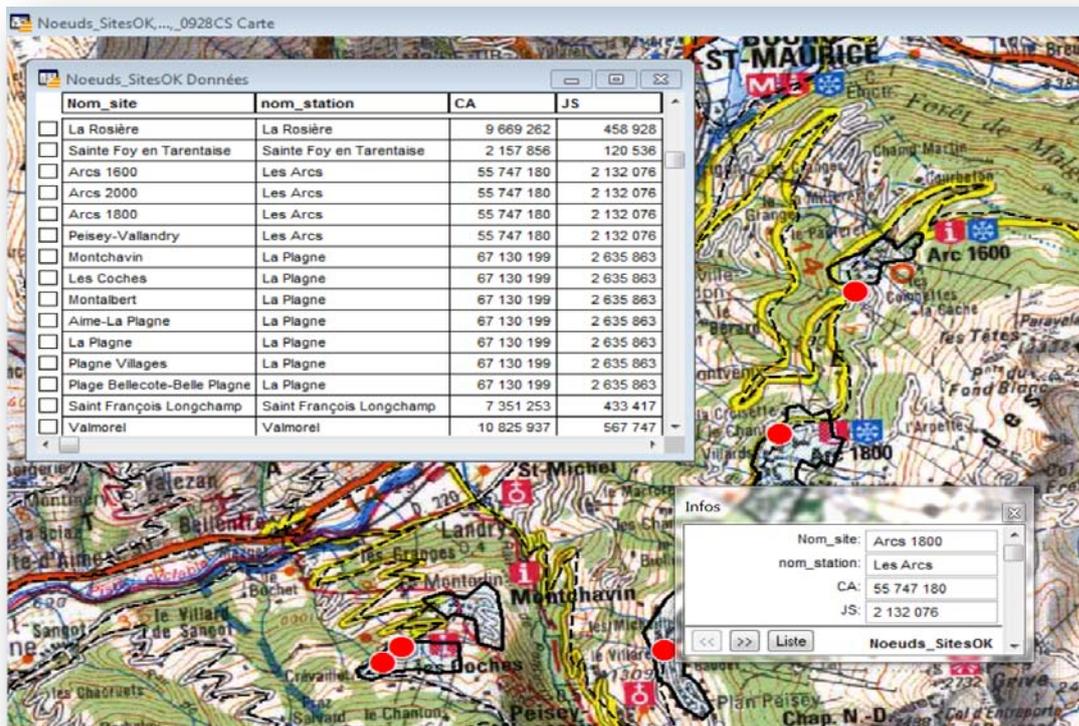


Figure C14 - Extrait de la BD SIG des sites touristiques

D GEO-INDICATEURS ET INDICES DE RISQUE POUR LE RESEAU ROUTIER

Afin de caractériser le risque d'impact de *debris flows* sur le réseau routier, deux types d'indicateurs spatialisés ont été définis (géo-indicateurs). A côté des fréquences d'impacts construites *a posteriori* à partir des témoignages de dommages (indicateur d'impact), ces nouveaux indicateurs permettent de hiérarchiser sommairement les tronçons au regard du risque encouru. Il s'agit d'un indicateur d'exposition des tronçons, et d'un indice composite de risque de perturbation fonctionnelle.

D.1 INDICATEUR D'EXPOSITION DU RESEAU ROUTIER

L'exposition peut se définir par le croisement des enjeux et de l'aléa. L'accès récent aux BD Topo de l'IGN sur les trois départements étudiés a permis de construire un indicateur d'exposition des portions de route (en km) traversant les cônes de déjection délimités par le LGP. Cet indicateur permet de hiérarchiser sommairement l'exposition des routes aux phénomènes potentiels de crues et laves torrentielles. Il a une valeur indicative et présente surtout un intérêt comparatif. Cette exposition pourrait être combinée à son tour avec les fréquences ou les probabilités de crues pour chaque torrent afin de déboucher sur un indice de risque d'impact potentiel des routes. A la lumière de cet indicateur d'exposition, on peut voir que c'est le cône torrentiel du torrent de l'Arbonne sur la commune de Bourg-Saint-Maurice qui présente le plus d'enjeux routiers (19 km cumulés) (**figures D.1 et D.2**).

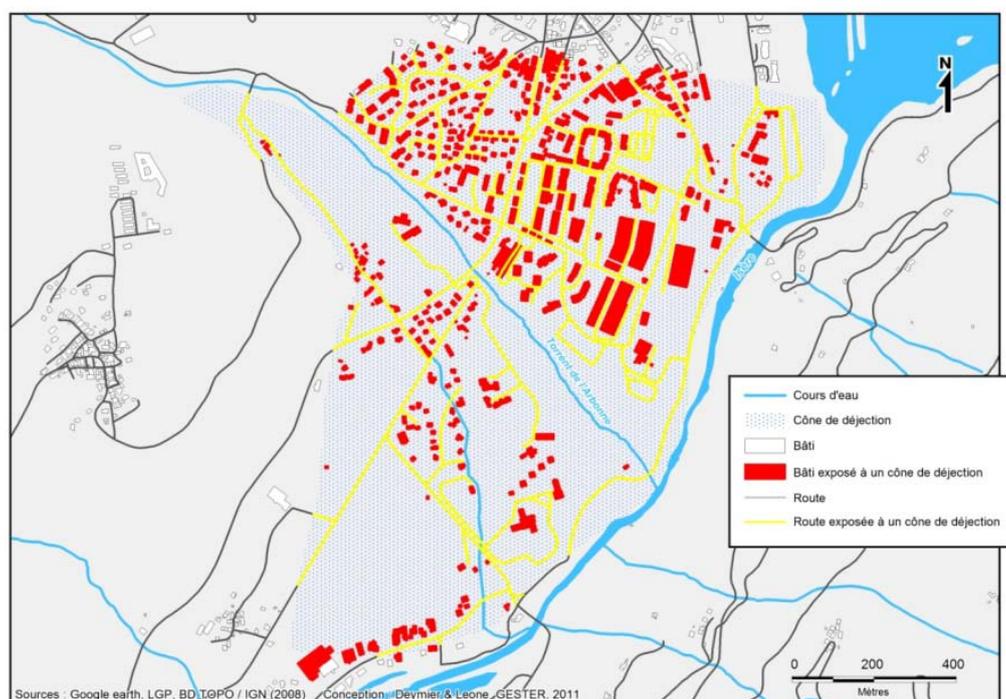


Figure D1 – Exposition du réseau routier et du bâti dans le cône torrentiel de l'Arbonne (Bourg St. Maurice, Savoie)

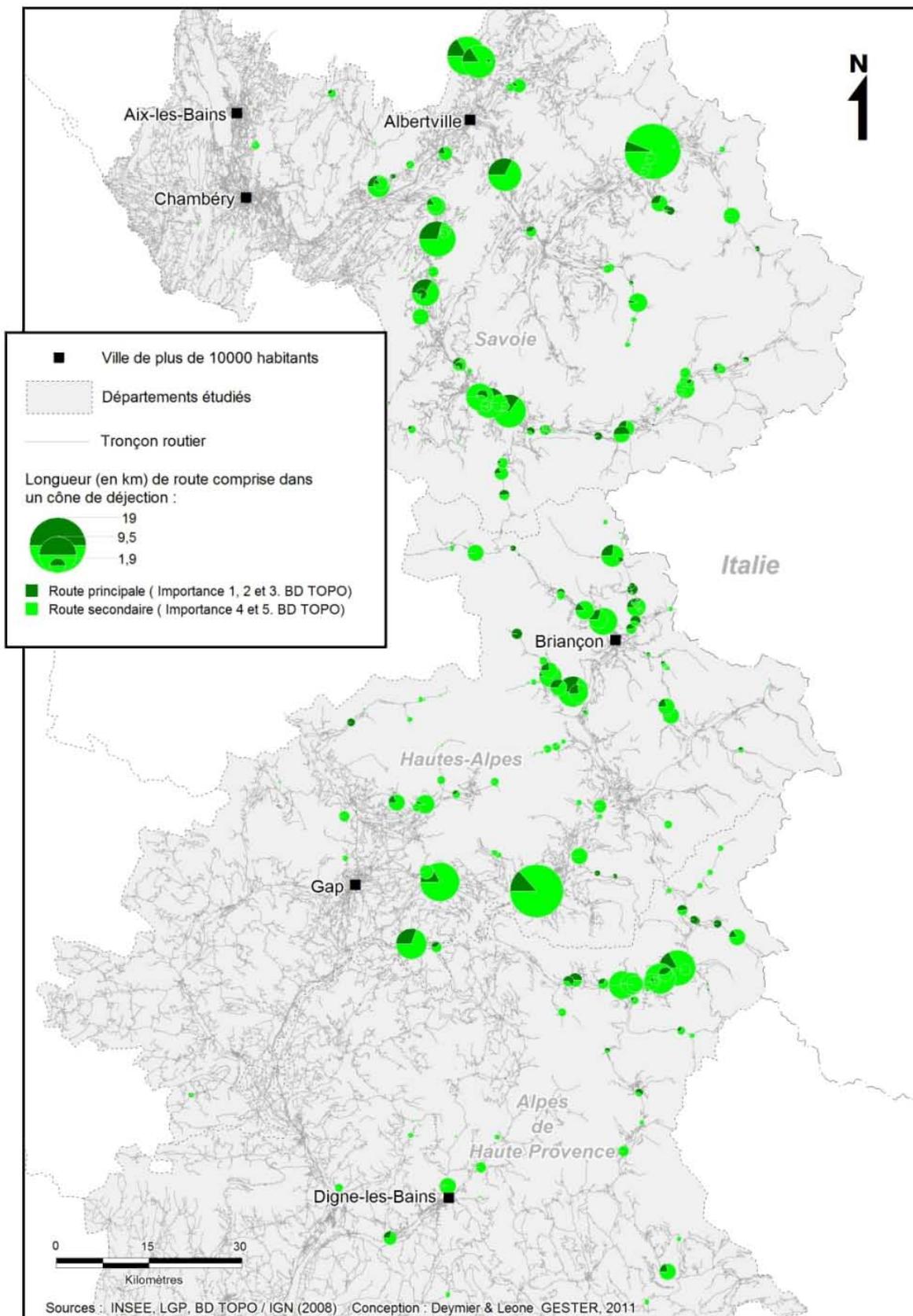


Figure D2 – Indicateur d'exposition du réseau routier compris dans chaque cône de déjection torrentiel (longueurs cumulées en km).

D.2 INDICES DE RISQUE DE PERTURBATION FONCTIONNELLE

D.2.1 LES COMPOSANTES DES INDICES

Le **risque de perturbation fonctionnelle** d'un tronçon routier peut se définir par une probabilité de dysfonctionnement. Comme toute notion de risque, la mesure de ce risque doit intégrer une notion d'**aléa** (le phénomène potentiellement dommageable), une notion de **vulnérabilité** (de l'élément/tronçon exposé) et une notion de **valeur** (fonctionnelle et/ou d'usage) de ce tronçon au regard de l'ensemble du réseau auquel il est connecté en temps normal. Nous différencions ce risque de perturbation fonctionnelle d'un tronçon routier, du risque de dégradation de l'accessibilité territoriale assurée par un réseau routier.

D'un point de vue théorique, **l'aléa** peut être considéré ici comme une fonction de trois probabilités dans un temps et sur un lieu donnés :

- Une probabilité d'occurrence (P_o) d'un phénomène potentiellement dommageable (*debris flows* ici) ;
- Une probabilité qu'à ce phénomène d'atteindre l'élément exposé (P_a) ;
- Une probabilité qu'à cet élément exposé de se trouver présent au moment de l'arrivée du phénomène (P_p) ;

La **vulnérabilité du tronçon routier** peut être mesurée par un taux d'endommagement (ou de dysfonctionnement) potentiel. Pour la vulnérabilité physique, ce taux va dépendre de la magnitude du phénomène et de la nature du tronçon. Pour la vulnérabilité fonctionnelle, ce taux va dépendre de la vulnérabilité physique (intensité des dommages) et de la capacité de rétablissement du tronçon concerné.

La **valeur fonctionnelle d'un tronçon routier** peut se définir au moyen de plusieurs critères : sa possibilité ou non d'être remplacée (longueur de déviation, si possible), son poids pour l'ensemble du réseau routier.

La **valeur d'usage d'un tronçon routier** peut se caractériser par sa fréquentation (comptage routier), par le nombre de personnes desservies par ce tronçon, ou indirectement par le gabarit de la route (le type de route) qui est en général adapté au flux moyen qui y transitent.

Dans la cadre de cette étude et en attendant de disposer de données plus précises sur les conditions de déclenchement et de propagation des phénomènes (évaluation de l'aléa local), nous proposons deux premiers indices expérimentaux de risque de dysfonctionnement (**IRd**) de tronçon routier. Ils sont basés respectivement sur les fréquences historiques d'impacts depuis 1950 (**Fi** : indicateur combiné d'aléa et de vulnérabilité) et deux indicateurs de valeur fonctionnelle : la longueur minimale de déviation possible du tronçon (**Ld**) et l'indice de destruction (**Id**). Afin d'obtenir des indices mesurables entre 0 et 1, chacune des variables a été divisée par sa valeur maximale.

- Le premier indice de risque de dysfonctionnement **IRd1 (0-1) = $F_i/F_{i\max} * L_d/L_{d\max}$**
- Le second indice de risque de dysfonctionnement **IRd2 (0-1) = $F_i/F_{i\max} * I_d/I_{d\max}$**

Une fois ces indices quantitatifs établis, nous procéderons à l'intégration qualitative de la **valeur d'usage** des tronçons routiers au moyen d'une matrice de risque de dysfonctionnement.

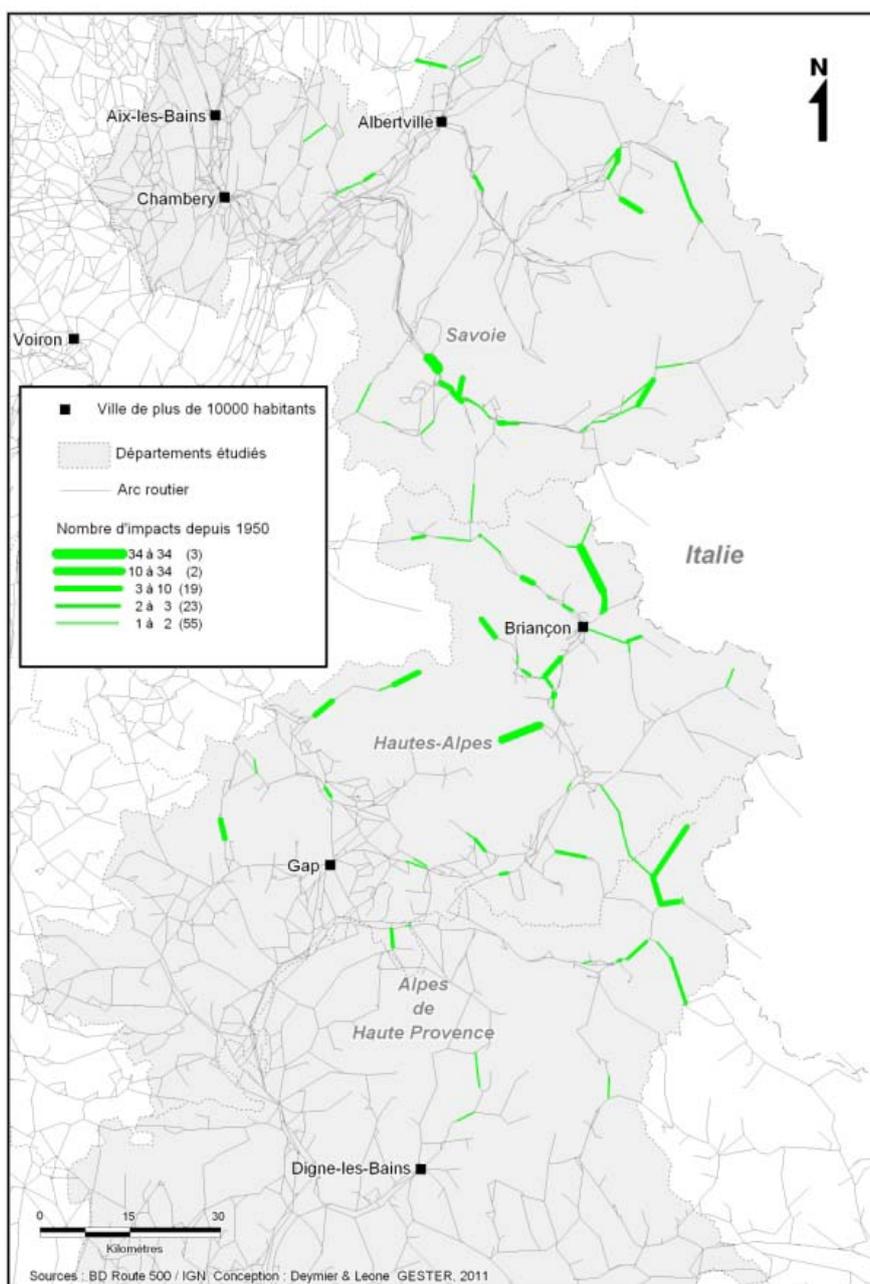


Figure D3 - Classification des tronçons vulnérables en fonction du nombre d'impacts de *debris flows* depuis 1950. Variable Fi.

La plus forte fréquence d'impact (Fi) connu depuis 1950 sur notre réseau routier est de 34 évènements (**figure D4**).

Les deux indicateurs de valeur fonctionnelle utilisés (Ld et Id) ont été obtenus après construction d'un graphe routier valué issu de la base de données SIG Route500 de l'IGN.

Le logiciel RouteFinder nous a permis d'extraire facilement les longueurs de déviation minimales (Ld) de chacun des 111 tronçons exposés. La cartographie des Ld est présentée **figure D4**. La valeur maximale est de 218 km. Une valeur arbitraire de 436 km (double de la valeur maximale) a été attribuée aux tronçons ne disposant d'aucune possibilité de déviation (20 tronçons) pour bien faire ressortir leur grande valeur fonctionnelle et stratégique, puisque irremplaçables.

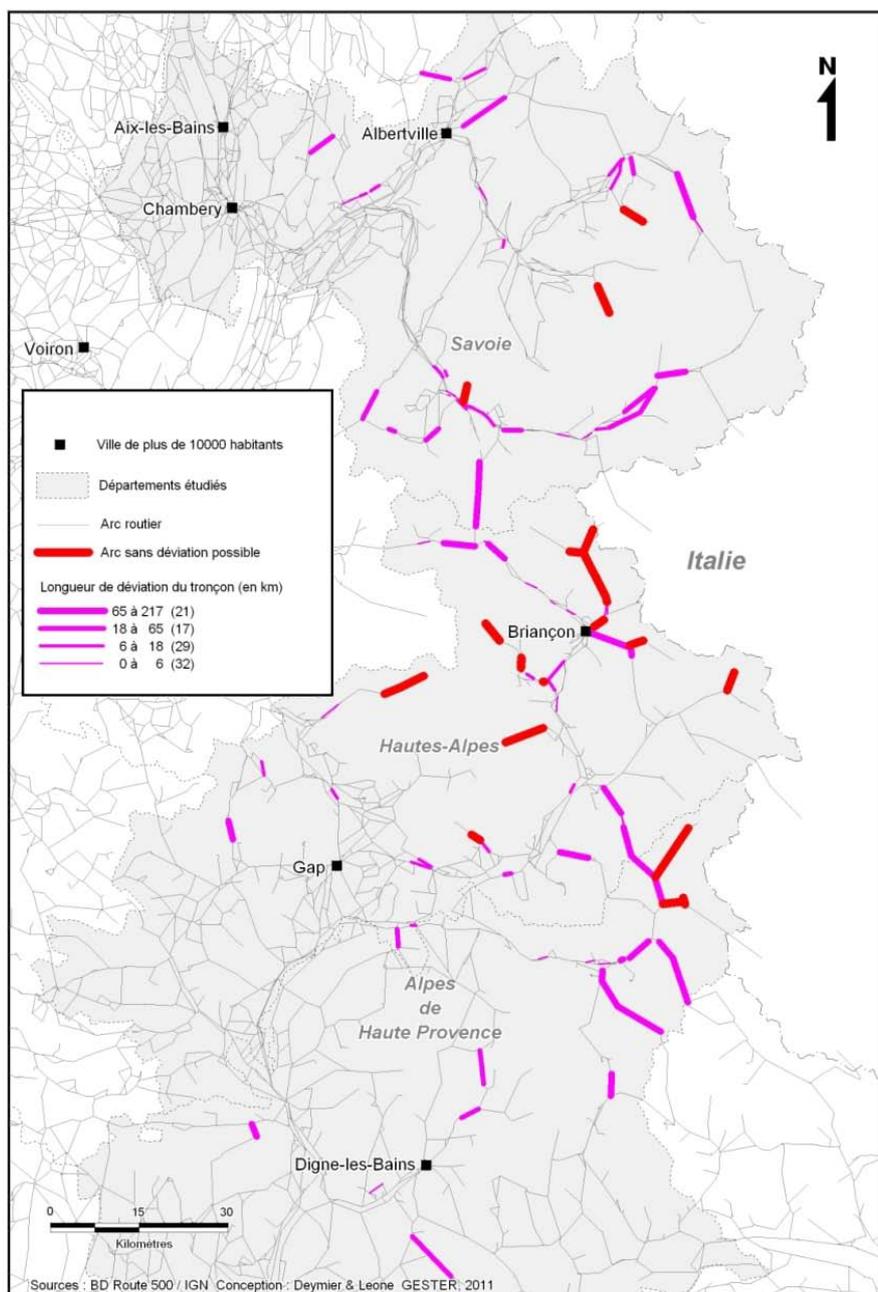


Figure D4 - Classification des tronçons vulnérables (déjà impactés) en fonction de leur longueur de déviation minimale (en km). Variable Ld.

Le second indice (Id), basé sur la destruction des liens du réseau (graphe) (Id) est développé dans le paragraphe suivant. Il a déjà été expérimenté à deux reprises par Appert et Chapelon (2006).

D.2.2 INDICE DE VALEUR FONCTIONNELLE PAR DESTRUCTION DE LIEN DU RESEAU (ID)

L'indice proposé ici traduit la perte d'accessibilité globale subie par les nœuds d'un réseau et donc par le territoire qu'ils irriguent, à la suite de la suppression de chacun des liens individuellement. La suppression d'un arc du graphe permet de simuler une coupure accidentelle du lien de réseau qu'il représente. Dans certains cas, cette suppression peut entraîner la perte de connexité du réseau, c'est-à-dire l'impossibilité pour un automobiliste

ou des secours de se rendre en tel ou tel lieu. L'accessibilité globale est évaluée par la somme des temps minimaux (en minutes) de parcours entre tous les nœuds du réseau (algorithme de Floyd). Il s'agit de calculer l'indice de dispersion d'un réseau. Pour ce faire, une fois les temps de parcours calculés sur l'ensemble des arcs du graphe, on procède à la recherche des itinéraires optimaux.

Sous sa forme originelle, l'algorithme de Floyd a été conçu pour s'appliquer à un 1-graphe, ce qui signifie qu'entre un couple i, j de sommets adjacents il ne peut pas exister plus d'un arc dans chaque sens (i, j et j, i). Pour chaque couple i, j de sommets du graphe, l'algorithme cherche, pour tout sommet k , s'il n'existe pas un chemin plus court que le chemin $l(i, j)$ passant par k (**figure D5**). Dès qu'il en trouve un, il modifie la valeur de $l(i, j)$ dans la matrice des chemins et continue la recherche avec cette nouvelle valeur.

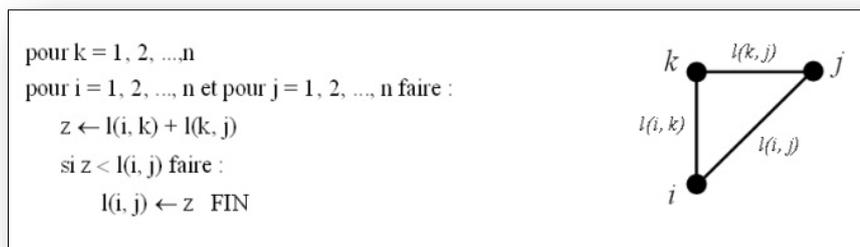


Figure D5 - Principes généraux de l'algorithme de Floyd

Ce type d'algorithme est particulièrement adapté pour le calcul des cheminements routiers. Une fois les plus courts chemins calculés entre tous les sommets du graphe il est possible d'en faire la somme afin d'obtenir une valeur de référence unique servant de base de comparaison. C'est la **première étape** du calcul de l'indice de destruction (**figure D6, étape 1**).

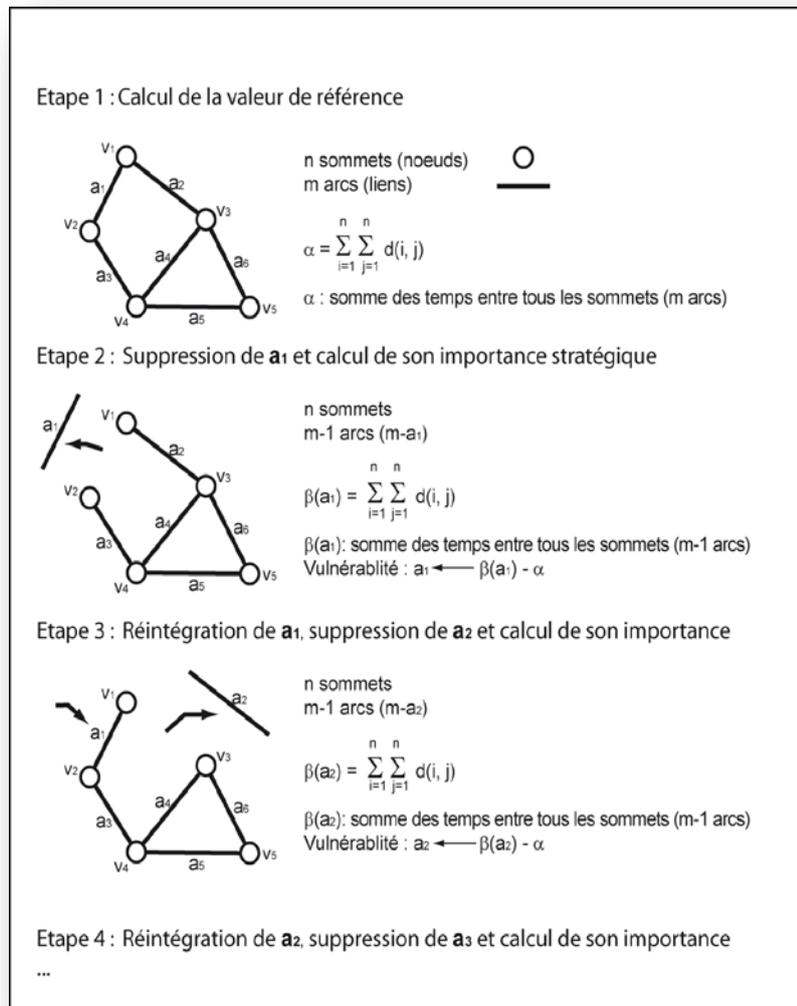


Figure D6 : principe de construction de l'indice de valeur fonctionnelle par destruction des liens

Lors de la deuxième étape, l'algorithme supprime automatiquement le premier arc de la liste (**figure D6, étape 2**). La somme des temps minimaux de parcours est ainsi recalculée à réseau incomplet, c'est-à-dire à réseau altéré par un incident empêchant l'utilisation de cet arc. Cette somme est au mieux égale, mais généralement supérieure, à la valeur de référence précédente. Elle est comparée, par soustraction, à cette dernière pour donner l'indice de destruction. La valeur de cet indice est affectée à l'arc supprimé.

Plus la différence est élevée, plus la perte d'accessibilité globale occasionnée par la suppression du lien est forte et plus ce dernier joue un rôle stratégique dans le fonctionnement du réseau. Le même exercice de comparaison des valeurs d'accessibilité entre réseau complet et incomplet est ensuite réalisé pour chacun des 109 autres arcs du graphe individuellement après avoir préalablement replacé dans le graphe l'arc supprimé à l'étape précédente (**figure D6, étapes 3 et 4**).

Cette démarche systématique se veut complémentaire des approches classiques consistant à supprimer a posteriori tous les liens touchés par un incident et à évaluer, au cas par cas, les conséquences sur l'accessibilité des territoires.

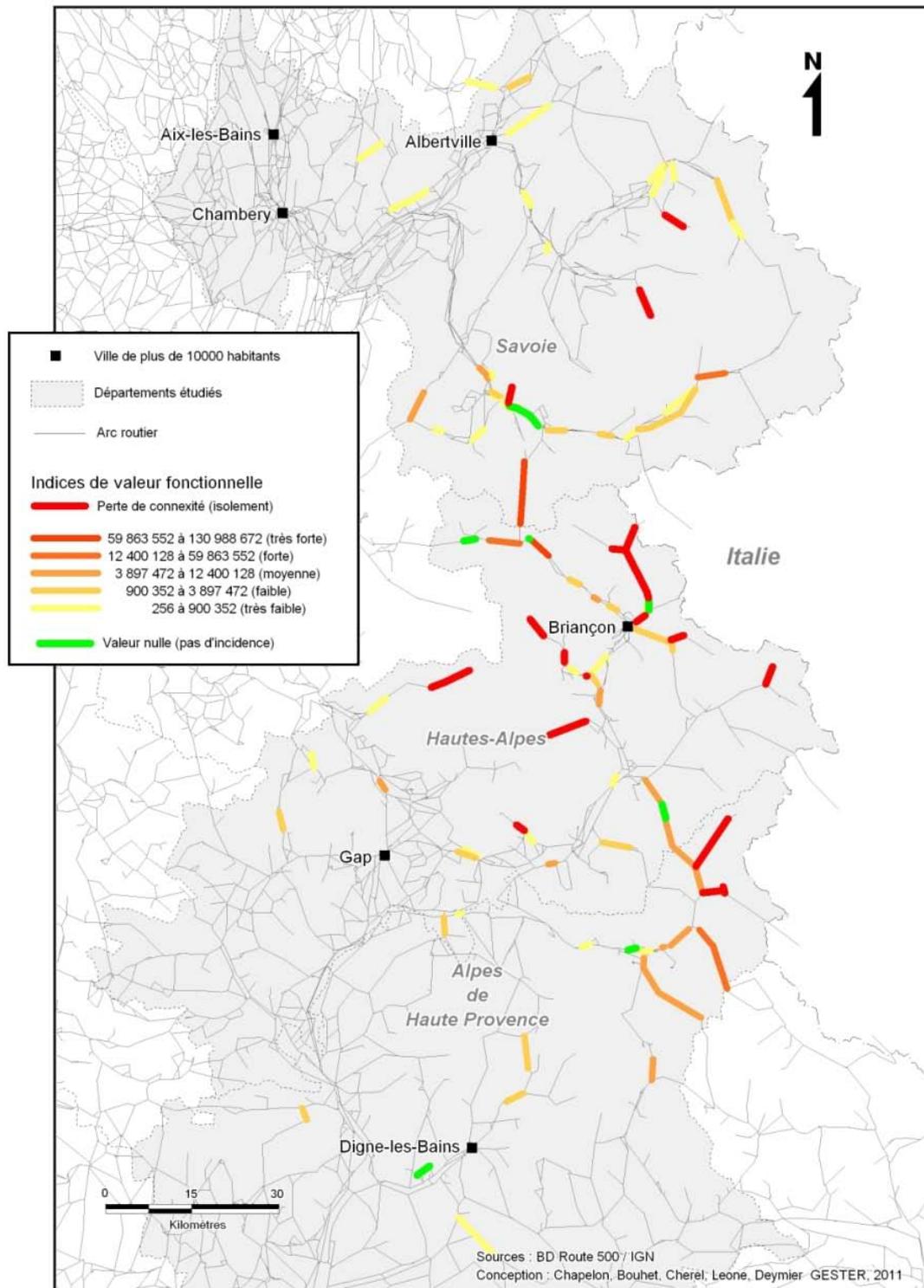


Figure D7 - Classification des tronçons vulnérables en fonction de leur valeur fonctionnelle obtenue par destruction de lien du réseau. Variable Id.

Trois grands types d'informations peuvent être dégagés de l'analyse des résultats de cet indice de valeur fonctionnelle par destruction (figure D7).

- **Perte de connexité** : cela signifie que la coupure du tronçon rendrait un ou plusieurs nœuds inaccessibles. Il s'agit d'une information essentielle car la connexité est la propriété première d'un réseau. Ne plus pouvoir accéder signifie ne plus pouvoir approvisionner les habitations et ne plus pouvoir les secourir en cas de danger. Ainsi, le tronçon concerné par la coupure est particulièrement stratégique pour le

fonctionnement du réseau. Sa mise en sécurité doit être une priorité pour les aménageurs. 20 tronçons sur 110 sont concernés par une perte de connexité du graphe en cas de coupure. Ce chiffre élevé s'explique par la morphologie du réseau routier en zone de montagne. En effet, de nombreuses routes d'accès ne disposent pas d'alternatives. Leur coupure rend donc l'accès totalement impossible. Une valeur arbitraire de 261 977 344 mn (double de la valeur maximale) a été attribuée à ces tronçons pour bien faire ressortir leur grande valeur fonctionnelle.

- **Indice de valeur nulle** : cela signifie que le tronçon n'est jamais emprunté par les cheminements optimaux. Sa coupure n'aurait donc aucune incidence fonctionnelle dans la mesure où un itinéraire alternatif, plus performant, lui est systématiquement préféré. Aucune intervention d'aménagement anticipatrice n'est à prévoir sur ce tronçon. 6 tronçons sur 110 ont une valeur nulle. Cela ne concerne que quelques tronçons en concurrence directe avec des voies plus performantes, souvent contiguës. La valeur de 1 a été attribuée à ces tronçons pour traduire leur faible valeur fonctionnelle et permettre le calcul de l'indice de risque final.
- **Indice de valeur positive** : cela signifie que la coupure du tronçon occasionnerait des détours aux automobilistes. Plus la valeur de l'indice est élevée plus les détours sont importants, plus le tronçon occupe une place stratégique dans le réseau. L'indice de destruction permet ici de hiérarchiser les tronçons en fonction de leur importance. Les actions d'aménagement anticipatrices sur le réseau routier doivent concerner en priorité les tronçons les plus stratégiques, c'est-à-dire ceux qui ont un indice élevé. 84 tronçons sur 110 ont une valeur positive dont 5 renvoient à une valeur fonctionnelle très forte, 4 à une valeur forte, 17 à une valeur moyenne, 25 à une valeur faible et 37 à une valeur fonctionnelle très faible. La valeur maximale obtenue est de 130 988 672.

D.2.3 CARTOGRAPHIE DU RISQUE DE DYSFONCTIONNEMENT

Les résultats des indices **IRd1** et **IRd2** sont cartographiés sur le graphe routier (réseau schématisé) et expriment un risque de dysfonctionnement. Nous avons classé les niveaux de risque (compris entre 0 et 1) en 4 classes basées sur les seuils observés. Les tronçons les plus à risque sont donc en théorie ceux qui présentent la plus forte probabilité d'entraîner le plus fort préjudice fonctionnel, exprimé en **distance d'allongement** de parcours pour le premier indice (IRd1) et en **perte de connectivité** (et par voie de conséquence d'accessibilité territoriale) pour le second indice (IRd2). A ce stade d'élaboration, ces indices n'intègrent pas la valeur d'usage du tronçon routier, élément permettant de relativiser l'impact fonctionnel d'une coupure pour la collectivité. Néanmoins, l'affichage de la hiérarchie routière (4 classes de type de route) permet de rendre compte visuellement de ce double impact, à la fois fonctionnel et utilitaire (**figure D8**). Aussi, nous avons tenté d'intégrer qualitativement la valeur d'usage du tronçon au moyen d'une matrice de niveau de risque basée sur les 4 classes d'IRd et les 4 classes de routes (**tableau D1**). En l'absence de données de comptage routier sur l'ensemble du réseau, nous considérons que ces classes de route permettent de hiérarchiser la valeur d'usage des tronçons (proportionnelle au flux de véhicules). D'après l'IGN, fournisseur de la donnée Route500, « le champ **vocation** matérialise une hiérarchisation du réseau routier basée, non pas sur un critère administratif, mais sur l'importance des tronçons de route pour le trafic routier. Ainsi, les quatre valeurs « type autoroutier », « liaison principale », « liaison régionale » et « liaison locale » permettent un maillage de plus en plus dense du territoire. » (IGN, 2009).

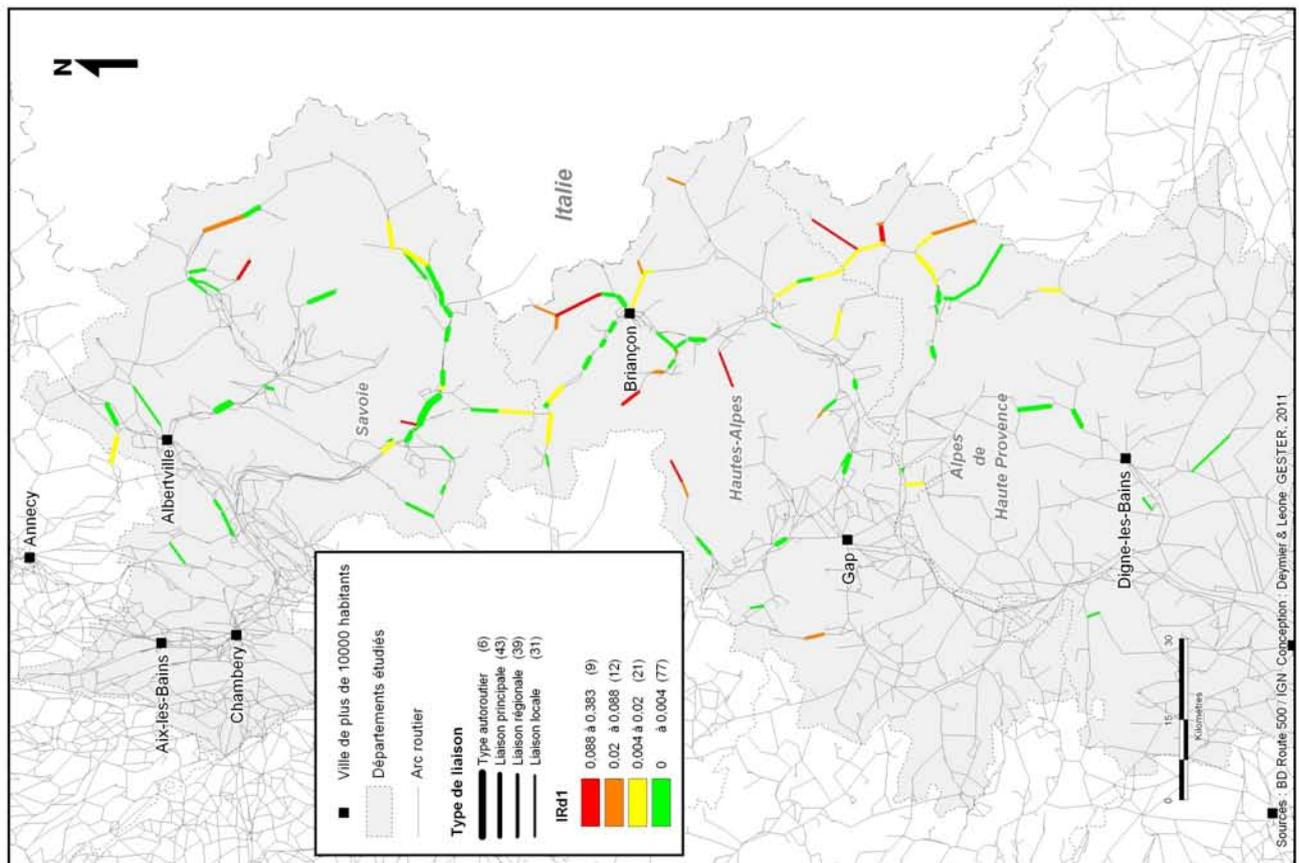
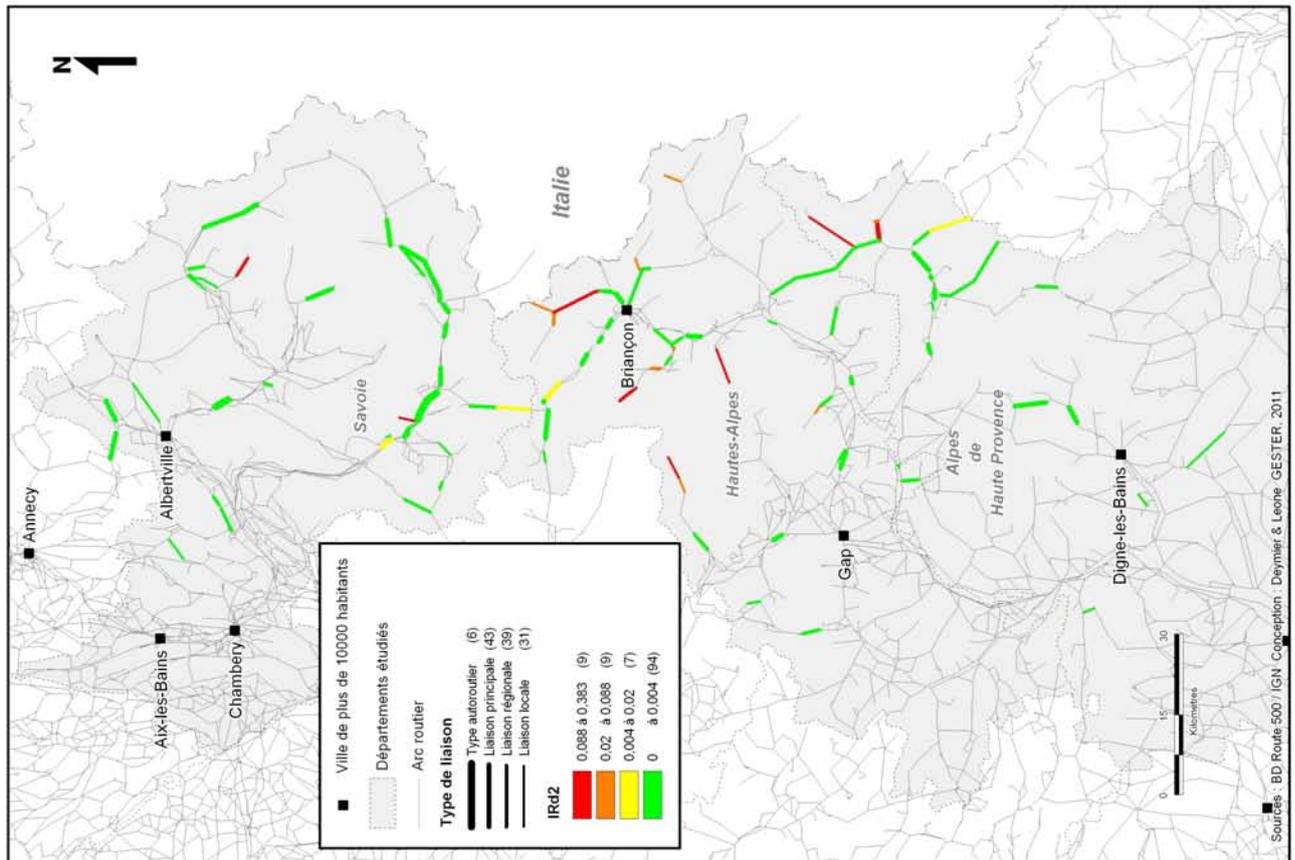


Figure D8 – Indices de risque de dysfonctionnement (Ird1 et IRd2) sans intégration des valeurs d’usage

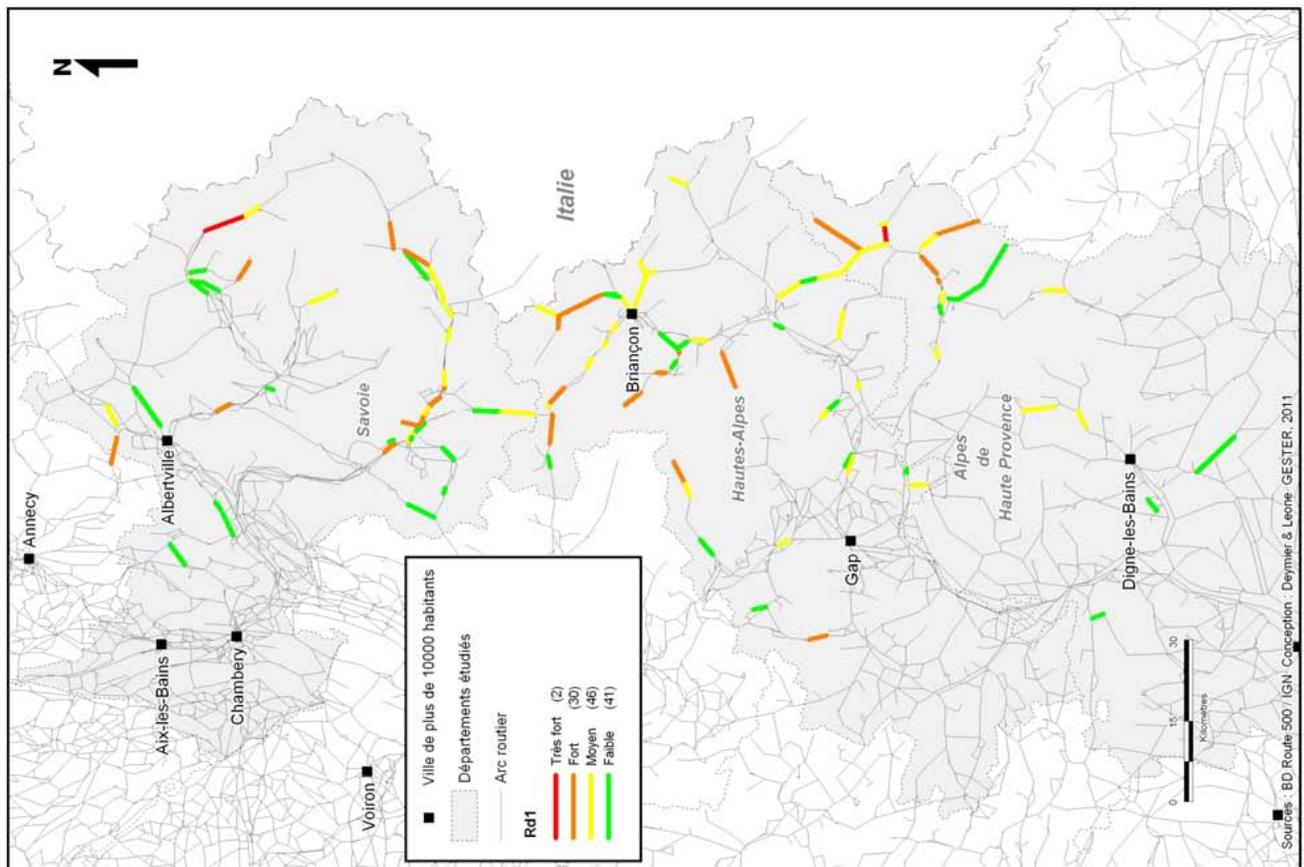
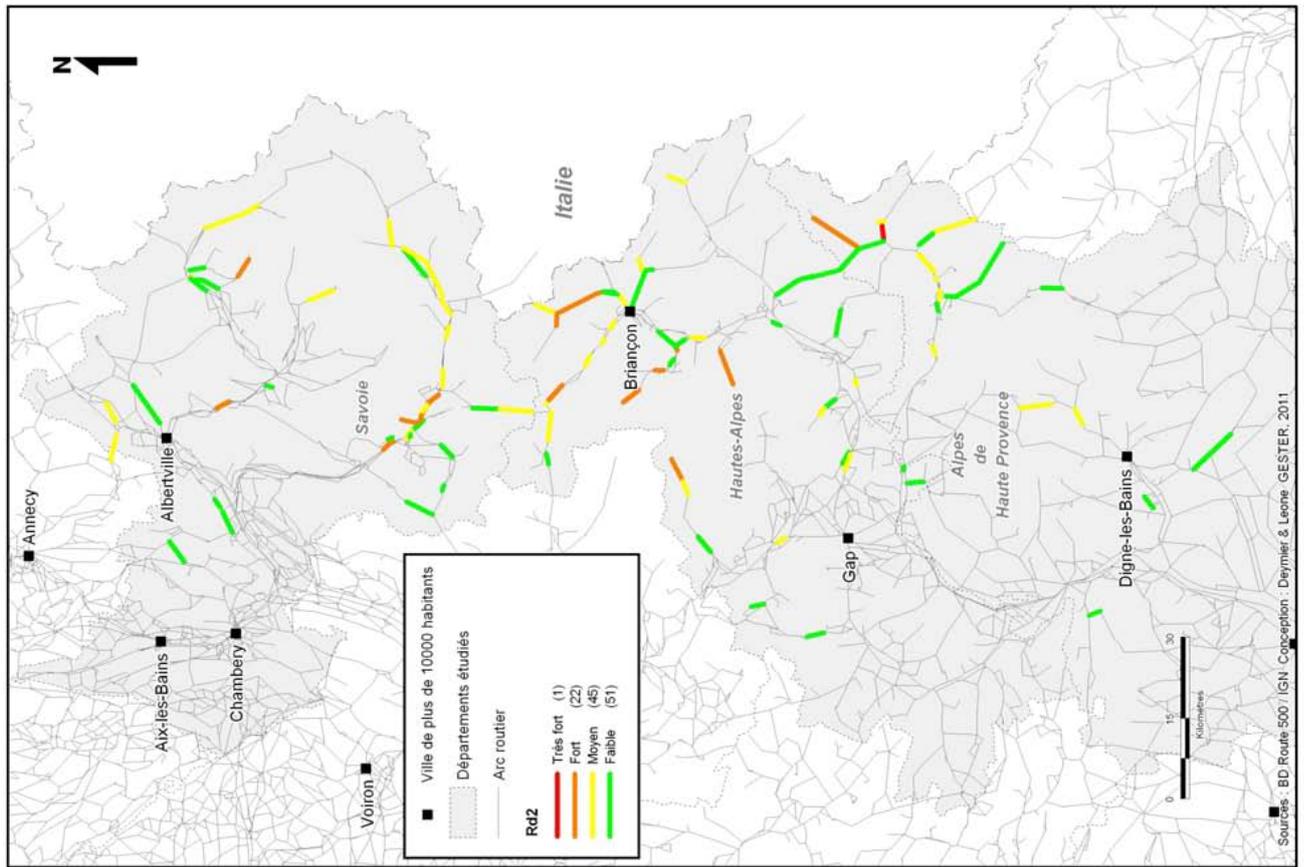


Figure D9 – Risque de dysfonctionnement (Rd1 et Rd2) avec intégration des valeurs d’usage des tronçons routiers

		Type de route (valeur d'usage)			
		Liaison locale	Liaison régionale	Liaison principale	Type autoroutier
Classe IRd	Faible (0-000,4)	1	1	2	3
	Moyen (0,004-0,02)	1	2	3	3
	Fort (0,02-0,088)	2	3	4	4
	Très fort (0,088-0,383)	3	3	4	4

Tableau D1 – Matrice de risque de dysfonctionnement permettant d'intégrer la valeur d'usage du tronçon routier (type de route)

Le traitement cartographique de cette matrice permet de synthétiser l'intégration de ces deux familles de valeur fonctionnelle (**figure D9**). Les résultats sont comparables entre les deux indices construits sur les mêmes discrétisations et hiérarchisations, mais le second indice a tendance à minimiser les niveaux de risque supérieurs. Les tronçons les plus à risque sont ceux qui méritent une vigilance particulière de la part des pouvoirs publics en matière de prévention ; pour limiter les allongements de parcours, les pertes d'accessibilité et les nuisances pour le plus grand nombre d'usagers en cas de coupure.

E MODELISATION DE LA DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE TERRITORIALE PAR VOIE ROUTIERE

E.1 UN RESEAU ROUTIER STRATEGIQUE MAIS VULNERABLE

Les départements des Hautes-Alpes (05), des Alpes-de-Haute Provence (04) et de Savoie (73) ont comme particularité d'être en partie ou en totalité en zone montagneuse. Le 05 par exemple est le département français le plus élevé de France. Ce caractère de haute montagne a particulièrement marqué le développement et l'aménagement de ces territoires. « Il impose un fort cloisonnement et des ouvrages d'art complexes, viaducs, encorbellements, tunnels pour absorber une circulation internationale croissante » (Piercy, 2005). Les fortes pentes peuvent être une gêne pour le développement du réseau routier. Les principaux axes routiers se trouvent souvent en fond de vallée, longeant le cours d'eau. Les routes desservant les versants sont plus étroites que la moyenne et soumises à une sinuosité importante pour diminuer les effets de la pente. Les phénomènes naturels dommageables obligent les gestionnaires des réseaux à mettre en place des mesures protectrices pour limiter la vulnérabilité de certains axes stratégiques.

La topographie et le climat jouent en défaveur du réseau routier alpin. Cependant il est nécessaire de prendre en compte son importance pour la vitalité locale de la région mais aussi pour le commerce européen. En effet les routes alpines ont de tout temps permis la desserte des sociétés locales. Le transport alpin représente 8 à 10% du trafic international. Avec la massification des sports d'hiver et l'essor des stations touristiques de montagne des aménagements coûteux ont dû être réalisées pour permettre ou améliorer l'accès aux différents sites.

E.2 MODELISATION MULTIPOLAIRE DE L'ACCESSIBILITE A L'ETAT NORMAL

Afin de mettre en évidence l'altération de l'accessibilité nous avons dû préalablement définir l'accessibilité à l'état normal, c'est-à-dire en présence d'un réseau routier « sain » avec tous les cols ouverts (situation estivale). En utilisant un réseau non altéré nous pouvons ainsi établir une accessibilité optimale et théorique de référence, idéale pour établir des comparaisons avec des accessibilités dégradées par coupures de voies et/ou fermeture de cols (**figure E1**).

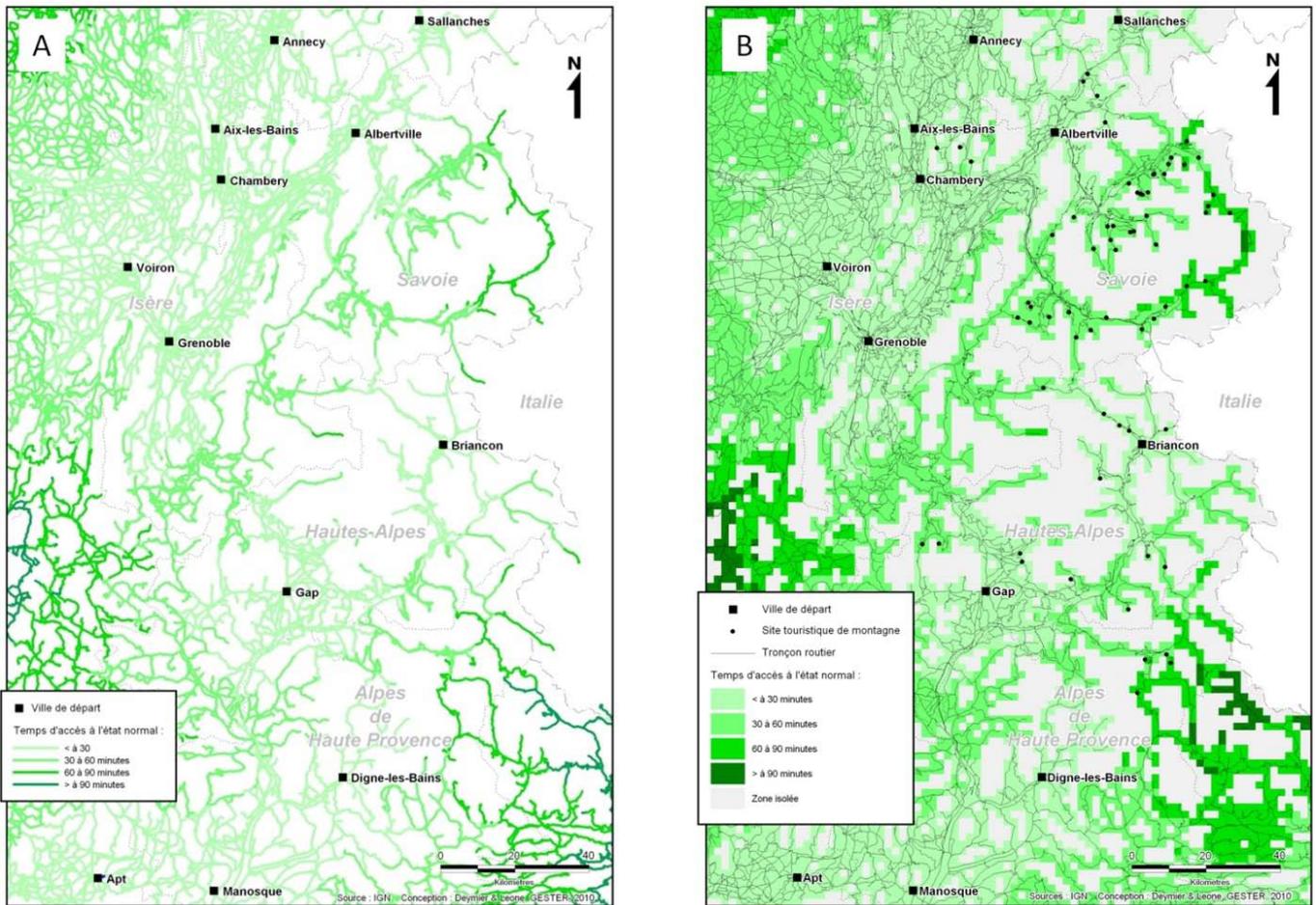


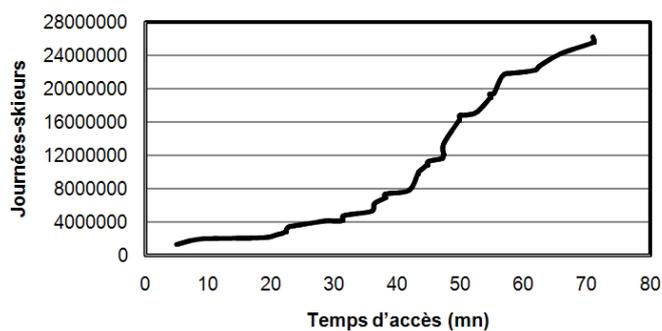
Figure E1 - Accessibilité routière à l'état normal au départ des 14 villes de plus de 10 000 habitants les plus proches (en mn). Cols ouverts.
Représentation linéaire (A) et surfacique (B) des temps d'accès au territoire (en mn)

Les lieux de départ choisis sont les villes de plus de 10 000 habitants et les lieux d'arrivée sont variables suivant les enjeux territoriaux pour lesquels on a cherché à définir cette accessibilité : les sites de stations touristiques (**figure E2**), les centroïdes des communes, les mailles territoriales de 2 km de côté.

Modélisation de l'accessibilité routière
 au départ des 14 agglomérations
 de plus de 10 000 habitants
 les plus proches

Représentation ponctuelle

Temps d'accès aux sites touristiques (ski)
 cols ouverts



Temps d'accès aux journées-skiers

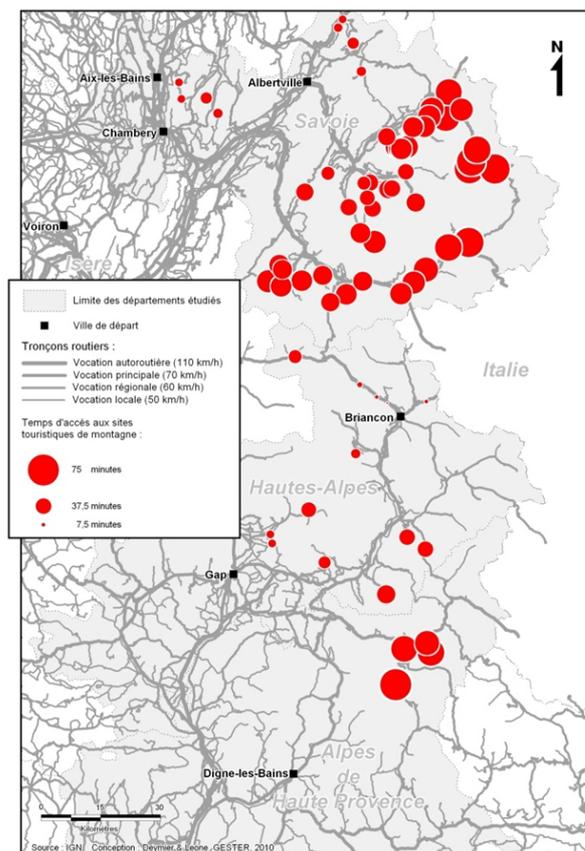


Figure E2 - Accessibilité routière à l'état normal des sites touristiques au départ des villes de plus de 10000 habitants les plus proches (en mn)

La fermeture des cols (situation hivernale) entraîne une première forme de dégradation de l'accessibilité territoriale que l'on peut mesurer et cartographier au moyen de la perte de temps d'accès vers les différentes mailles du territoire (**figure E3**). Cette perte de temps obtenue par modélisation multipolaire constitue un indicateur de dégradation de l'accessibilité territoriale. Ce mode de traitement cartographique par carroyage est très commode pour calculer les enjeux affectés par cette dégradation de l'accessibilité.

Modélisation de l'accessibilité routière
au départ des 14 agglomérations
de plus de 10 000 habitants
les plus proches

Représentation surfacique (mailles)

Temps d'accès au territoire avec cols fermés

Nom	Ouverture
Col de la Cayolle	Semaine 21 à 43
Col du Galibier	Semaine 23 à 43
Col du Glandon	Semaine 22 à 45
Cormet de Roseland	Semaine 21 à 45
Col de l'Echelle	Semaine 21 à 45
Col des Champs	Semaine 21 à 45
Col de la Madelaine	Semaine 22 à 43
Pas de la Graille	nc
Col d'Allos	Semaine 21 à 45
Col du Noyer	Semaine 21 à 43
Col de la Croix de Fer	Semaine 21 à 44
Col de l'Izoard	Semaine 23 à 42
Col de l'Iseran	Semaine 24 à 41

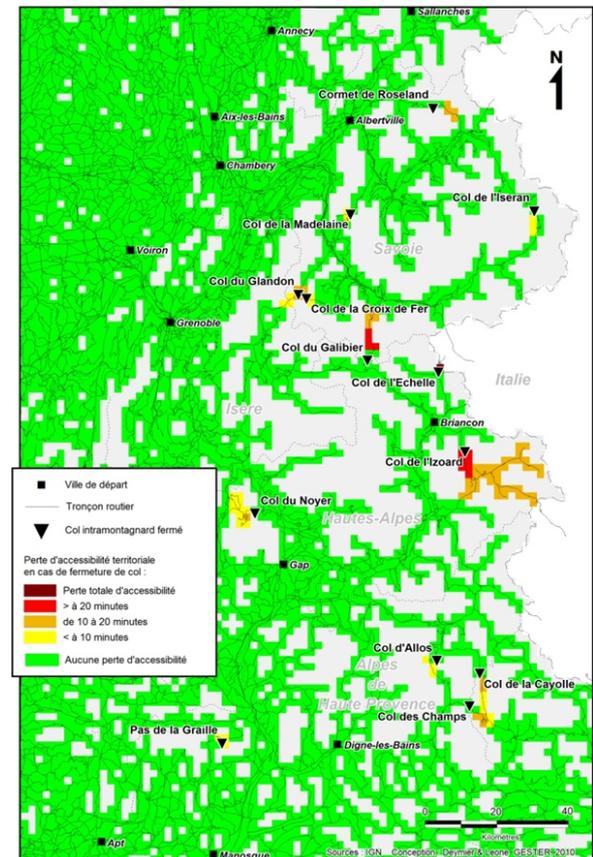


Figure E3 - Accessibilité routière à l'état normal mais avec cols fermés, au départ des villes de plus de 10 000 habitants les plus proches (en mn)

E.3 PLUSIEURS FAMILLES D'ENJEUX TERRITORIAUX CONSIDERES

La prise en compte des lieux et plus particulièrement de leurs attributs est primordiale lorsque l'on travaille sur l'accessibilité. Pour notre étude, le choix des lieux d'arrivées s'est fait en fonction de leur importance dans la structure territoriale des départements alpins. En effet leur vitalité est directement liée au maintien d'une bonne accessibilité. Ces lieux et leurs attributs sont donc considérés comme des enjeux territoriaux.

E.3.1 LES STATIONS TOURISTIQUES (SKI) : DES MOTEURS ECONOMIQUES VULNERABLES

Dans les Hautes-Alpes, la Savoie et dans une moindre mesure les Alpes-de-Haute-Provence, le tourisme de montagne occupe une place capitale dans l'économie départementale. Des stations de sports d'hiver, émane la grande majorité des revenus locaux. Le chiffre d'affaire annuel généré par les stations de ski des Alpes-de-Haute-Provence est de 7 712 897 euros, celui des Hautes-Alpes de 106 580 634 euros et celui de la Savoie de 511 307 687 euros. A titre d'exemple le tourisme en Savoie mobilise un peu plus de 22 000 emplois directs (environ 16% de l'emploi salarié départemental).

Afin de pouvoir chiffrer les impacts d'une perte d'accessibilité pour chacune des stations nous avons retenu 2 indicateurs d'enjeux associés aux stations : le chiffre d'affaires annuel et le nombre de journées skieurs annuel. Pour les 41 stations de ski renseignées dans notre zone d'étude le chiffre d'affaire global est de 611 153 619 euros pour 2008-2009. Le nombre de

jours skieurs pour ces stations lors de la même période est de 26 683 428. On comprend parfaitement que le chiffre d'affaire des stations est lié en très grande partie au nombre de clients. Si jamais la fréquentation venait à baisser, cela se répercuterait sur le chiffre d'affaire. Il apparaît évident que la bonne santé des stations de ski dépend de l'accessibilité de leurs sites.

E.3.2 LES COMMUNES ALPINES FACES A LA DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE

Les départements des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes et de Savoie sont constitués de 682 communes pour une population totale de 717 347 habitants. Ces communes accueillent aussi plus de 293 039 emplois. Quand on observe la répartition de ces enjeux on peut souligner plusieurs points importants : les communes de hautes montagnes sont faiblement peuplées, les communes les plus peuplées se trouvent être des pôles urbains régionaux importants (Chambéry-Aix les Bains avec plus de 50000 habitants, Albertville-Ugine et 15000 habitants, Dignes-les-Bains avec plus de 10 000 habitants). Ces pôles urbains sont très bien desservis par le réseau routier. En effet, ils bénéficient en plus du réseau local du réseau autoroutier. De plus les axes routiers desservants ces communes sont faiblement exposés au risque de *debris flow*.

Les communes les plus tributaires de tronçons ayant un fort risque d'endommagement sont globalement peu peuplées, quantitativement l'enjeu est donc minime. Cependant, l'Etat français garantit une bonne et équitable accessibilité de son territoire à l'ensemble de ces citoyens. De plus ces communes sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont en déclin (déprise agricole, absence de commerces...). Leurs habitants sont tributaires pour leur bien être de l'accès aux services courants, aux services de santé et de secours. L'étude menée par Leone (1996) sur l'enclavement de la commune de Boulc dans le Diois a parfaitement montré combien ces communes naturellement enclavées peuvent être pénalisées en cas de dégradation de leur accessibilité.

E.3.3 DES ENJEUX SOUMIS A DIFFERENTES TEMPORALITES

Dans tout scénario de risque il est important de considérer la temporalité de l'aléa mais aussi des enjeux. En fonction de cette variabilité dans le temps un enjeu peut ou ne pas être présent dans une zone de danger. De plus, suivant le moment, l'importance de l'enjeu n'est pas la même. Nous pouvons citer 3 exemples de périodes d'exposition accrue : les saisons touristiques de montagne, les jours de départs et d'arrivées de vacances, les flux pendulaires domicile-travail.

E.3.3.1 Un tourisme saisonnier

La fonction première des stations touristiques de montagne est bien évidemment la pratique des sports d'hiver. Il est alors évident que ces stations sont tributaires de l'enneigement qui a lieu en période hivernale. La période clef pour ces stations de ski est donc l'hiver. Heureusement le nombre de *debris flows* durant cette période est faible, d'ailleurs on ne compte aucune lave torrentielle ayant affecté le réseau routier en décembre et très peu de novembre à mars (**figure E4**). De plus, ces stations de ski sont bien souvent fermées en

automne ainsi qu'à la fin du printemps. Cependant pour répondre à la demande touristique mais aussi pour diversifier leur offre de loisir, les stations de sports d'hiver tendent à développer de plus en plus le tourisme estival de montagne. Ce tourisme estival devient indispensable à la bonne santé économique des stations. Il bénéficie de plus du climat agréable des vacances scolaires d'été françaises et des autres nations européennes. Le nombre de nuitées en été pour la région Rhône Alpes représente 43% du nombre total. Cette forte fréquentation touristique estivale dans les Alpes est à mettre en relation avec la prédominance des phénomènes de *debris flows* affectant le réseau routier durant cette période. En conséquence on peut estimer qu'une dégradation de l'accessibilité peut être autant dommageable sur les enjeux touristiques en été qu'en hiver. Elle est en tout cas fortement probable en été.

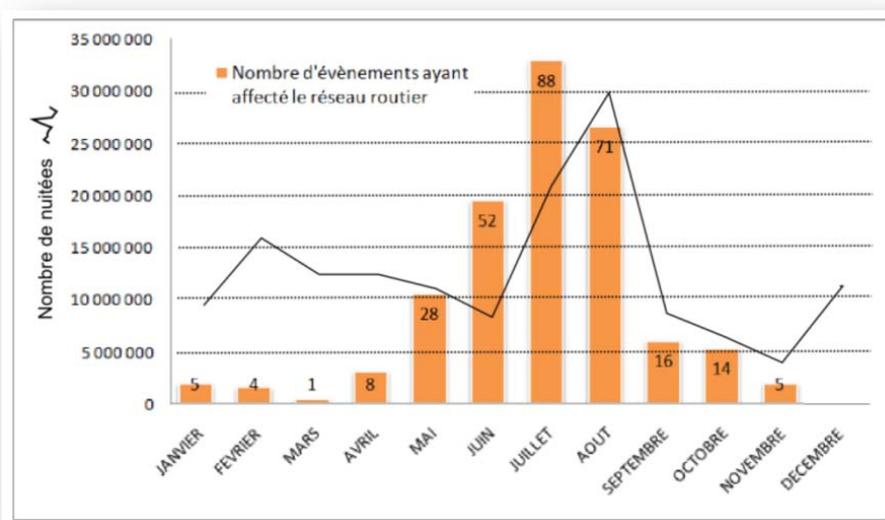


Figure E4 - Comparaison entre la fréquentation touristique en Rhône-Alpes et le nombre de *debris flows* ayant affecté le réseau routier des départements 04, 05 et 73 (sources RTM, CG05, Observatoire du tourisme de la région Rhône-Alpes)

E.3.3.2 Des flux routiers important lors des weekends « chassés-croisés »

Les grands weekends de départs et de retours de vacances entraînent une augmentation considérable des flux routiers. Si le réseau routier subit à ce moment là une « amputation » d'un ou de plusieurs de ces tronçons, la dégradation de l'accessibilité risque de s'accroître. En effet en raison du report des usagers sur d'autres routes déjà saturées, le nombre et la durée des ralentissements du trafic vont aller en augmentant.

E.3.3.3 Les flux pendulaires domicile-travail

L'horaire d'apparition d'une dégradation de l'accessibilité à aussi son importance. Le réseau routier local est particulièrement utilisé en début et en fin de journée. Le réseau routier doit à ces moments là supporter les flux des personnes se rendant sur leurs lieux de travail, que ce soit en voiture ou avec des moyens de transport en commun.

E.4 MODELISATION DE LA DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE TERRITORIALE POUR DEUX SCENARIOS A DEBRIS FLOWS

La dégradation de l'accessibilité routière face à des phénomènes de *debris flows* peut être modélisée et analysée par le biais de scénarios. Ces scénarios peuvent être explicatifs (reproduction et compréhension d'un évènement passé) ou bien prédictifs (simulation d'un évènement futur afin de s'y préparer). Le principe de la méthode reste le même. Le choix de l'une ou l'autre des approches dépendra des objectifs recherchés (expliquer ou prévenir). Dans le cadre de cette recherche nous avons opté pour deux scénarios explicatifs qui permettent de revenir sur deux évènements anciens et de tester la robustesse de notre méthode. Mais de tels scénarios peuvent être déclinés à volonté et rapidement dans un environnement SIG grâce aux différentes bases de données constituées. Ces possibilités donnent à notre méthode un caractère d'aide à la décision en prévision d'un évènement.

E.4.1 CHOIX DES SCENARIOS

Nous avons choisi les deux scénarios en fonction de critères liés directement aux évènements. On a tout d'abord opéré un tri suivant les durées des épisodes pluviométriques, le nombre de tronçons touchés pour un même épisode, et l'intensité des dommages et des perturbations³. Puis nous avons effectué une rapide phase de test pour déterminer le nombre approximatif de lieux affectés. Enfin, suite à un autre test basé cette fois ci sur le temps d'accès, nous avons gardé les scénarios dont au moins l'un des tronçons coupés entraînait une déviation d'au moins 30 minutes, considérée pénalisante, ou du moins moyennement tolérable, pour un automobiliste. Suivant les usagers de la route, les seuils de tolérance peuvent être différents : une personne se rendant sur son lieu de travail peut considérer un rallongement de 10 minutes de son trajet comme dérangeant, surtout si cela dure plusieurs jours, les transports de marchandises peuvent « encaisser » un rallongement de courte durée tant que cela ne compromet pas leurs circuits économiques. Des touristes se rendant en stations de ski pour une semaine peuvent accepter plus facilement un rallongement d'une heure (bien qu'il faille prendre en considérations des contraintes d'horaires liées aux locations). Par ailleurs, nous avons recherché des scénarios impactant des territoires différents (**figure E5**).

Le premier scénario retenu correspond à l'évènement du 24 juillet 1996, ciblé sur la Savoie. Le second scénario a une emprise spatiale et temporelle plus importante. Il rejoue des évènements qui ont affecté les départements des Hautes-Alpes et des Alpes-de-Haute-Provence du 19 au 21 juin 2005, donc durant trois jours.

³ Nous avons décidé dans l'élaboration des scénarios que faute d'information supplémentaire sur la perturbation fonctionnelle maximale observée, P équivalait à une coupure sans indication de durée.

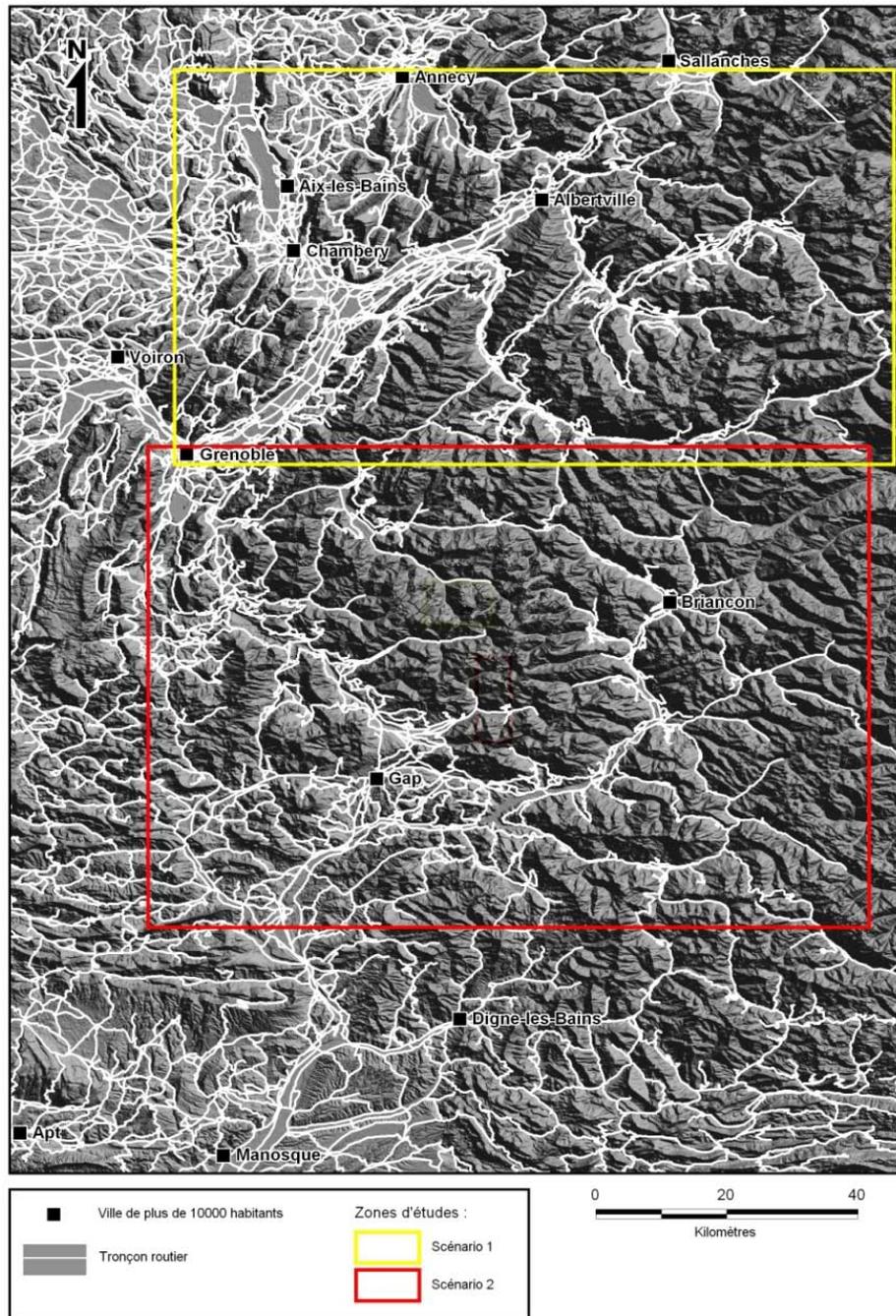


Figure E5 - Emprise spatiale des deux scénarios d'accessibilité

E.4.1.1 Scénario n°1 (juillet 1996)

Présentation

Le 24 Juillet 1996 une lave torrentielle s'est produite dans le torrent du Nant Cruet sur la commune de Sainte Foy en Tarentaise. D'après un rapport du BRGM⁴ (1996) des matériaux boueux se sont répandus depuis le ruisseau « les Achets » et ont rejoint le Nant Cruet qui avait déjà un débit considérable. Le débit et les matériaux transportés étant trop importants

⁴ Ce rapport ainsi qu'une vidéo transmise par un habitant de Bourg-Saint-Maurice ont permis de combler le manque d'information sur les dommages de la base RTM.

pour la conduite déviant le Nant Cruet au niveau de la route, ce dernier s'est écoulé sur la route provoquant une érosion considérable du remblai (**figure E6**).



Figure E6 - Vues aériennes de la portion de la départementale 902 détruite près du lieu dit Piperon par une lave torrentielle le 24 juillet 1996 (Savoie) (source TF1, capture vidéo)

Cette érosion a provoqué une rupture de plate forme (intensité D4) de la route départementale 902, entraînant la coupure de la circulation durant plusieurs jours.

Le même jour, à une trentaine de kilomètres en aval, une deuxième lave torrentielle se produisait dans le torrent de l'Arbonne à Bourg-Saint-Maurice. Entre 200 000 et 300 000 m³ de matériaux ont été transportés (source RTM). Un grand nombre de bâtiments compris dans le cône de déjection ont été envahis par la boue. De plus, les routes d'accès à l'Ouest de Bourg Saint Maurice ont été coupées et la circulation interrompue (**figure E7**).

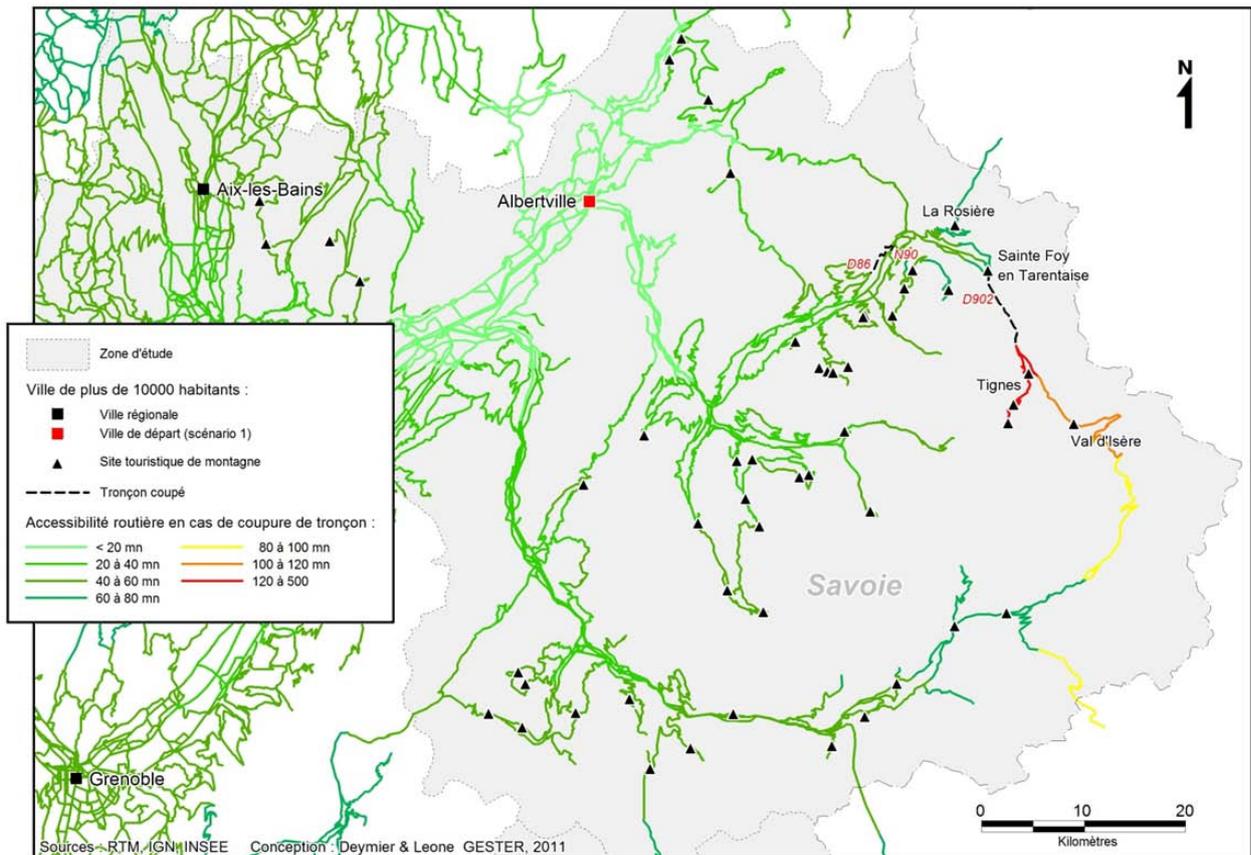


Figure E7 - Localisation des tronçons impactés par l'épisode de juillet 1996 et temps d'accès depuis Albertville (scénario 1)

Scénario 1

Évènement du 24 Juillet 1996 entre Sainte Foy en Tarentaise et Tignes sur la D902 et à l'entrée Ouest de Bourg Saint Maurice. Seulement quatre stations affectées mais qui représentent plus de 10% du nombre de journées-skieurs des 04, 05 et 73.

Zone d'étude : 04, 05, 73
Phénomène : lave torrentielle
Date de l'épisode : 24 Juillet 1996
Lieux de départ : Albertville, Tignes et Val d'Isère

Descriptif des impacts directs :

Noms et codes des BV concernés :

- Nant Cruet, Bassin Versant n° 237
- Torrent de l'Arbonne, Bassin Versant n°209

Communes concernées :

- Sainte Foy en Tarentaise (73)
- Bourg Saint Maurice (73)

Nom des cols fermés : aucun

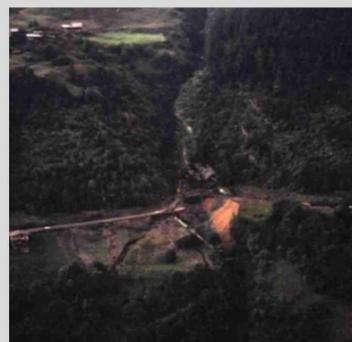
Nombre de tronçons affectés : 3

Nombre de tronçons coupés : 3

Nom des routes affectées : N90 / D86 / D902

Descriptif des dommages physiques (DP) : destruction de la plate forme

Descriptif des perturbations fonctionnelles (PF) : interruption de la circulation



Dégâts sur la chaussée D902, source BRGM, 1996

Indicateurs globaux de pertes d'accessibilité :

Perte de temps maximale lieu de départ/lieu d'arrivée : +55,79 mn (Albertville/Tignes)

Rallongement maximal lieu de départ/lieu d'arrivée : +77,522 km (Albertville/Val Claret (Tignes))

Différence de temps réseau global : + 224 mn

Différence de distance réseau global : + 293,546 km

Ville de départ	Station impactée	Chiffre d'affaire 2008/2009 (€)	Nombre journées-skieurs 2008/2009	Sites concernés	Temps d'accès à l'état normal (mn)	Temps d'accès à l'état altéré (mn)	Perte de temps (mn)
Albertville	Tignes	42 520 842	1 494 084	Tignes	65,57	121,36	55,79
				Lavachet-Lac de Tignes	69,453	125,243	55,79
				Val Claret	71,609	127,395	55,786
	Val d'Isère	34 906 223	1 329 882	Val d'Isère	70,725	114,679	43,954
	La Rosière	9 669 262	458 928	La Rosière	62,245	68,423	6,178
	Sainte Foy en Tarentaise	2 157 856	120 536	Sainte Foy en Tarentaise	55,158	61,337	6,179

NB : Pour rejoindre La Rosière et Sainte Foy en Tarentaise, le trajet de contournement (suite à l'interruption de la circulation à l'entrée de Bourg Saint Maurice) est le plus court en distance.

Figure E8 - Caractéristiques techniques et indicateurs globaux de perte d'accessibilité du scénario 1

Résultats

Pour simuler l'impact reporté de cet évènement sur l'ensemble du réseau routier et mesurer les enjeux qui en dépendent, les tronçons impactés ont été supprimés au sein du SIG. Les calculs de temps de parcours les plus rapides depuis l'agglomération principale la plus proche, en l'occurrence Albertville, ont été effectués au moyen de RouteFinder en mode SHORTEST. Les caractéristiques techniques du scénario sont décrites dans la **figure E8**. Les résultats de cette modélisation sont décrits par plusieurs cartes et synthétisés au moyen d'indicateurs globaux de perte d'accessibilité.

A la suite de l'interruption de la circulation sur la départementale 902, les stations de Tignes et Val d'Isère n'ont pu être accessibles qu'en utilisant la vallée de la Maurienne. Les rallongements de temps et de distance sont notables. Par exemple, le trajet Tignes-Albertville subit un rallongement de plus de 77 km. L'indice de dispersion que l'on peut appliquer pour les tronçons concernés par une coupure équivaut à une augmentation de 295 km sur l'ensemble du réseau.

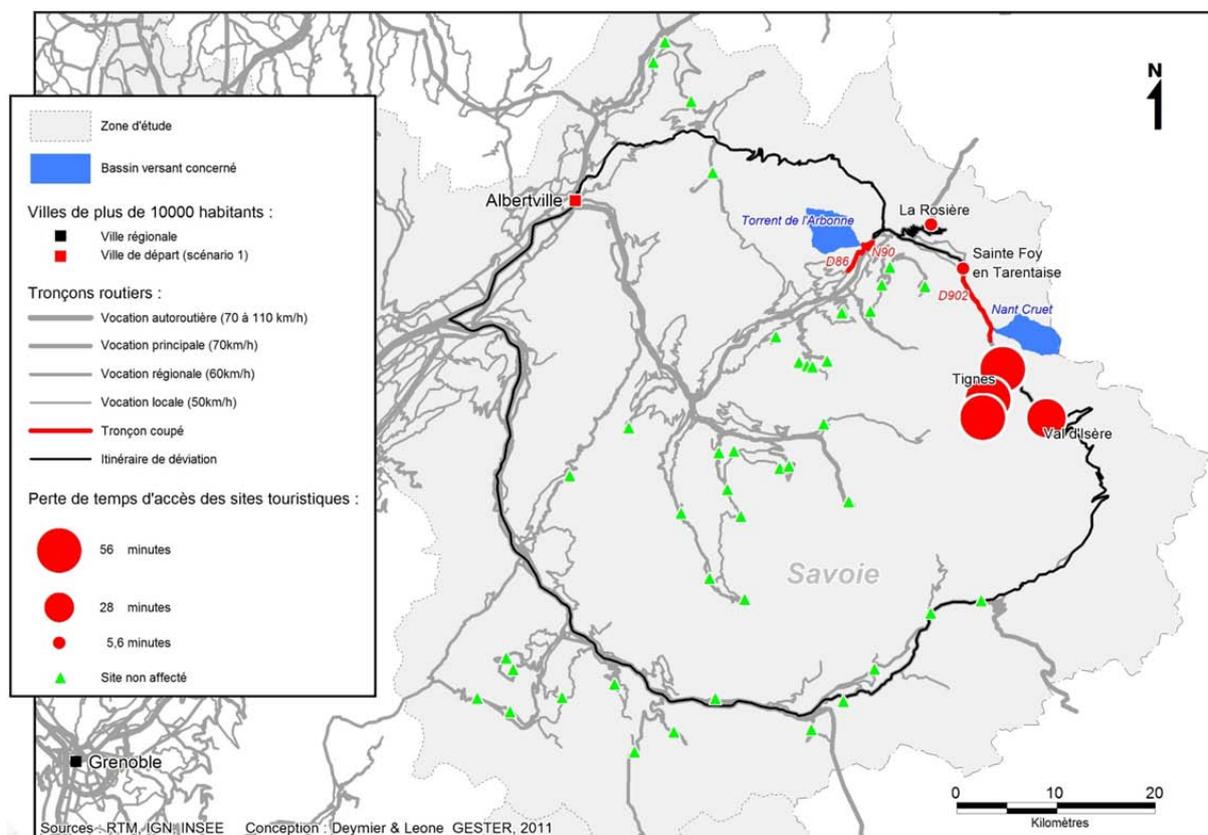


Figure E9 - Pertes de temps d'accès des stations de ski au départ d'Albertville (scénario 1)

L'un des enjeux induits par une dégradation de l'accessibilité aux stations est la fréquentation touristique de ces stations. Elle est mesurée au moyen du nombre de forfaits journée par personne autrement dit les journées-skieurs. En conséquence on peut mesurer le nombre de journées-skieurs accessibles depuis la ville de plus de 10 000 habitants la plus proche (Figures E9 et E10).

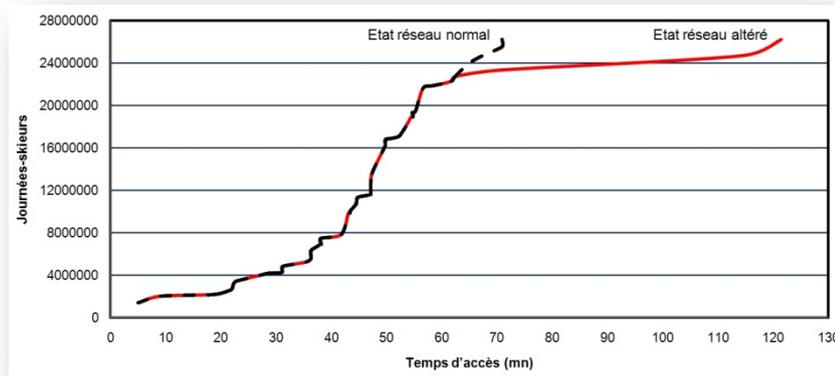


Figure E10 - Journées-skieurs accessibles au départ d'Albertville (scénario 1)

Dans ce scénario, la dégradation de l'accessibilité semble avoir de faibles conséquences si l'on prend en compte le peu de stations affectées (Sainte Foy en Tarentaise, La Rosière, les 3 sites de Tignes et Val d'Isère). En revanche, on s'aperçoit en prenant en considération le « poids » de ces stations qu'une altération de l'accessibilité peut être beaucoup plus pénalisante pour le tourisme alpin qu'il n'y paraît (**Figure E10**). C'est en effet 12,9% du nombre total de journées skieurs de Savoie, des Hautes-Alpes et des Alpes-de-Haute-Provence qui sont concernés par les coupures des routes permettant l'accès à Tignes, Val d'Isère, Sainte Foy en Tarentaise et la Rosière.

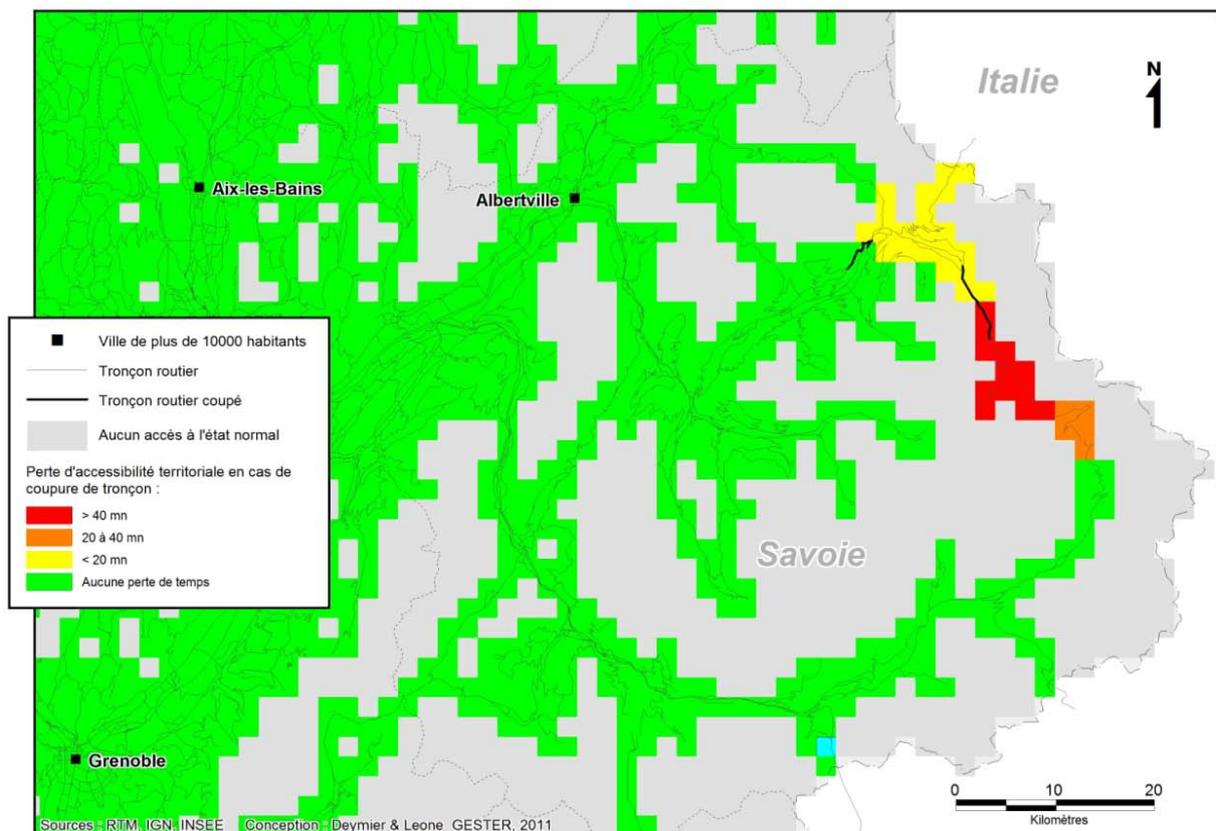


Figure E11 - Pertes de temps d'accès au territoire au départ des villes de plus de 10 000 habitants les plus proches (scénario 1)

E.4.1.2 Scénario n°2 (juin 2005)

Présentation

Ce second scénario a été construit sur la base de l'épisode pluviométrique des 19, 20 et 21 juin 2005. Son principal intérêt réside dans son étendue spatiale. En effet, ce sont 7 communes des départements des Hautes-Alpes et des Alpes-de-Haute-Provence qui ont été affectés par des *debris flows* : Le-Monetier-les-Bains (05), Vallouise (05), Réallon (05), Montgardin (05), Saint-Paul (04), Meyronnes (04), Meolans-Revel (04). De forts orages sont à l'origine de ces laves torrentielles.

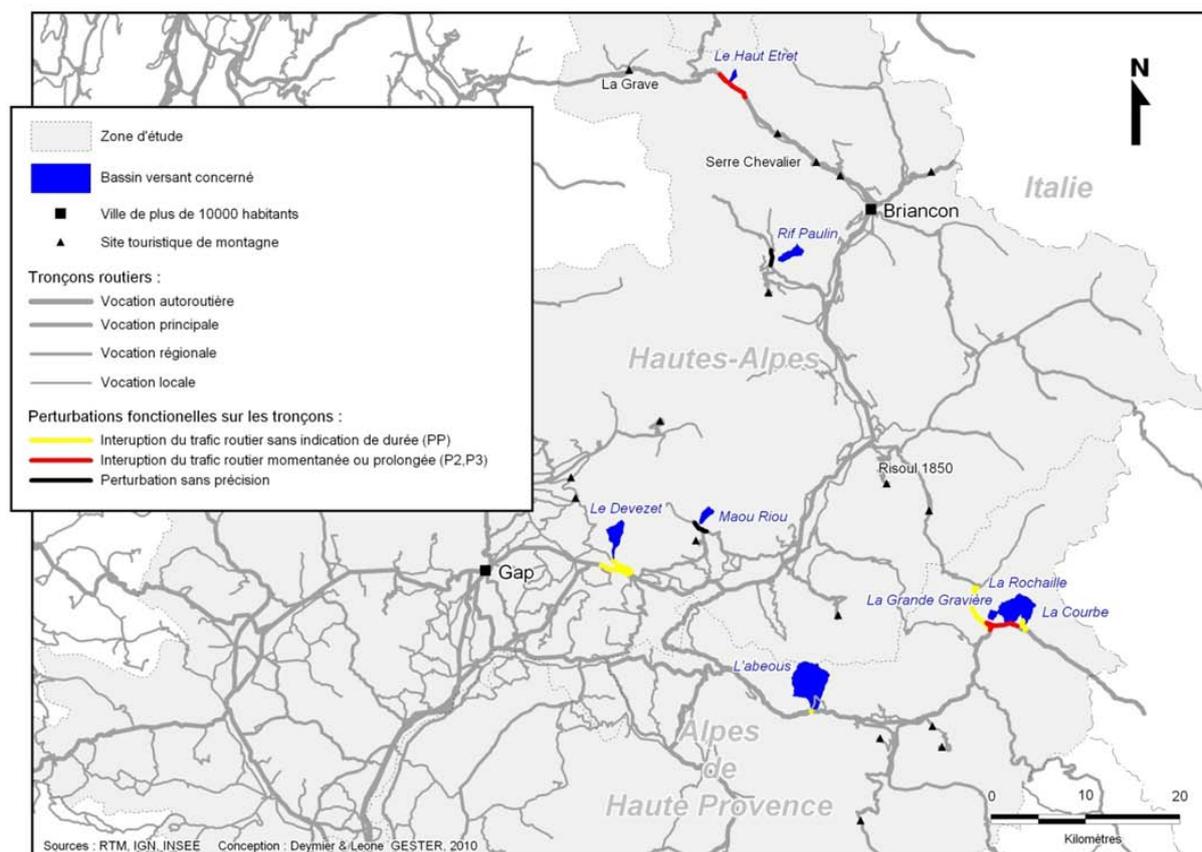


Figure E12 - Localisation des tronçons impactés par l'épisode de juin 2005 (scénario 2)

Les bassins versants impliqués sont au nombre de 9 (**figure E12**) : L'Abeous, La Rochaille, La Courbe, La grande Gravière, Les Aiguillasses, le Torrent du Devezet, le Torrent du Haut Etriet, le Torrent du Maou Riou, le Torrent du Rif Paulin. Chacun a impacté un tronçon routier différent des routes départementales D614, D994, D900, D902, D41, D91, et D94. La plupart des dommages décrits sont des obstructions de chaussée (D3). On peut notamment mettre en évidence l'obstruction de la chaussée de la D91 par une coulée de boue d'une hauteur maximale de 1 mètre (bassin versant du Haut-Etriet). Les coupures de circulation ont eu une durée moyenne de quelques heures, ne dépassant jamais la journée (source RTM) (**figure E13**).

Scénario 2

Evènements avec multiples localisations
8 sites touristiques affectés, 30 communes touchées dont 4 isolées.
844 km² de la surface du territoire étudié subissent une dégradation de l'accessibilité.

Zone d'étude : 04, 05, 73
Phénomènes : laves torrentielles et crues torrentielles
Datee de l'épisode : 19, 20 et 21 Juin 2005
Lieux de départ : Briançon et Gap

Descriptif des impacts directs :

Nom et codes des BV concernés : L'Abéous (BV n°18), La Rochaille (BV n°20), La Courbe (BV n°21), La grande Gravière (BV n°52), Les Aiguillasses (BV n°53), Torrent du Devezet (BV n°71), Torrent du Haut Etret (BV n°112), Torrent du Maou Riou (BV n°132), Torrent du Rif Paulin (BV° 166)
Communes concernées : Le Monétier-les-Bains (05), Vallouise (05), Réallon (05), Montgardin (05), Saint Paul (04), Meyronnes (04), Meolans-Revel (04)
Cols fermés : Aucun
Nombre de tronçons affectés : 9
Nombre de tronçons coupés : 9
Noms des routes affectées : D614, D994, D900, D902, D41, D91, et D94
Descriptif des dommages physiques (DP) : Dégradation, obstruction de la chaussée
Descriptif des perturbations fonctionnelles (PF) : Interruption de la circulation

Indicateurs globaux de pertes d'accessibilité :

Sites touristiques (ski) :

Perte de temps maximale lieu de départ/lieu d'arrivée : 31,282 mn (Briançon (EN) – Grenoble (EA) / La Grave)
Rallongement maximal lieu de départ/lieu d'arrivée : 37,371 km (Briançon (EN) – Grenoble (EA) / La Grave)
Différence de temps réseau global : 74,696 mn
Différence de distance réseau global : 158,311 km

Commune :

Perte de temps maximale lieu de départ/lieu d'arrivée : 48 min (Briançon (EN) – Grenoble (EA) / Villar d'Arène)
Différence de temps réseau global : 78,7 minutes (+ 4 communes isolées)

	Perte de temps < à 30 min		Perte de temps > à 30 min		Isolement total	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Sites affectés	7	9,9	1	1,4	0	0
Journées skieurs associées	1267753	4,8	41681	0,16	0	0
Communes affectées	24	3,5	2	0,3	4	0,6
Population totale affectée	16558	2,3	456	0,06	1099	0,15
Surface totale affectée	698	/	68	/	80	/

Figure E13 - Caractéristiques techniques et indicateurs globaux de perte d'accessibilité du scénario 2

En modélisant l'accessibilité routière multipolaire consécutive à la coupure de ces 9 tronçons routiers, on remarque que 3 d'entre eux isolent une partie du réseau routier (**figures E14**). De plus le tronçon affecté de la D91 entraîne une importante dégradation de l'accessibilité pour rejoindre les territoires plus au Nord.

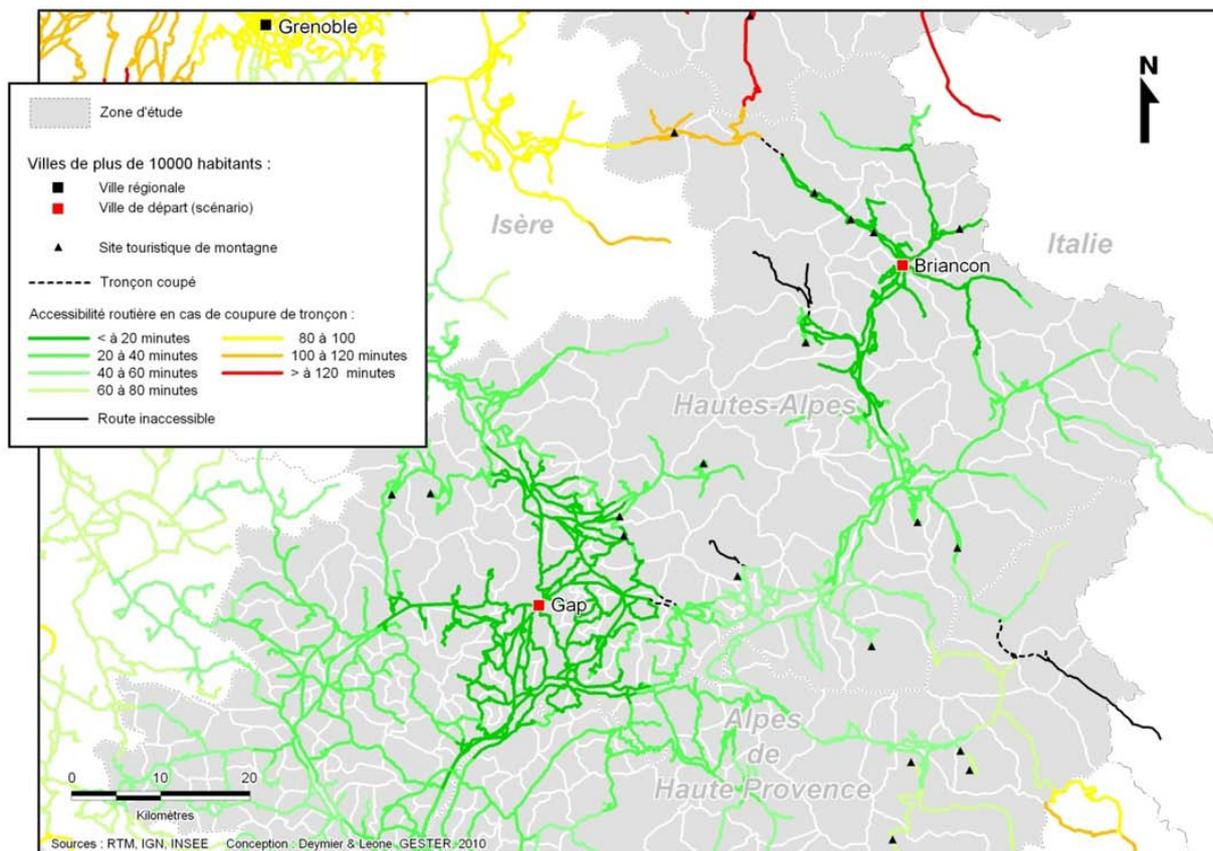


Figure E14 - Temps d'accès au territoire au départ de Briançon et Gap (scénario 2)

L'accessibilité des sites touristiques de montagne

Ce sont 8 sites de sports d'hiver qui sont concernés par une dégradation de l'accessibilité. Les pertes de temps les plus notables au départ des villes de plus de 10 000 habitants les plus proches concernent Les Orres, Réallon et La Grave dans les Hautes-Alpes mais aussi la station de Valloire en Savoie (**figure E15**).

Il est important de noter le changement de la ville de 10 000 habitants la plus proche entre l'état normal et l'état altéré du réseau. A l'état normal, c'est Briançon qui se trouve être la ville de 10 000 habitants la plus proche de La Grave et de Valloire. Après altération du réseau, Albertville devient la ville la plus proche pour Valloire, et Grenoble pour La Grave.

Pour ce scénario, 7 sites sont concernés par une perte de temps inférieure à 30 minutes et 1 site par une perte de temps comprise entre 30 et 60 minutes. Ce sont près de 5% des journées skieurs de l'ensemble des stations des 3 départements qui sont ainsi affectées par une dégradation de l'accessibilité (**figure E16**).

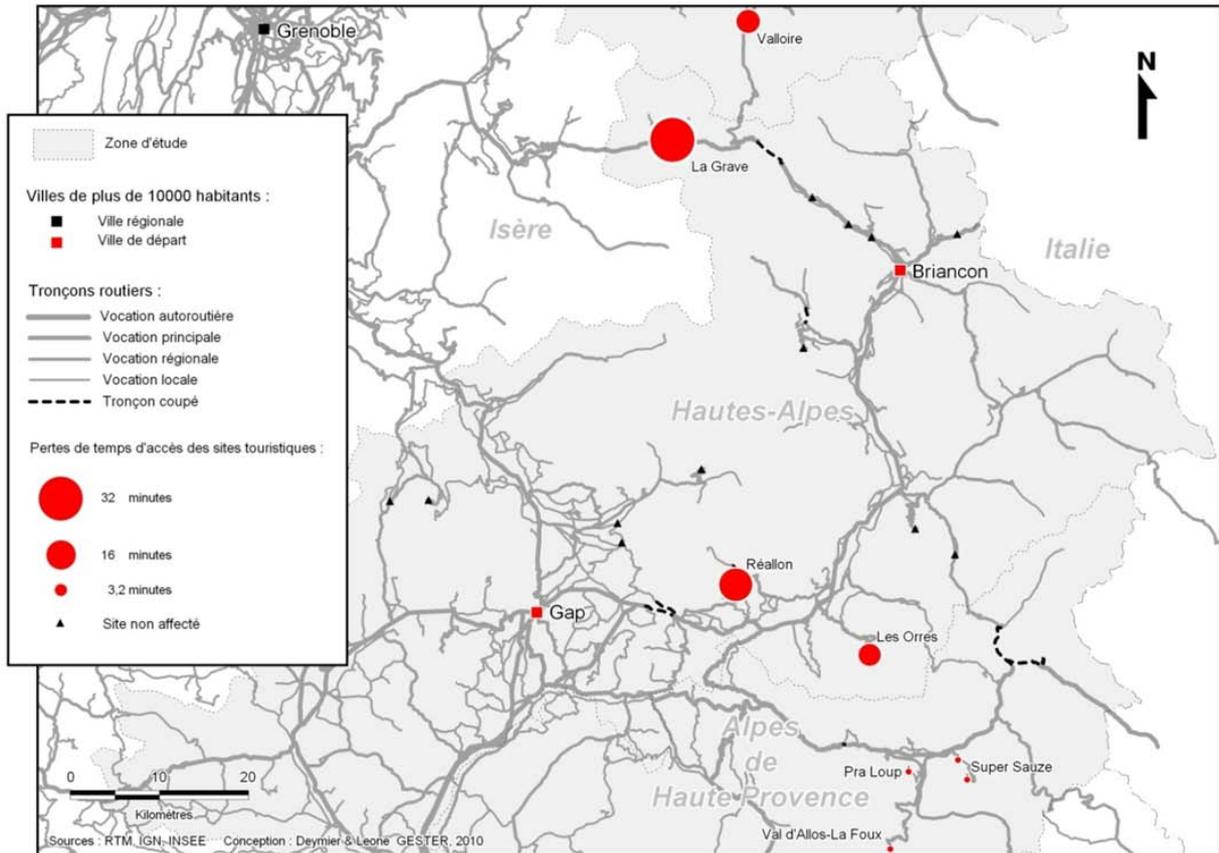


Figure E15 - Pertes de temps d'accès des stations de ski au départ de Briançon et Gap (scénario 2)

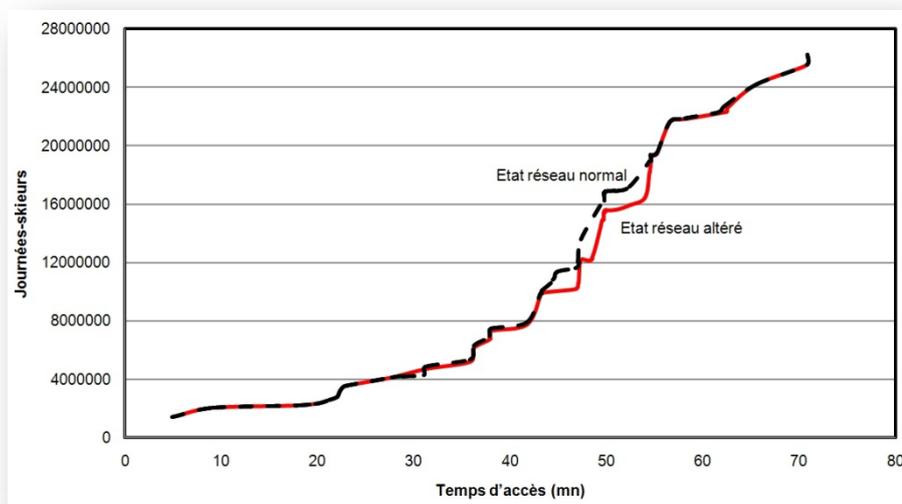


Figure E16 - Journées-skieurs accessibles au départ de Briançon et Gap (scénario 2)

L'accessibilité communale

Suite aux interruptions du trafic routier, 30 communes sont concernées par une dégradation de leur accessibilité⁵, ce qui représente un préjudice pour près de 19000 personnes. Pour 24 communes, le rallongement du temps de parcours pour les atteindre est inférieur à 30 minutes (**figure E17**). Cependant 2 communes subissent un rallongement du temps de

⁵ Pour rappel, l'accessibilité des communes est calculée ici pour le centroïde des polygones communaux.

parcours supérieur à la demie heure. Villar d'Arène par exemple voit la ville de plus de 10000 habitants la plus proche s'éloigner de plus de 48 minutes. D'ailleurs, à l'état normal c'est Briançon qui fait office de ville de 10000 habitants la plus proche. Suite à l'altération du réseau, c'est Grenoble qui devient la plus proche. Plus grave encore, 4 communes (Pelvoux, Meyronnes, Reallon, Larche) subissent un isolement total, avec près de 1100 personnes isolées (figure E18).

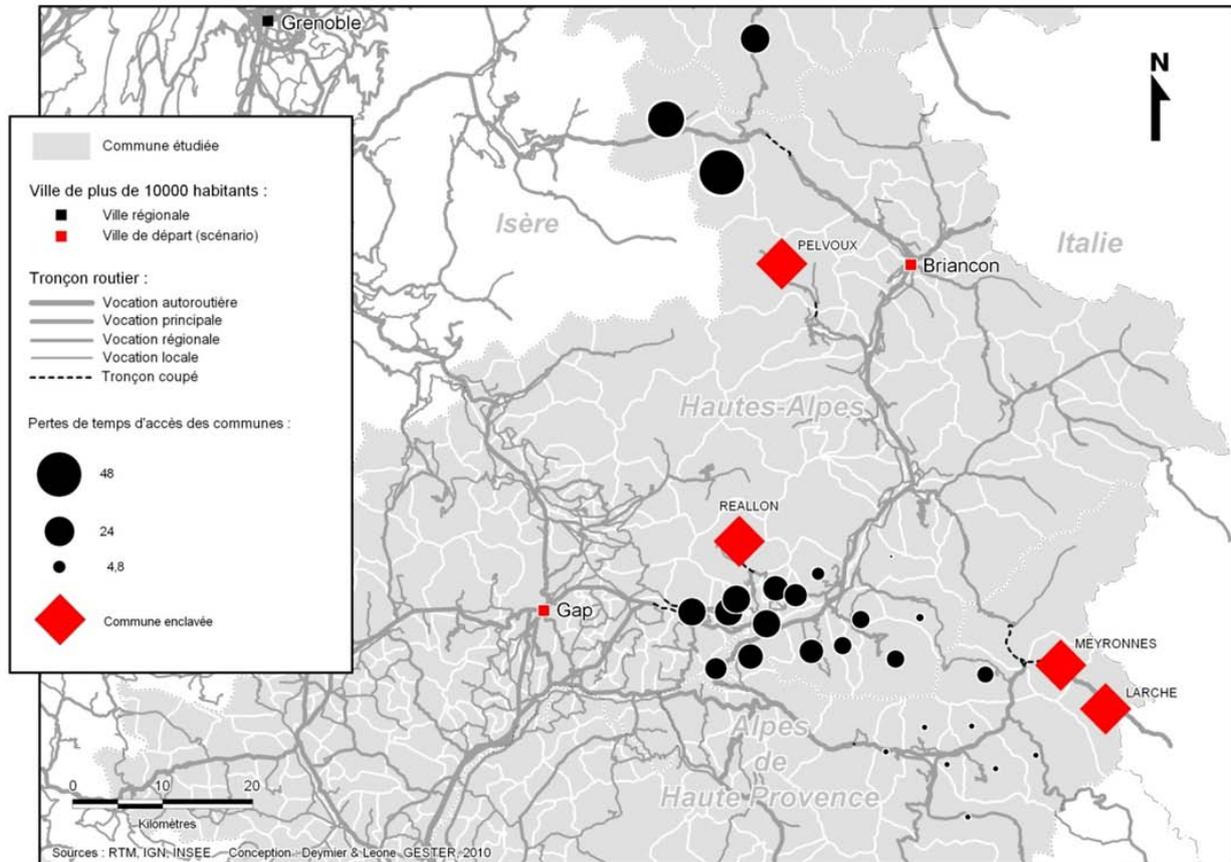


Figure E17 - Pertes de temps d'accès des communes au départ de Briançon et Gap (scénario 2)

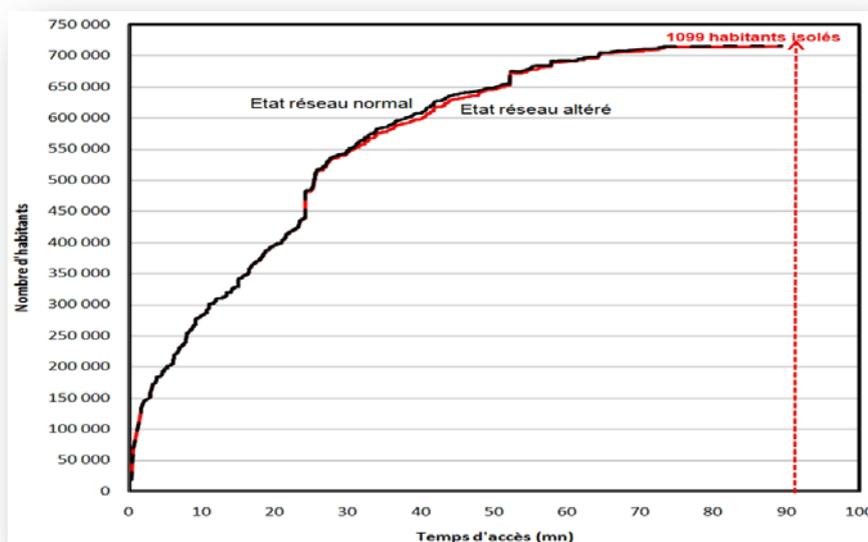


Figure E18 - Population communale accessible au départ des villes de plus de 10 000 habitants les plus proches (scénario 2)

L'accessibilité territoriale

En utilisant des mailles d'une surface de 4 km², on peut faire une estimation de la surface de notre zone d'étude ayant à souffrir d'une dégradation voir d'une perte totale d'accessibilité. Dans le cas du scénario n°2 c'est près de 844 km² qui sont affectés par une dégradation de l'accessibilité. On peut cependant relativiser cet impact spatial. En effet près du tiers de cette surface subit une altération de l'accessibilité inférieure à 2 minutes et seulement 8% de la surface totale souffre d'une dégradation supérieure à 30 minutes (**figure E19**). Il est à noter par contre que 80 km² de notre d'étude subissent une perte totale d'accessibilité (**figure E20**).

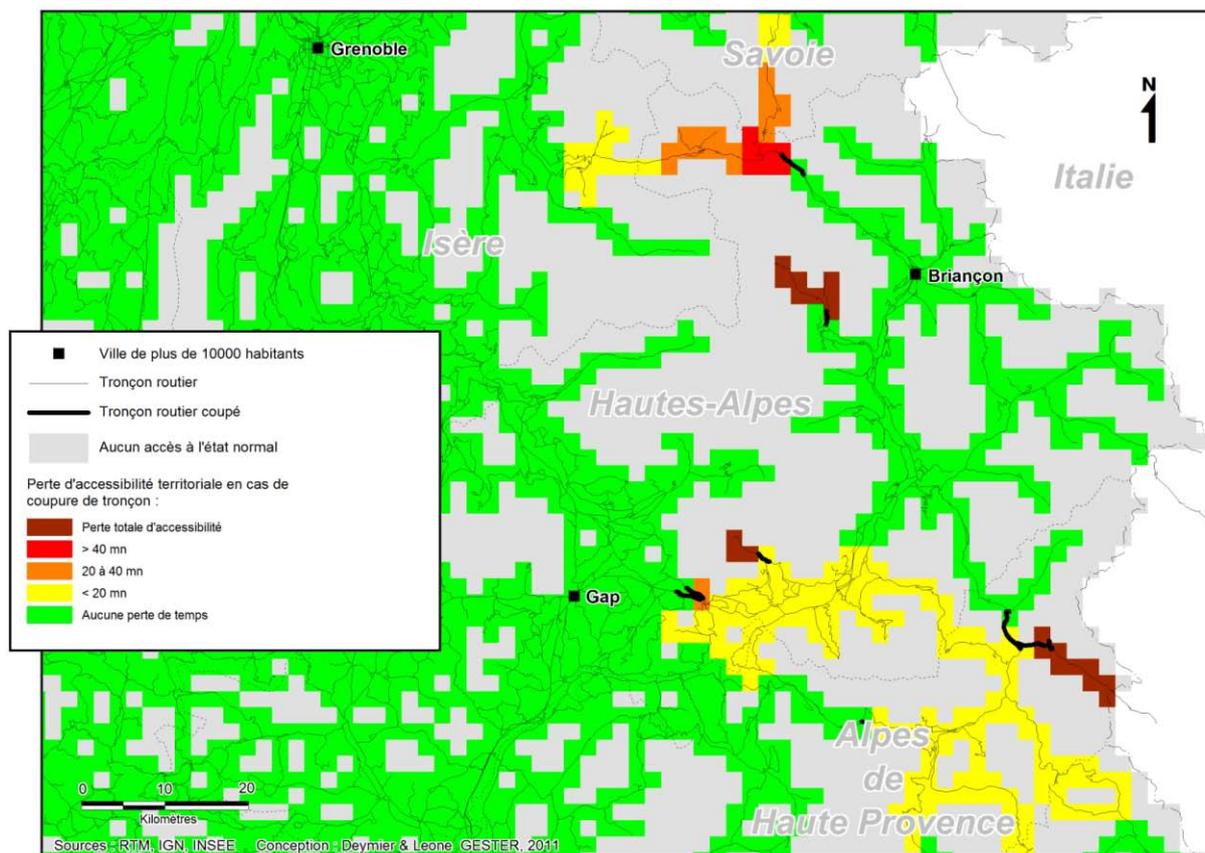


Figure E19 - Pertes de temps d'accès au territoire au départ de Briançon et Gap (scénario 2)

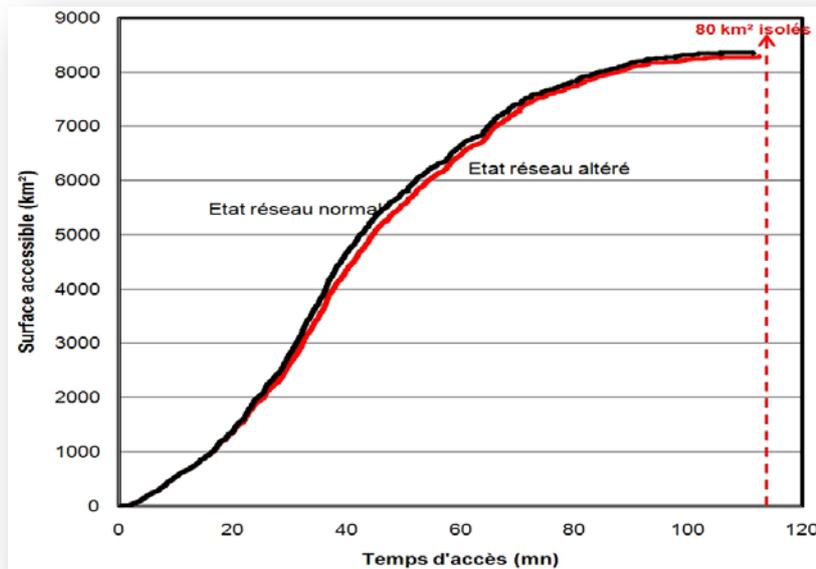


Figure E20 - Surface territoriale accessible au départ des villes de plus de 10000 habitants les plus proches (scénario 2)

E.4.2 COMMENTAIRES DES RESULTATS

E.4.2.1 L'accessibilité des sites touristiques

Comme tout site à vocation touristique les stations de sports d'hiver sont dépendantes de la venue des touristes. Depuis une trentaine d'années on assiste à un essor considérable du tourisme alpin. La plupart des stations de ski ont misé sur un tourisme de masse. De plus, en cherchant à s'installer de plus en plus haut les stations ont bénéficié d'équipements d'accès coûteux et vulnérables (Bavoux *et al.*, 2005). « Ces grandes « usines à ski » sont fortement concurrentes, n'ayant guère de particularisme à vendre. Leur accessibilité détermine avant tout leur rentabilité » (Piercy, 2005).

Au regard de nos scénarios il apparaît que les stations de ski sont particulièrement vulnérables face à une dégradation de l'accessibilité en cas de *debris flows*. La plupart des grandes stations – et c'est particulièrement vrai pour celles de la Maurienne et de la Tarentaise – sont éloignées des villes de plus de 10000 habitants. En temps normal les temps d'accès sont assez conséquents (plus d'une heure pour rejoindre Tignes, les Arcs, Val d'Isère depuis Albertville). Si une augmentation de ce temps d'accès survient, le seuil de tolérance est vite dépassé. Le particularisme de nombreux sites de ski provient aussi de leur localisation sur le réseau routier : la majorité se trouve à l'extrémité du réseau. On remarque à ce propos que ce sont avant tout les stations ayant le plus de poids (nombre de clients, chiffre d'affaires,...) qui ont tendance à se retrouver en « bout de chaîne ». Cette situation tend à un accroissement du risque : en allant vers les « terminus » du réseau le nombre d'itinéraires alternatifs diminue considérablement et il ne reste bien souvent qu'une seule voie d'accès à la station. De plus les voies d'accès aux sites vont être amenées à traverser un certain nombre de zones où surviennent des *debris flows*. Or, plus la distance est longue, plus le risque de traverser ces zones est important.

Dans les scénarios aucune station ne s'est retrouvée enclavée. Néanmoins il est important de prendre en compte le fait qu'aucun col n'était fermé à ce moment là. A titre d'exemple, le même scénario n°1 survenant pendant la fermeture du col de l'Iseran (départementale 902) aurait provoqué l'isolement de deux stations majeures : Tignes et Val d'Isère. Concernant le rallongement des temps d'accès on peut penser qu'ils sont acceptables pour les touristes ayant décidé de rester sur le même site pendant plusieurs jours. Par contre pour les personnes habitant la région et skiant à la journée, un rallongement de plusieurs dizaines de minutes est sans doute un motif valable pour se rendre dans une autre station que celle prévue à l'origine.

Cela étant, on peut aussi relativiser la vulnérabilité des stations en raison de plusieurs points. Tout d'abord la durée de la dégradation de l'accessibilité. En dehors de quelques cas de destruction de la plateforme, la plupart des dommages aux routes consistent en des obstructions. Les fermetures des routes sont alors bien souvent de quelques heures. Les conséquences sur l'accessibilité des stations sont donc limitées. Le cas véritablement pénalisant serait bien évidemment une coupure de l'accessibilité lors des départs et des arrivées en masse des vacanciers. L'autre point à souligner est la multiplication des sites. « De véritables réseaux de stations, organisés à partir d'un pôle, lui-même constitué de plusieurs sites, et auxquels sont reliés des stations-villages satellites [...] de tels domaines tendent à être interconnectés » (Piercy, 2005). La Plagne, par exemple, est constituée de 10 sites dont certains sur des versants différents. Cette multiplication des sites permet d'accéder à la station par plusieurs itinéraires. De plus, l'alliance entre différentes stations et la création de domaines skiables entre plusieurs stations réduit considérablement les effets potentiels de l'isolement routier d'un site. Le nombre de sites pour une même station nous a posé des difficultés dans la réalisation de nos SIG. En effet, les données sur la fréquentation et les chiffres d'affaires sont agrégées pour chaque station. Nous avons été dans l'impossibilité d'attribuer à chaque site sa fréquentation et son chiffre d'affaire.

On peut aussi distinguer une dualité hivernale et estivale. On pourrait penser en effet qu'une dégradation de l'accessibilité serait plus dommageable en hiver. Cependant, en tenant compte des statistiques sur la périodicité des événements il apparaît que les mois de juin, juillet et août sont particulièrement propices aux *debris flow*. En plus de cela, le tourisme estival semble devoir prendre de plus en plus d'importance pour compenser les mauvaises saisons hivernales.

Afin de réduire les pertes d'accessibilité aux sites touristiques de Val d'Isère et de Tignes, des aménagements structurels ont été effectués depuis l'évènement de 1996 décrit dans le scénario 1. Le BRGM recommandait dans son premier rapport post-événement un curage du torrent et un recalibrage du conduit de dérivation du Nant Cruet. Finalement les travaux qui ont été réalisés sont plus importants et bénéficient d'une forte visibilité. Un ouvrage de génie civil de type galerie paravalanche a été construit pour permettre au Nant Cruet de passer au dessus de la portion routière affectée en 1996 et d'empêcher ainsi toute nouvelle destruction de ce tronçon, et rendant de fait le scénario 1 non reproductible dans l'avenir.



Figure E17 - Aménagement de protection de la route D902 contre les avalanches et les laves torrentielles du torrent Nan Cruet (73) (photo. F. Leone F. 2010)

E.4.2.2 L'accessibilité des communes

Dans le scénario n°2 nous pouvons noter l'enclavement de 4 communes. Pour la commune de Meyronnes et celle de Larche, cet enclavement est relatif. En effet, cet isolement mis en évidence dans nos calculs d'accessibilité est dû à l'absence de prise en compte du réseau routier italien.

Les enjeux concernés sont aussi très faibles. Les communes totalement isolées correspondent à de petits villages ayant une faible population comme en témoigne le peu d'habitants concernés par cet isolement (1099 habitants pour les 4 communes). Une étude plus approfondie sur les différentes catégories d'âges peut être envisagée afin de mieux prendre en compte la vulnérabilité humaine face à cet isolement. Il s'agit bien là d'une forme de risque reporté qui doit être considérée dans une optique d'aide à la gestion de crise.

Enfin il est important de souligner les limites de la prise en considération de calcul de l'accessibilité aux communes dans notre étude. Nous avons dû faire face à plusieurs contraintes :

- Le manque de finesse du réseau routier Route500 proposé par l'IGN (absence du réseau italien, absence des chemins communaux et forestiers) ;
- La mauvaise qualité des représentations cartographiques obtenues par l'option ISOCHRONE du logiciel RouteFinder ;
- et surtout, l'obligation de réduire la commune en un point pour pouvoir calculer son accessibilité.

C'est ce dernier point qui semble être le plus problématique. En effet l'accessibilité se considère en fonction d'un point d'origine et d'un point de destination. Face à l'étendu des communes nous avons opté pour le centroïde des communes. Les résultats obtenus ressortent visuellement bien, mais souffrent néanmoins d'un manque de rigueur. Il semble en effet plus pertinent de calculer l'accessibilité en fonction des points/lieux (ville, village,

hameau, immeuble,...) où sont regroupées des populations plutôt que le centre de ces communes. Ainsi une commune peut posséder plusieurs noyaux d'habitations pour lesquels devrait être calculée l'accessibilité. Cependant, suite aux observations de terrain, l'enclavement de la commune de Meyronnes semble assez conforme à la réalité.

E.4.2.3 L'accessibilité territoriale

Suite aux lacunes présentes dans la considération de l'accessibilité communale, nous avons proposé une autre forme cartographique de l'accessibilité d'un territoire. Nous avons ainsi opté pour la construction d'une carte d'accessibilité utilisant un maillage du territoire. De cette façon nous avons pu traiter de manière plus précise les surfaces accessibles par la route. Par exemple, dans le scénario n°2 nous avons chiffré à 80 km² la surface rendue inaccessible suite à l'impact de *debris flows* sur le réseau routier.

Ce mode de représentation, en s'affranchissant des limites administratives, permet de penser l'accessibilité du territoire dans sa globalité. Il permet surtout d'envisager une nouvelle approche des scénarios d'accessibilité. En effet, on peut par la suite affiner nos scénarios en attribuant des enjeux spécifiques (population, surface bâti, centre de secours, etc.) à chacune des mailles. On peut ainsi passer d'une simple mesure de la surface accessible à une quantification des enjeux moins accessibles.

CONCLUSION PARTIE 1

La méthodologie développée nous a permis de localiser précisément les tronçons routiers ayant été affectés par une lave torrentielle depuis 1950. En « détruisant » certains d'entre eux, nous avons pu calculer des pertes de temps et de distance d'accès par rapport à l'accessibilité à l'état normal. Grâce aux SIG il a été possible de spatialiser ces pertes d'accessibilité. A partir de là, nous avons pu estimer la vulnérabilité des territoires en quantifiant et en localisant les pertes d'accessibilité de certains enjeux.

La méthodologie que nous avons expérimentée dans cette étude s'est montrée efficace. Néanmoins, nous avons été confrontés à certaines difficultés :

- L'absence de certains évènements.
- Le manque de précision des bases de données utilisées. Dans beaucoup de cas, les descriptions apportées aux impacts sur le réseau routier se sont montrées insuffisantes pour pouvoir attribuer un D_{pmax} et une P_{fmax} précis.
- Le manque de finesse du réseau routier, dans certains cas, notamment en zone urbaine ;
- La non-prise en compte, dans la réalisation des scénarios, des possibles perturbations de la circulation étrangères aux phénomènes retenus dans cette étude : travaux de voirie, accidents routiers, autres phénomènes naturels, *etc.*
- L'impossibilité de pouvoir attribuer à chacun des sites de sports d'hiver (et non plus à l'ensemble de la station) une fréquentation.

Cela étant, les perspectives offertes par cette méthodologie sont assez prometteuses. En effet, cette méthodologie peut être appliquée à d'autres zones d'étude ainsi qu'à d'autres aléas naturels. On peut également envisager des applications multirisques. La prise en compte de l'intermodalité (notamment avec le train) peut venir enrichir également la méthode. De plus, grâce à l'utilisation de cartes en carroyage, il est possible d'intégrer, de différencier et de quantifier une multitude d'enjeux.

En s'appuyant sur la modélisation de scénarios d'accessibilité, les conséquences induites par une perte d'accessibilité peuvent être estimées assez finement. Ainsi, il est possible de repérer les tronçons routiers les plus vulnérables ainsi que ceux entraînant les conséquences indirectes les plus dommageables. En se basant sur de tels scénarios spatialisés et quantifiés, les aménageurs, les autorités publiques, les gestionnaires de réseau, les services de secours, pourront prendre des mesures structurelles et/ou fonctionnelles adéquates pour réduire les altérations de l'accessibilité routière et faciliter la gestion d'une crise.

BIBLIOGRAPHIE PARTIE 1

- Appert M., Chapelon L.** (2006) - La vulnérabilité des réseaux routiers urbains face aux risques d'altération – *in*: La mise en carte des risques naturels, *Géorisque* n°2, collection du laboratoire GESTER, Université Montpellier 3, pp. 47-58.
- Bavoux J.-J., Beaucire F., Chapelon L., Zembri P.** (2005) - *Géographie des transports* - Armand Colin, Collection U, Paris, 232 p.
- Berdica K.** (2002) - An introduction to road vulnerability : what has been done, is done and should be done – *Transport Policy*, vol. 9, N° 2, p. 117-127.
- BRGM** (1996) - *Débordements torrentiels et coulées de boue à Tignes et Sainte Foy Tenrentaise (Savoie) le 24 Juillet 1996 aux lieux-dits Piperon et les Brevières (RD 902)* - Visite des 24 et 25 juillet 1996. Rapport BRGM R 39086, 15 p., 9 fig.
- Chang S.** (2003) - Transportation planning for disasters : an accessibility approach - *Environment and Planning*, Vol. 35, pp. 1051-1072.
- Chapelon L.** (1996) – *Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité* – Mappemonde, n°3, pp. 28-36.
- Dalziell E.P., Nicholson A.J.** (2001) – Risk and impact of natural hazards on a road network - *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 127(2), pp.159-166.
- Demoraes F.** (2009) - De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur) - *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne]. URL : <http://www.cybergeo.eu/index22101.html>.
- Demoraes F., D'Ercole R.** (2009) - *Risques et accessibilité des lieux dans le District Métropolitain de Quito (Équateur)* – Mappemonde, N° 95 (3-2009), 20 p.
- Flageollet J.C.** (1989) - *Les mouvements de terrain et leur prévention* - Collection Géographie, Ed. Masson, 224 p.
- Gleyze J.F.** (2005) - *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques* – thèse de doctorat, université Paris 7, URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00138991>, 540 p.
- IGN** (2009) – Route 500. Descriptif de contenu. Institut Géographie National, Paris, 18 p, http://professionnels.ign.fr/DISPLAY/000/526/580/5265800/DC_ROUTE500.pdf
- Jomelli V., Chochillon, C., Brunstein, D., P. Pech** (2003) - Hillslope debris flows frequency since the beginning of the 20th century in the French Alps - *Debris flow hazards mitigation*, Rickenmann & Chen (ed), Millpress Rotterdam, pp. 127-137.
- Ledoux B.** (1989) – *Etude de l'impact économique des mouvements de terrain en France* - Mémoire de DEA "Techniques et Gestion de L'Environnement", laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, 42 p.
- Leone F.** (1996) – *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* – thèse de doctorat, spécialité géographie, Université J. Fourier, Grenoble, publiée dans les Documents du BRGM, N°250, Editions du BRGM, Orléans, 286 p.
- Levy J., Lussault M.** (dir.) (2003) - *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés* – Belin.
- Montagne Leaders** (2009) – *Classement des 100 premières stations de ski françaises* – N°215
- OFROU (Office fédéral des routes, Suisse)** (2009) – *Concept de risque pour les dangers naturels sur les routes nationale. Méthodologie basée sur les risques pour l'évaluation, la prévention et la maîtrise des dangers naturels gravitationnels sur les routes nationales* – Rapport, 106 p.

- 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.
- Piercy P.** (2005) - *La France, Le fait régional* - Paris, Hachette, 287 p.
- Remaître A.** (2006) – *Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnnette* – Thèse de doctorat, Université Strasbourg, 487 p.
- Sauret B.** (1987) - Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp. 65-77.
- Sétra** (1996) – *Construction des ouvrages d'art. Année 1995. Résultats statistiques* – Rapport en ligne du Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, 60 p.
- Sétra** (2008) – *Recueil de statistiques. Construction des ouvrages d'art. Année 2006* – Rapport en ligne du Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, réf. 0855w, 56 p.
- Varnes D.J.** (1978) - Slope movement types and processes - *Landslides. Analysis and control*, in Schuster & Krizek (editors), Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 325-348.

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)

F PRESENTATION

Cette seconde partie du rapport Scampeï porte sur un diagnostic intégré de vulnérabilités humaine et partiellement économique de cinq communes soumises au risque torrentiel. La dimension « accessibilité territoriale » (des secours vers les zones à risque) y est également incorporée par le biais d'une modélisation multi-scénarios. Notre zone d'étude est localisée dans le bassin de Barcelonnette (département des Alpes-de-Haute-Provence). Cette portion de la moyenne vallée de l'Ubaye s'étend sur une vingtaine de kilomètres entre la commune de Jausiers à l'Est (altitude 1 210 m) et celle de Méolans-Revel à l'Ouest (altitude 1 040 m). Plus précisément, notre territoire d'étude comprend cinq bassins versants torrentiels répartis sur cinq communes : Barcelonnette et Saint Pons (torrent de la Valette), Jausiers (torrent des Sanières), Enchastrayes (torrent des Galamonds) et Faucon-de-Barcelonnette (torrents de Faucon et du Bourget). Ces communes sont pour la plupart situées sur des cônes de déjection en fond de vallée (**figure F1**).

Nos objectifs ont été de localiser et spatialiser le risque, de le hiérarchiser et de le quantifier au moyen d'indicateurs, selon une approche multicritères, à dire d'expert. Ces indicateurs ont été cartographiés à deux échelles : échelle du bâtiment (indices spécifiques) et échelle de mailles de 50m de côté (indices agrégés ou globaux). Outre son apport méthodologique, l'intérêt de cette étude est de faciliter la gestion de ce risque, en particulier en situation de crise, en proposant *in fine* des mesures de réduction des vulnérabilités, humaines, matérielles et fonctionnelles (réseaux). Les propositions établies dans ce sens ne sont pas décrites dans ce rapport mais apparaissent dans un rapport annexe produit dans le cadre d'un stage collectif de Master 2 GCRN de l'Université de Montpellier 3 (Leone & Vinet, 2011).

En parallèle, une étude d'accessibilité territoriale multi-scénario a été conduite, puis combinée avec l'analyse de la vulnérabilité des biens et des personnes, afin de compléter l'évaluation intégrée. Le questionnement général de cette étude porte, d'une part sur les facteurs de vulnérabilité humaine et économique à considérer et d'autre part, sur la mise en place d'une méthodologie d'évaluation intégrée et reproductible de la vulnérabilité humaine et territoriale à l'échelle locale.

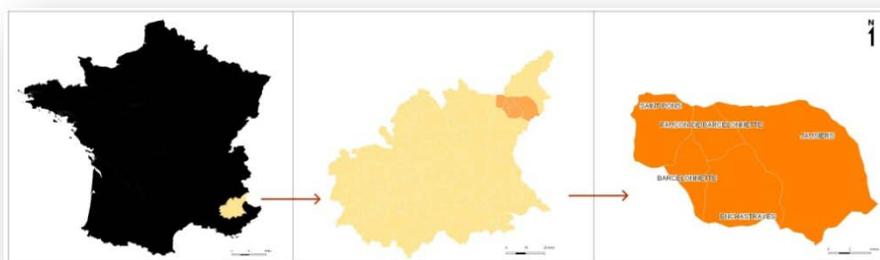


Figure F1 - Localisation des communes étudiées

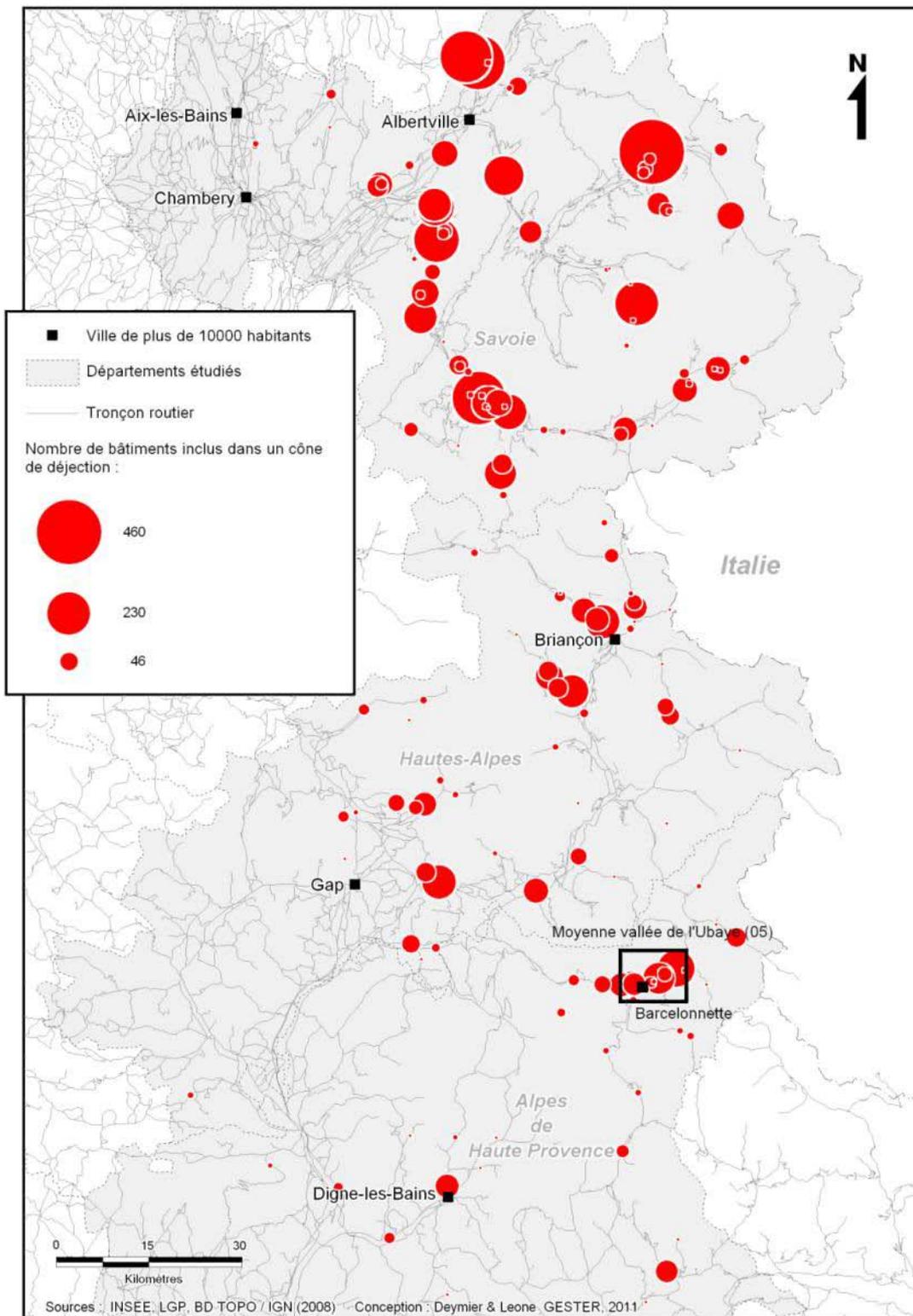


Figure F2. Exposition du bâti aux aléas torrentiels (cônes de déjection). La moyenne vallée de l'Ubaye se détache nettement par une forte concentration d'enjeux (zone d'étude).

Différents éléments ont motivé le choix de cette zone d'étude :

- La connaissance de nombreux évènements dommageables historiques à debris flows depuis 1850 (sources Remaître, 2006 ; BD R.T.M).
- Des enjeux bâtis importants sur plusieurs cônes torrentiels affluents de l'Ubaye (**figure F2**).
- La présence d'enjeux stratégiques pour la gestion de crise (Gendarmerie, Sapeurs-pompiers, P.G.H.M.), tous situés sur les communes de Barcelonnette et de Jausiers.
- Une vallée stratégique pour les communications européennes transalpines.
- L'absence de Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) sur les communes sélectionnées.
- La possibilité de faire bénéficier les acteurs locaux de la gestion des risques des conclusions de cette étude, en particulier pour la mise en place de ces PCS.

G LE BASSIN A RISQUE DE BARCELONNETTE

G.1 LES ALEAS TORRENTIELS

Les torrents ont entaillé des vallées profondes et étroites et développé des cônes de déjection imposants dans le fond de la vallée de l'Ubaye (Ballandras et Nevriere, 1991 ; Miramont, 1998 ; Remaître et al., 2002 et 2005). Le cours de l'Ubaye, qui s'étale largement dans son lit, suit une pente faible de l'ordre de 0.8° en moyenne. En plus de l'Ubaye et du torrent du Bachelard (principal affluent de l'Ubaye dans sa moyenne section), on dénombre 32 autres appareils torrentiels qui jalonnent la vallée (20 en rive gauche et 12 en rive droite). La **figure G1** localise ces affluents de l'Ubaye dans sa moyenne section.

Le bassin de Barcelonnette présente de nombreux facteurs de prédisposition à la formation de torrents à laves torrentielles. Les versants, surtout en partie haute, présentent une pente forte supérieure à 20°. La lithologie, associée à des faciès différents, est sensible à l'érosion (marnes noires, calcaires et flyschs) et de nombreux placages morainiques particulièrement instables sont connectés plus ou moins directement aux organismes torrentiels. Ces trois facteurs ont favorisé le développement d'un réseau d'organismes torrentiels particulièrement dense (Sivan, 2000 ; Remaître et al., 2002 et 2005).

Choix de la zone d'étude : Un territoire fortement exposé aux risques torrentiels

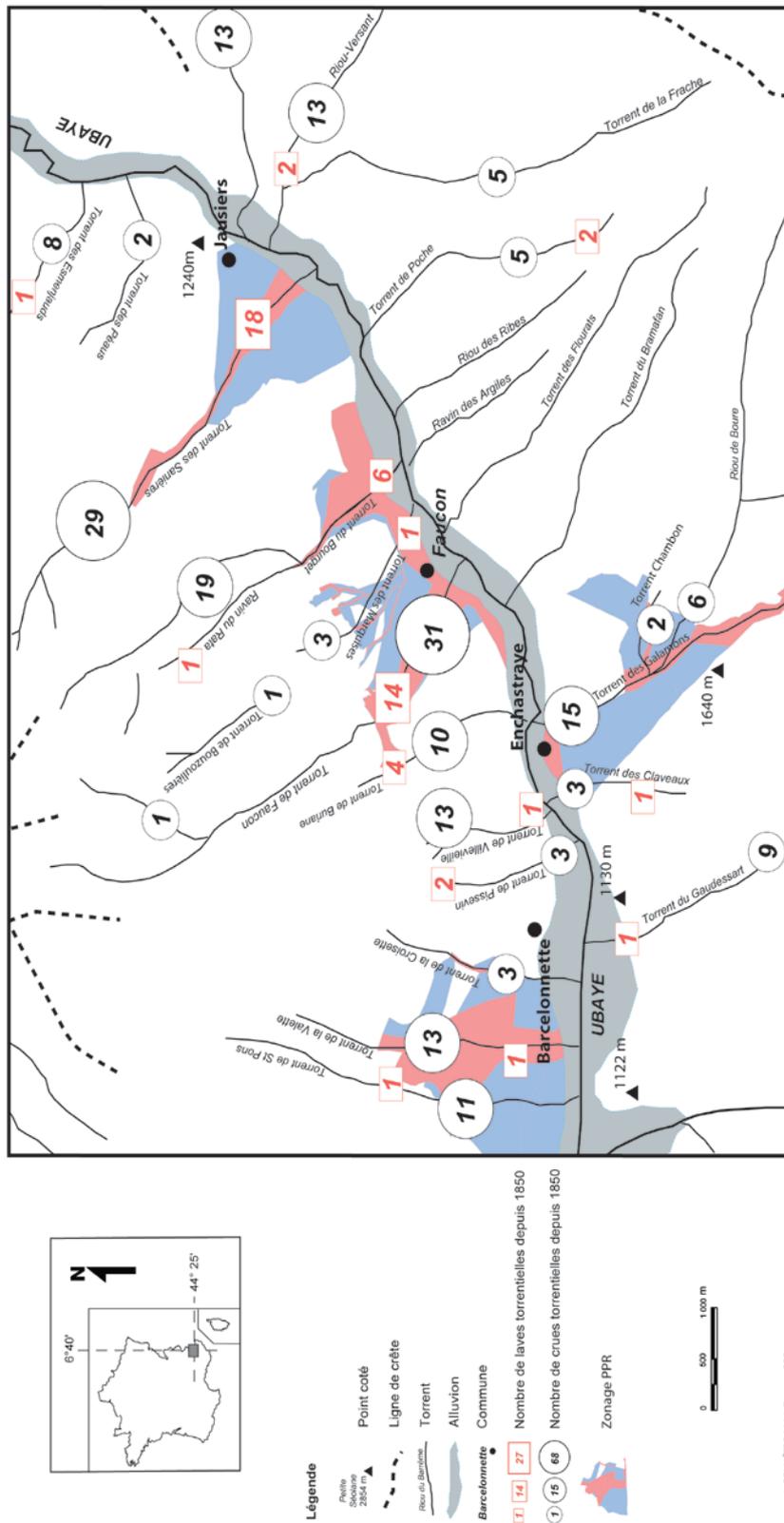


Figure G1 - Localisation des torrents du bassin de Barcelonnette et événements historiques associés (modifié d'après Remaître, 2006)

G.2 RISQUE DIRECT VS INDIRECT LIE A LA PERTE D'ACCESSIBILITE

Le risque direct peut se traduire par la probabilité d'endommagement direct sur des biens, des personnes et des activités. Dans notre étude, les aléas torrentiels (crues et laves) causent des dommages physiques d'intensité variable en fonction de leur magnitude et de la vulnérabilité des enjeux concernés. Ces enjeux directement endommagés sont multiples. La plupart du temps, il s'agit du bâti (maison, garage, hangar, commerce, etc.), des infrastructures de réseau (route, conduites d'eau, lignes et poteaux électriques, etc.), de biens matériels (voiture, mobilier urbain et privé, etc.). Parfois, les phénomènes torrentiels mettent en péril l'intégrité physique des personnes touchées en provoquant des dommages corporels d'une plus ou moins grande gravité.

Il apparaît comme nécessaire de prendre aussi en compte le risque indirect lié à la dégradation de l'accessibilité routière, vers ou en provenance des zones d'impact potentiel. Une dégradation de l'accessibilité est synonyme de perte de temps, de surcoûts, de trajets moins agréables pour les usagers de la route. Une perte totale de l'accessibilité peut quant à elle amener à l'enclavement d'un lieu, ce qui peut nuire aux opérations de secours (déblaiement, évacuation, ravitaillement) si ce lieu venait à être impacté.

Dans le cas d'une vallée comme celle de l'Ubaye où le tourisme est le principal moteur économique, la desserte routière doit être la plus opérationnelle possible. Il est en effet nécessaire d'avoir une accessibilité normale depuis l'entrée de la vallée jusqu'aux multiples sites touristiques : stations de sports d'hiver et d'été, sites de sports d'eaux vives, centres d'hébergement, résidences touristiques, etc. Il faut aussi ajouter à cela les déplacements autochtones : mouvements pendulaires (résidence-travail), ramassages scolaires, ramassages des déchets, accès aux soins, etc. Un arrêt, même temporaire, de ces flux peut remettre en cause l'intégrité du territoire desservi. Enfin, face à l'importance de la D900 dans le commerce transfrontalier, une coupure de cet axe peut entraîner des préjudices économiques à l'échelle régionale franco-italienne.

H CRITERES DE VULNERABILITE

H.1 LES FICHES DE DIAGNOSTIC

La phase de diagnostic proprement dite s'est déroulée durant une semaine en octobre 2010 à la faveur d'un stage de terrain collectif mobilisant la promotion des 18 étudiants du master 2 GCRN de l'Université de Montpellier 3, placée sous la direction scientifique de F. Leone et F. Vinet. Le diagnostic a pu se faire grâce à la complicité des autorités communales et des services RTM de Barcelonnette. Un premier recueil de la donnée existante (BD IGN, BD RTM, rapports et zonages PPR, études diverses, données INSEE) a été complété par un diagnostic systématique de vulnérabilité de deux catégories d'éléments à risque : les bâtiments et les ouvrages de franchissement des cours d'eau. Ces deux familles d'éléments exposés ont donné lieu à des fiches descriptives synthétiques afin d'alimenter le SIG du projet. Au total, ce sont 388 bâtiments et 25 ouvrages routiers qui ont été géoréférencés et

décrits sur le terrain sur la base de plusieurs critères et indicateurs de vulnérabilité. Par ailleurs, chaque bassin-versant à également fait l'objet d'une fiche descriptive synthétisant des informations sur l'exposition au risque et les événements historiques impliquant des crues et des laves torrentielles.

H.1.1 LA FICHE « BATI »

Ces fiches de présentation de la vulnérabilité par bâti ont été construites par thèmes. Dans un premier temps, des informations concernant la localisation et l'exposition du bâtiment ont été recensées. Une photographie vient illustrer chaque bâtiment. Le premier thème aborde les critères de vulnérabilité physique des bâtiments, le second les critères humains, le troisième les enjeux présents. Des données sur l'aléa présent sont également reportées (zonage PPR et événements connus). Ces critères sont décrits plus loin dans ce rapport. Ces fiches nous donnent des informations très précises sur chaque bâtiment, par ailleurs géoréférencé (**figure H1**).

FICHE DE VULNERABILITE DU BATI																					
Commune : Faucon-de-Barcelonnette Date de passage : 7/10/2010 ID habitation : 04086-3-003																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #333; color: white;">Données sur l'aléa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Torrent concerné: Faucon</td> </tr> <tr> <td>Date de la dernière crue: 2008</td> </tr> <tr> <td>Situation de l'habitation par rapport au zonage réglementaire: ZB (zone bleue)</td> </tr> </tbody> </table>	Données sur l'aléa	Torrent concerné: Faucon	Date de la dernière crue: 2008	Situation de l'habitation par rapport au zonage réglementaire: ZB (zone bleue)																
Données sur l'aléa																					
Torrent concerné: Faucon																					
Date de la dernière crue: 2008																					
Situation de l'habitation par rapport au zonage réglementaire: ZB (zone bleue)																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #333; color: white;">Commentaires</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Abri en bois très vulnérable.</td> </tr> </tbody> </table>		Commentaires	Abri en bois très vulnérable.																		
Commentaires																					
Abri en bois très vulnérable.																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #800000; color: white;">Critères de vulnérabilité physique</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Classe de vulnérabilité du bâti</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td>Surélévation du rez de chaussée</td> <td style="text-align: center;">OUI</td> </tr> <tr> <td>Présence de R-1</td> <td style="text-align: center;">OUI</td> </tr> <tr> <td>Nombre de petites ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Nombre de grandes ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> </tbody> </table>	Critères de vulnérabilité physique		Classe de vulnérabilité du bâti	B	Surélévation du rez de chaussée	OUI	Présence de R-1	OUI	Nombre de petites ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)	0	Nombre de grandes ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)	1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #800000; color: white;">Critères de vulnérabilité humaine</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fonction du rez de chaussée</td> <td style="text-align: center;">INAB</td> </tr> <tr> <td>Présence d'étages</td> <td style="text-align: center;">OUI</td> </tr> <tr> <td>Nombre d'étage</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> </tbody> </table>	Critères de vulnérabilité humaine		Fonction du rez de chaussée	INAB	Présence d'étages	OUI	Nombre d'étage	1
Critères de vulnérabilité physique																					
Classe de vulnérabilité du bâti	B																				
Surélévation du rez de chaussée	OUI																				
Présence de R-1	OUI																				
Nombre de petites ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)	0																				
Nombre de grandes ouvertures sur la/les façade(s) exposée(s)	1																				
Critères de vulnérabilité humaine																					
Fonction du rez de chaussée	INAB																				
Présence d'étages	OUI																				
Nombre d'étage	1																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #800000; color: white;">Enjeux</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fonction du bâtiment</td> <td style="text-align: center;">INAB</td> </tr> <tr> <td>Nature de l'activité</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Nombre d'occupants</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td>Bâtiment occupé (instant « t » du passage)</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>		Enjeux		Fonction du bâtiment	INAB	Nature de l'activité		Nombre d'occupants	0	Bâtiment occupé (instant « t » du passage)	0										
Enjeux																					
Fonction du bâtiment	INAB																				
Nature de l'activité																					
Nombre d'occupants	0																				
Bâtiment occupé (instant « t » du passage)	0																				

Figure H1 - Exemple de fiche de diagnostic de vulnérabilité d'un bâti exposé

H.1.2 LA FICHE « OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT »

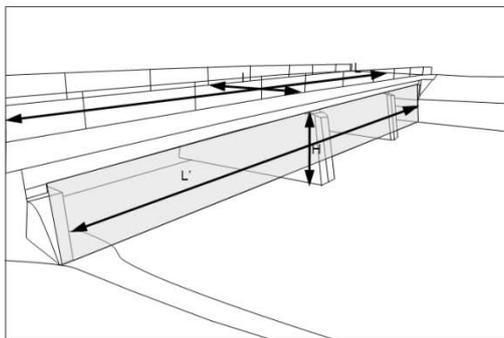
Chaque ouvrages a été identifié, localisé sur orthophoto et carte I.G.N., puis répertorié au moyen de quatre informations : nom de la commune, nom du torrent, nom de l'ouvrage ou du lieu-dit. Chacun de ces ouvrages a ensuite été géoréférencé en utilisant l'identifiant du tronçon présent dans la couche « routes » de la BD Carto® de l'I.G.N. Deux critères essentiels y sont renseignés : la nature de l'ouvrage et ses dimensions. La nature de l'ouvrage distingue les types de pont (pont à poutre ou pont en arc dans le cadre de cette étude), la nature des piles, la nature du tablier, et la nature du revêtement de l'ouvrage. L'analyse des dimensions fait appel à une notion propre aux ouvrages de franchissement, le tirant d'air. La section d'un ouvrage résulte de l'addition de son tirant d'eau (section mouillée ou section hydraulique) et de son tirant d'air (section libre de l'ouvrage). Le contexte géographique de la zone induit un tirant d'eau très faible à nul. Par conséquent, on a assimilé le tirant d'air des ouvrages étudiés à leur section totale. L'analyse a pris en compte quatre types de mesures : l'ouverture totale de l'ouvrage, sa largeur, sa longueur et hauteur de tirant d'air. Une information fonctionnelle a été ajoutée à la base de données. Il s'agit des éventuelles limitations de poids et de vitesse en vigueur pour chaque ouvrage. Un indice de vulnérabilité et une échelle de risque sont attribués à chacun des ouvrages, suivant une méthodologie spécifique. La base de données est complétée par une série de six photographies par ouvrage. Ces photographies fonctionnent par paire et représentent les vues amont et aval, rive gauche et rive droite, section amont et section aval de l'ouvrage. La base identifie également les événements torrentiels propres à chacun des ouvrages. Seuls les événements connus entre 1950 et 2010 ont été recensés. On estime en effet que les événements antérieurs à cette date ne sont pas révélateurs de la vulnérabilité actuelle des ouvrages de franchissement (**figure H2**).

Id : GAL_1

FICHE OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT

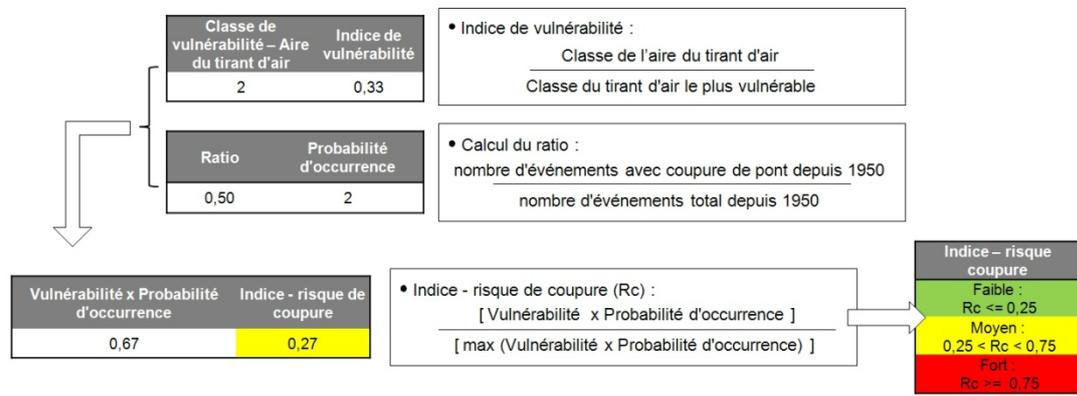
Commune : Enchastrayes Torrent : Des Galamonts
 Nom de l'ouvrage/lieu dit : Pont des Galamonts

Date de passage : 08/10/10
 ID tronçon (BD Carto IGN) :



Caractéristiques physiques	
Type de pont	Pont à poutres
Nature des piles	Béton
Nature du tablier	Acier
Revêtement	Acier
Ouverture totale L (en mètre)	18
Longueur tirant d'air L' (en mètre)	4
Largeur ouvrage l (en mètre)	17
Hauteur tirant d'air (H, en mètre)	3,5
Aire du tirant d'air (en gris) (m²)	59,5

Valeur fonctionnelle	
Limitation poids	Non communiquée
Limitation vitesse	Nom communiquée
Nombre de bâtiments isolés en cas de coupure	
Longueur du plus court chemin pour contourner ce pont	
Commentaires	
Présence d'un seuil	



Phénomène recensé dans la BD RTM :

Evénements depuis 1950	Evénements avec coupures/dommages depuis 1950
2	1

Phénomène recensé dans la BD RTM ayant affecté l'ouvrage de franchissement :

Date de l'évènement	Commune concernée	Site	Type de phénomène	Observation	Détail des impacts
juin 1957	ENCHASTRAYES	Les GALAMONDS	Crue torrentielle	NC	Destruction du pont et du remblai du chemin d' accès à la ferme des Galamonds. Accès à la ferme interrompu .



Source : LEONE, 8 octobre 2010

Figure H2 – Exemple de fiche de diagnostic de vulnérabilité d'un ouvrage de franchissement

H.1.3 LA FICHE TORRENT

Ces fiches de synthèse ont été construites afin de comparer l'exposition au risque par bassin versant. Les données présentes sur cette fiche sont aussi classées par thèmes (**figure H3**). Le premier aborde la vulnérabilité physique et comprend sept indicateurs. Le premier concernant le pourcentage de bâtiments situés en zone bleue et rouge du torrent en question. Ces zones sont celles du P.P.R. appliqué ou soumis à l'enquête publique. Ensuite, deux informations d'ordre stratégique sont renseignées : la présence d'un centre décisionnel et/ou de secours en zone à risque (bleue ou rouge). Toujours au sein de cette zone à risque, nous recensons la présence ou non d'un Etablissement Recevant du Public (E.R.P.), celle d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (I.C.P.E.). Dans un second temps, nous y traitons la question de la vulnérabilité humaine avec des données sur les populations comme le nombre de personnes potentiellement exposées. Une analyse quantitative du pourcentage de personnes en zones bleues et rouges est proposée, ainsi qu'un taux d'occupation pour les mois les plus fréquentés et les mois les moins fréquentés. Grâce aux données de l'I.N.S.E.E. et aux témoignages des personnes rencontrées, nous avons pu établir une répartition par tranche d'âge. Ce facteur peut en effet accroître ou diminuer la vulnérabilité humaine de la zone d'étude. Nous avons également recensé le nombre de personnes à mobilité réduite ou handicapées et les principaux événements torrentiels historiques.

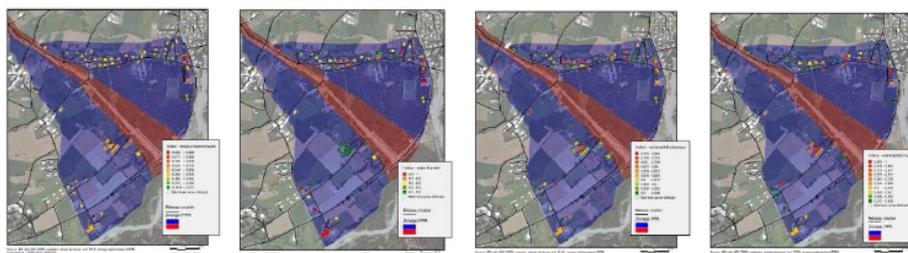
FICHE SYNTHESE PAR TORRENT		
N° Torrent : 6	Nom torrent : Les Sanières	Commune(s) : Jausiers

Commune(s) exposée(s) au risque de lave torrentielle :

Données sur les bâtiments exposés	
Pourcentage de bâtiments en zone rouge	0%
Pourcentage de bâtiments en zone bleue	100%
Présence d'un centre décisionnel en zone rouge ou bleue	Non
Présence d'un centre de secours en zone rouge ou bleue	Non
Présence d'ERP	Oui
Présence d'ICPE	Non
Les principaux types d'enjeux (camembert)	Habitations (HINDIV 37% et RESID 21%)

Données sur la population	
Nombre d'habitants exposés	185
Pourcentage de personnes en zone rouge	0%
Pourcentage de personnes en zone bleue	100%
Taux d'occupation pour les mois les plus fréquentés	90%
Taux d'occupation pour les mois les moins fréquentés	72%
Répartition par tranche d'âge	Entre 0 et 29 ans : 28.2% Entre 30 et 59 ans : 42.6% Plus de 60 ans : 29.2%
Nombre de personnes à mobilité réduite ou handicapées.	-

Cartographie des enjeux à l'échelle du torrent :



Evènements historiques :

Date et nature du phénomène dommageable	Principaux dommages constatés
21/07/1900 lave torrentielle	Destruction de 133 barrages et 49 endommagés
14/06/1957 lave torrentielle	Recul des berges jusqu'à 10m ; récoltes détruites
16/09/1960 eaux boueuses	Inondations de caves ; barrages détruits
23/06/1962 eaux boueuses	Route vers Fumet coupée
25/07/1963 lave torrentielle	Chemin d'accès aux barrages coupé
08/07/1976 lave torrentielle	Canal d'arrosage endommagé ; barrages affouillés
13/08/2000 lave torrentielle	Rambardes de pont arrachées

Indices de risque et de vulnérabilité à l'échelle du torrent :

Indice de risque moyen	Indice de vulnérabilité moyen
0,167	0,560
Indice de risque du torrent	Indice de vulnérabilité du torrent
0,139	0,146

Figure H3 – Exemple de fiche synthétique « torrent »

H.2 DECREIRE LA VULNERABILITE DES BIENS ET DES PERSONNES

H.2.1 LES FACTEURS DE VULNERABILITES

Les zones étudiées présentent différentes vulnérabilités. La vulnérabilité est une composante fondamentale de l'appréciation du risque qui se définit comme une propension au dommage (Leone & Vinet, 2006 ; Leone, 2007). Elle peut se mesurer par le taux d'endommagement attendu d'un enjeu donné. Elle repose sur ensemble de facteurs de fragilité qui contribuent à la réalisation des dommages en cas de survenue de l'aléa. Ces facteurs peuvent être d'ordre physique, humain, économique, organisationnel, etc. Pour notre étude, trois types de vulnérabilités ont été considérés en fonction de la nature des éléments exposés : structurelle (du bâti et des infrastructures), humaine (des personnes), et fonctionnelle (du réseau routier et des accès).

La vulnérabilité structurelle s'intéresse aux dégâts qu'un aléa peut causer aux bâtiments, aux infrastructures routières (ponts) ainsi qu'aux biens mobiliers. Son évaluation repose principalement sur l'analyse de résistance des infrastructures, variable suivant leur nature et l'intensité de l'aléa. Elle est considérée à un instant t qui correspond à la date du diagnostic.

La vulnérabilité humaine concerne les personnes et leur capacité à faire face à un aléa. Cette fragilité humaine dépend de facteurs physiques, sociologiques, culturels, psychologiques (conscience du risque, connaissance des moyens de protection). Dans cette étude, elle a été définie uniquement à travers la capacité de protection des bâtiments.

La vulnérabilité fonctionnelle des réseaux (routes principalement ici) concerne le dysfonctionnement potentiel des échanges et mobilités offertes par ce réseau en temps normal. Elle a été évaluée à travers les pertes d'accessibilité territoriale dues à des ruptures d'ouvrages de franchissement. Elle dépend de la vulnérabilité directe de ces ouvrages mais également des possibilités de contournement des points de blocage, donc de l'organisation spatiale du réseau routier. Elle a une implication directe sur les capacités de secours et d'évacuation.

Pour définir ces facteurs de vulnérabilité, nous avons eu recours à un certain nombre de critères renseignés sur le terrain et quantifiés au moyen d'indices.

H.2.2 LE CHOIX DES CRITERES

H.2.2.1 Les critères de vulnérabilité du bâti

Ces critères sont principalement liés à la structure extérieure de la maison (résistance, nombre d'ouvertures, nombre d'étages, hauteur du plancher) (**tableau H2**). Le niveau de résistance de chaque bâtiment a été qualifié au moyen d'une échelle de résistance (classes de vulnérabilité) comportant 5 niveaux intégrant différents critères de solidité. Cette classification est inspirée et adaptée de la typologie du bâti développée consécutivement au tsunami de 2004 en Indonésie (Leone et al., 2007). Elle intègre la diversité du bâti rencontré localement et a été validée par l'ensemble de l'équipe (**tableau H1**).

Type de bâtiments	Bâtiment léger sans fondation	Bâtiment léger avec fondation	Bâtiment en maçonnerie légère	Bâtiment en maçonnerie renforcée individuel	Bâtiment en maçonnerie renforcée collectif
Classes de vulnérabilité	A	B	C	D	E
Critère d'identification terrain	Construction légère en générale de plain pied sans fondation en bois, tôle et autres bungalows	Construction légère, en générale de plain pied avec fondation, de type préfabriquées ou chalat léger	Construction de type petite villa individuelle en parpaing ou brique	Bâtiment traditionnel de montagne en moellon ou pierre de taille	Bâtiment de grande taille de type habitat collectif. Construction avec murs mitoyens et plusieurs étages
Vue terrain					

Tableau H 1 - Les classes de vulnérabilité physique du bâti adoptées pour le diagnostic

Descriptif des classes :

Classe A : elle regroupe les constructions les moins résistantes structurellement, donc les plus vulnérables. Les bâtiments de la classe A sont individuels et se caractérisent par la légèreté de leur structure et l'absence de fondation. On trouve dans cette catégorie les bâtiments insalubres à l'abandon, les caravanes et les mobil-homes

Classe B : elle rassemble des bâtiments individuels et des maisons mitoyennes *a priori* plus résistants que ceux de la classe A. Afin de les différencier plus facilement de la classe suivante (C), les édifices de la classe B sont des bâtiments légers, en général de plain pied, avec fondations. Ce sont majoritairement des chalets en bois ou des constructions préfabriquées.

Classe C : on y regroupe les bâtiments en maçonnerie légère. Ce sont des constructions toujours individuelles, en parpaing ou en brique, de type petite villa.

Classe D : les bâtiments de cette classe se distinguent de la précédente par une structure plus rigide formée de matériaux de meilleure qualité. Leur résistance en est donc supérieure. Il s'agit de constructions beaucoup plus massives, mais toujours individuelles. Ce sont des bâtiments traditionnels de montagne en moellons ou pierres de taille.

Classe E : cette classe correspond aux bâtiments collectifs de type « immeuble ». Ils sont plus grands et maçonnés, leur structure est renforcée. Dans la majorité des cas, ce sont des constructions de grande taille de type habitat collectif, avec murs mitoyens et comportant plusieurs étages.

La présence d'un R-1 dans une maison augmente les dégâts aux biens si celui-ci est aménagé, mais aussi la vulnérabilité des personnes en cas d'occupation lors d'une crue torrentielle. La vulnérabilité du bâti et des personnes peut être réduite par une surélévation du plancher du côté du cours d'eau. En effet, cette surélévation empêchera l'eau d'entrer brutalement dans le bâtiment.

La présence ou non d'ouvertures est un autre critère important de vulnérabilité. Dans le cas des crues torrentielles à fort charriage solide, les fenêtres et les portes, de surcroît vitrées, peuvent être facilement défoncées. Une distinction a été faite entre petites et grandes ouvertures. Une petite ouverture correspond à la taille d'une porte ou d'une fenêtre standard, tandis qu'une grande désigne une taille supérieure à deux portes (exemples : baie vitrée, porte de garage).

Critère	Pertinence	Classe
Classe de vulnérabilité	Informe sur les capacités de résistance du bâtiment	A B C D E
Présence d'un R-1	Augmente la vulnérabilité des personnes si occupé, augmente les dégâts aux biens si aménagé	Oui Non
Surélévation du plancher sur façade exposée	Réduit la vulnérabilité du bâti et des personnes	Oui Non
Nombre de petites ouvertures	Permet d'évaluer l'étanchéité du bâtiment	0 1 à 2 3 à 4 5 et plus
Nombre de grandes ouvertures		0 1 à 2 3 et plus

Tableau H2 - Les critères de vulnérabilité du bâti

H.2.2.2 Les critères de vulnérabilité humaine

Pour évaluer la vulnérabilité humaine, nous avons identifié dans un premier temps le nombre de personnes présentes dans chaque bâtiment. En effet, un nombre élevé de personnes dans un logement peut poser des contraintes lors d'une éventuelle évacuation en situation d'urgence. Pour cela, une fonction a été attribuée à chacun des rez-de-chaussée (**tableau H3**). Cette fonction informe sur la nature de l'occupation et la localisation possible des personnes dans le bâtiment (**tableau H4**).

SECU (secours, sécurité)
ADMI (services privés et publics)
CULTE (lieu de culte)
BAR (bar, restaurant)
HOTEL
RESID (résidence secondaire)
HINDIV (bâtiment d'habitation individuel)
HINDIV_P (bâtiment d'habitation individuel à caractère patrimonial)
HCOL (au moins un mur mitoyen)
HCOL_P (au moins un mur mitoyen à caractère patrimonial)
INAB (bâtiment inhabité, abandonné, bâtiment en construction)
AGRI (bâtiment agricole, bergerie, grange)
DOC (cabinet médical, dentiste...)
PCOM (petit commerce, commerce de proximité)
CCOM (centre commercial, supermarché)
EDUC (école)
SPORT (centre sportif, gymnase, centre équestre...)
INFRA (infrastructure, équipement, local électrique, réservoir...)
RGROUP (zone de regroupement divers en plein air, événement ponctuel : cour de récré, aire de jeux, place)

Tableau H3 - La nomenclature des fonctions attribuées aux rez-de-chaussée des bâtiments

La présence d'étages et le nombre d'étages ont également été traités pour la vulnérabilité humaine. En effet, l'absence d'étage est un facteur aggravant puisque les personnes résidentes ne peuvent trouver un refuge vertical en cas d'inondation.

Critère	Pertinence	Classe
Fonction du rez-de-chaussée	Informe sur la nature de l'occupation, des pertes potentielles et la localisation des personnes dans le bâtiment	H-INDIV, H-COL, ADMIN, RGROUP, INDUS, PCOM, RESID, INHAB
Présence d'étage	Renseigne sur la possibilité des personnes à se réfugier	Oui Non
Nombre d'étages	Renseigne sur la possibilité des personnes à se réfugier	R0 R1 R2 R3

Tableau H4 - Les critères de vulnérabilité humaine

H.2.2.3 L'évaluation des enjeux humains

Faute de données d'enquêtes sur l'occupation réelle des bâtiments, les enjeux humains ont été évalués au moyen des fonctions des bâtiments (**tableau H5**). Pour chaque fonction, nous avons défini une capacité d'accueil crédible qui a été extrapolée à l'ensemble des bâtiments d'une même classe fonctionnelle. Un dernier critère concerne l'occupation du bâtiment à l'instant t du diagnostic (hors saison touristique) afin de définir un taux d'occupation saisonnière des bâtiments, purement indicatif.

Critère	Pertinence	Classe
Fonction du bâtiment	Informe sur la nature de l'occupation, des pertes potentielles et la localisation des personnes dans le bâtiment	H-INDIV, H-COL, ADMIN, RGROUP, INDUS, PCOM, RESID, INHAB
Fonction de l'activité pratiquée	Renseigne sur la caractéristique d'accueil du bâtiment et le nombre potentiel de personne pouvant être à l'intérieur	Commentaires
Occupation à l'instant t de passage	Permet de définir un taux d'occupation entre haute et basse saison	Haute saison Basse Saison
Nombre de personnes	Renseigne sur le nombre de victimes potentiels face à une catastrophe	Seul = 1 Couple = 2 Famille = 3 à 5 5 et plus

Tableau H5 - Les critères de quantification des enjeux humains

H.2.2.4 Les critères de vulnérabilité des ouvrages de franchissement

Parmi les différents critères propres aux ouvrages de franchissement de cours d'eau que sont le « Type de pont », la « Nature du tablier » ou encore la « Nature du revêtement », le principal critère de vulnérabilité est la transparence hydraulique face à une crue ou une lave torrentielle. Elle a été estimée en calculant la section totale libre de l'ouvrage. Ces surfaces ont été regroupées en six classes, la dernière exprimant la vulnérabilité la plus élevée (**tableau H6**). A chaque classe a été attribué un indice de vulnérabilité compris entre 1 et 6.

Aire de la section de tirant d'air (en mètres carrés)	Classe de vulnérabilité
100 et plus	1
40 à 100	2
20 à 40	3
10 à 20	4
5 à 10	5
0 à 5	6

Tableau H6 – Classes de vulnérabilité des ouvrages de franchissement basées sur la section libre sous l'ouvrage (aire de tirant d'air en m²)

I LA MESURE DU RISQUE AU MOYEN D'INDICES

I.1 UNE PONDERATION « A DIRE D'EXPERT »

Afin de procéder au calcul des indices intermédiaires et des indices composites de risque, un important travail de hiérarchisation et de pondération des critères et classes de vulnérabilité a été entrepris. Pour cela nous avons utilisé une approche à dire d'expert, basée sur un questionnaire adressé à l'ensemble des étudiants et enseignants impliqués dans l'étude (20 personnes). Ainsi, chaque classe de critère de vulnérabilité s'est vue attribuée la note moyenne du groupe de jeunes experts ainsi constitué.

Cette méthode rationalise le processus conduisant aux choix par la vision systémique qu'elle permet (Ben Mena, 2000). C'est en cela qu'elle constitue un outil de négociation et d'aide à la décision. En termes de limites on peut noter la difficulté de choisir les critères. D'ailleurs certains critères choisis *a priori* n'ont pas été retenus tandis que d'autres ont été mal définis. La subjectivité de la pondération a cependant été contrebalancée par la multiplicité des avis d'experts.

Conformément à une approche analytique du risque basée sur les probabilités de pertes, ces pondérations ont ensuite permis de construire trois familles d'indices : **Indice d'aléa**, **Indices de vulnérabilités**, **Indices d'enjeux**, dont le produit final débouche sur deux indices de risque composites : **Indice de risque humain** et **Indice de risque économique**. Le traitement cartographique de ces indices finaux permet d'apprécier la variabilité spatiale du risque, de localiser des foyers de risque et d'en dégager des prescriptions en matière de prévention mais également d'accessibilité en cas de crise. Une troisième catégorie d'indice a également été expérimentée, de manière à intégrer le préjudice d'une dégradation de l'accessibilité routière dans l'indice de risque humain. Nous l'avons nommé **Indice de risque humain combiné**. Notons au passage que la modélisation des pertes d'accessibilité repose sur des scénarios de coupure de tronçons (ouvrages de franchissement) intégrant un **Indice de risque de coupure**. La construction de cet indice spécifique est illustrée dans l'exemple de fiche « ouvrage de franchissement » et sera développée plus loin dans le chapitre consacré aux **scénarios d'accessibilité des secours**.

Les différents indices ont été construits sur deux niveaux d'agrégation spatiale : sur le bâti ou les ouvrages de franchissement (indices spécifiques) et sur des mailles géométriques de 50 m de côté (indices globaux). Ce traitement cartographique différencié permet de visualiser les niveaux de risque à deux échelles spatiales différentes : celle du bassin-versant, et celle de la moyenne vallée de l'Ubaye. Le traitement des indices par mailles homogènes permet d'intégrer les indicateurs d'accessibilité obtenus pour différents scénarios de coupure du réseau routier à l'échelle de la moyenne vallée de l'Ubaye.

Une synthèse de ces familles d'indices et de leurs critères d'évaluation est présentée dans le tableau suivant (**tableau I1**).

Famille d'indice	Nom		Critères d'évaluation et classes de valeurs
Vulnérabilités	Indice-vulnérabilité humaine (IVH)		Présence d'au moins un étage : oui, non
			Petites ouvertures (portes et fenêtres) : 0; 1 à 2; 3 à 4; 5 et plus
			Grandes ouvertures (deux largeurs de porte, baies vitrées, vérandas, portes-fenêtres) : 0; 1 à 2; 3 et plus
	Indice-vulnérabilité physique du bâti (IVP)		Classes de vulnérabilité du bâti : A, B, C, D, E
			Petites ouvertures (portes et fenêtres) : 0; 1 à 2; 3 à 4; 5 et plus
			Grandes ouvertures : définies par deux largeurs de porte. Baies vitrées, vérandas, portes-fenêtres : 0; 1 à 2; 3 et plus
Indice-vulnérabilité des ouvrages de franchissement (IVO)		Aire de la section du tirant d'air (m ²) : 0 à 5, 5 à 10, 10 à 20, 20 à 40, 40 à 100, 100 et plus	
Enjeux	Indice-enjeu humaine (IEH)		Nombre d'occupants : seul (1), couple (2), famille (3 à 5), autre (5 et plus)
	Indice-enjeu économique (IEE)	Valeur marchande	Classes de vulnérabilité du bâti : A, B, C, D, E
		Valeur d'usage	Fonction du bâti : DECIS, E.R.P., ACTEA, GAZ/ELEC, HAB, INAB
Aléa	Indice-aléa des zones PPR (IA)		Zone bleue du P.P.R (aléa moyen)
			Zone rouge du P.P.R (aléa fort)
	Indice-probabilité d'occurrence (PO)		Ratio entre nombre de crues avec ou sans dommages depuis 1950
Accessibilité	Temps d'accès des secours selon les seuils réglementaire (TAS)		Classes de temps d'accès: 0-20 mn; >20mn; isolement
Risque spécifique (bâti ou ouvrages)	Indice-risque humain spécifique (IRHS)		$(IA \cdot IVH \cdot IEH) / IRHS_{max}$.
	Indice-risque économique spécifique (IRES)		$(IA \cdot IVP \cdot IEE) / IRES_{max}$.
	Indice-risque coupure de route (IRCR)		$(IVO \cdot PO) / IRCR_{max}$.
Risque global (agrégés sur mailles)	Indice-risque humain global (IRHG)		$\Sigma IRHS / IRHG_{max}$.
	Indice-risque économique global (IREG)		$\Sigma IRES / IREG_{max}$.
	Indice-risque humain combiné (humain et accessibilité) (IRC)		Matrice de croisement (IRHG et TAS)

Tableau I1 - Les différentes familles d'indices spatialisés (géo-indices) construits sur la zone d'étude

I.2 INDICES SPECIFIQUES DE VULNERABILITE

Pour chaque bâtiment de notre zone d'étude, nous avons défini un indice de vulnérabilité physique et un indice de vulnérabilité humaine (**tableau I2** et **tableau I3**). Afin d'obtenir des indices de vulnérabilité compris entre 0 et 1, les valeurs ont été divisées par la valeur maximale de l'échantillon (soit 55 pour la vulnérabilité physique et 22 pour la vulnérabilité humaine).

Vulnérabilité physique du bâti							
Code critère	Hiérarchisation La valeur la plus grande (5) correspond au critère le plus vulnérable	Critères de vulnérabilité physique	Pondération La valeur la plus grande (5) correspond au critère le plus vulnérable				
			5	4	3	2	1
A	5	Classe de vulnérabilité	A	B	C	D	E
B	4	Nombre de grandes ouvertures	3 et plus		3	2	1
C	3		Nombre de petites ouvertures	4	3	2	1
D	2	Présence de R-1		3 à 4		2	1
E	1		Surélévation du RDC	5 et plus		oui	non
						non	oui

Indice spécifique de vulnérabilité physique : $IVP = [5 \times (a) + 4 \times (b) + 3 \times (c) + 2 \times (d) + 1 \times (e)] / 55$

Tableau I2 - Tableau de pondération des critères de vulnérabilité physique (les notes sont en gras) et calcul de l'indice spécifique de vulnérabilité physique

Vulnérabilité humaine						
Code critère	Hiérarchisation La valeur la plus grande (3) correspond au critère le plus vulnérable	Critères de vulnérabilité humaine	Pondération La valeur la plus grande (4) correspond au critère le plus vulnérable			
			4	3	2	1
f	3	Nombre d'étage refuge	4	3	2	1
g	2		Nombre de grandes ouvertures	0	1	0
h	1	Nombre de petites ouvertures		3 et plus	1 à 2	0
				4	3	2
			5 et plus	3 à 4	1 à 2	0

Indice spécifique de vulnérabilité humaine : $IVH = [3 \times (f) + 2 \times (g) + 1 \times (h)] / 22$

Tableau I3 - Tableau de pondération des critères de vulnérabilité humaine (les notes sont en gras) et calcul de l'indice spécifique de vulnérabilité humaine

Concernant la vulnérabilité humaine, le critère le plus fortement noté est l'absence d'au moins un étage refuge. Comme nous l'avons vu précédemment la présence d'un étage est un critère primordial qui joue sur la capacité de fuite. C'est pourquoi nous avons choisi d'attribuer une pondération non linéaire à ce critère. Cette pondération isolée montre l'importance de ce critère pour la vulnérabilité humaine.



Sur le terrain certains bâtiments se sont révélés être très vulnérables sur le plan physique face à une lave torrentielle. Le poids des bâtiments les plus vulnérables face à cet aléa est de 55, suivant la pondération attribuée à chaque critère présélectionné

Hierarchisation	critères de vulnérabilité physique	pondération	multiplication des 2 pondérations
5	Classe de vulnérabilité: A	5	5 X 5 =25
4	Nombre de grandes ouvertures : 3 et	3	3 X 4 =12
3	Nombre de petites ouvertures : 5 et	4	3 X 4 =12
2	Présence de R-1: oui	2	2 X 2 =4
1	surrelévation du RDC: non	2	1 X 2 =2
Somme des pondérations			55

Figure I4 – Cas du bâtiment présentant la note de vulnérabilité physique la plus forte sur la zone d'étude

I.3 INDICES SPECIFIQUES D'ENJEUX HUMAINS ET ECONOMIQUES

Deux familles d'enjeux ont été retenues pour exprimer le risque en termes de pertes potentielles. Ils s'expriment sur deux échelles de valeurs : **valeur humaine** et **valeur économique**. La valeur humaine affectée à chaque bâtiment est mesurée par le nombre d'occupants potentiels. Pour le bâti résidentiel, la valeur économique est basée sur sa valeur marchande, définie en fonction de la classe de vulnérabilité. Les bâtiments de classe E ont le poids économique le plus élevé. Pour les autres bâtiments la valeur économique est appréciée sur une échelle plus arbitraire basée sur la fonction économique du bien (valeur d'usage). Les E.R.P. ont reçu la pondération la plus importante car ils concentrent la plus grande valeur économique. Les indices spécifiques de valeur sont définis par les fonctions suivantes (**tableau I5**).

Code critère d'enjeux	Enjeux	Critères	Pondération					
			5	4	3	2	1	
A	Valeur humaine	Nombres d'occupants	AUTR (> 5 pers.)	FAMILLE (3 à 5 pers.)	COUPLE (2 pers.)	SEUL (1 pers.)	INAB (0 pers.)	
B	Valeur économique	Valeur d'usage	6	5	4	3	2	1
			E.R.P.	DECIS	ACTEA	GAZ/ELEC	HAB	INAB
C	Valeur économique	Valeur marchande (classe de vulnérabilité du bâti)	5	4	3	2	1	
			E	D	C	B	A	

Indice spécifique d'enjeu humain : IEE = (a) / 5
Indice spécifique d'enjeu économique : IEE= [(b) + (c)] / 11

Tableau I5 – Tableau de pondération des enjeux humains et économiques (les notes sont en gras) et calcul des indices spécifiques d'enjeux

Les classes de valeur marchande de nos catégories de bâtiments résidentiels ont été obtenues auprès des agences immobilières de la région. Ce travail nous permet de justifier notre pondération (**tableau I6**).

Classe du bâti	Valeur économique	Pondération
A	10 000 euros < x < 60 000 euros	1
B	60 000 euros < x < 170 000 euros	2
C	170 000 euros < x < 300 000 euros	3
D	300 000 euros < x < 500 000 euros	4
E	Plus de 500 000 euros	5

Tableau I6 - Classes de valeur économique des bâtiments résidentiels

I.4 INDICES SPECIFIQUES DE RISQUES HUMAIN ET ECONOMIQUE

Afin d'évaluer et spatialiser le risque dans la vallée de l'Ubaye face aux *debris flows*, nous avons donc défini deux indices de risque (humain, et économique). Ils prennent en compte les variables définies précédemment, conformément à une approche analytique du risque qui croise l'aléa, les enjeux et leurs vulnérabilités. Ces indices ont été établis pour chacun des bâtiments diagnostiqués sur les 5 bassins-versants, selon les modes de calcul suivants. Ils s'expriment, tout comme les indices intermédiaires, entre 0 et 1.

Indice de risque humain spécifique IRHS	$(\text{Indice de vulnérabilité humaine} \times \text{Indice d'enjeu humain} \times \text{Indice d'aléa}) / \text{IRHS}_{\text{max}}$
Indice de risque économique spécifique IRES	$(\text{Indice de vulnérabilité physique} \times \text{Indices d'enjeu économique} \times \text{Indice d'aléa}) / \text{IRES}_{\text{max}}$

Quant à lui, l'aléa a été introduit dans l'équation du risque avec deux niveaux de gravité conformes aux deux niveaux des cartes d'aléa des PPRn de la zone d'étude. Afin de différencier ces niveaux, la présence d'un aléa moyen a été codée par la valeur 0,50 et l'aléa fort par 1. Une évaluation plus poussée consisterait à définir cet aléa au moyen de paramètres physiques (vitesses, volumes) exploitables dans des matrices ou des courbes d'endommagement (Leone, 1996 et 2007).

I.5 VARIABILITE SAISONNIERE DES ENJEUX HUMAINS

La vallée de l'Ubaye est connue pour sa forte attractivité touristique notamment durant la période hivernale mais aussi durant la période estivale. Dans le bassin de Barcelonnette, la population a connu une augmentation de 9,2 %, entre 1990 et 2003 (Etienne, 2007). Le graphique suivant représente la fréquentation touristique à travers la répartition des nuitées du département des Alpes de Haute-Provence (**figure I1**). On voit nettement que les pics de fréquentation se situent entre les mois de juin et septembre. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la haute saison touristique correspond donc surtout à l'été.

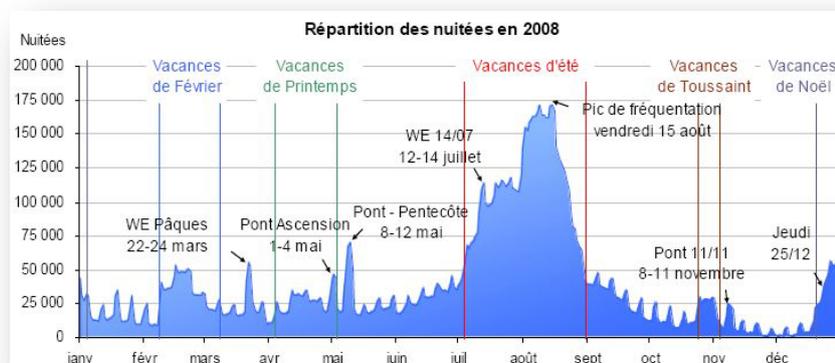


Figure I1 - Répartition des nuitées en 2008 dans les Alpes-de-Hautes-Provence (source Agence de développement touristique des Alpes-de-Haute-Provence)

Ce pic de fréquentation est à mettre en relation avec les fréquences des crues et des laves torrentielles dans le secteur de la moyenne vallée de l'Ubaye, élevées de juin à août (**figure I2**).

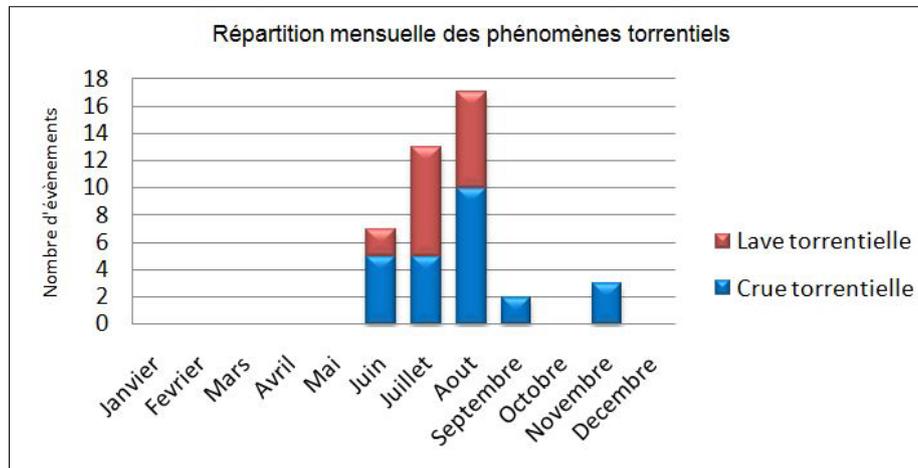


Figure I2 - Répartition mensuelle des phénomènes torrentiels entre 1868 et 2008 sur le secteur d'étude (sources BD RTM)

Cependant notre évaluation du risque humain n'intègre pas cette variabilité saisonnière, faute d'accès à une information très détaillée sur les taux d'occupation des bâtiments au cours de l'année. Il serait utile de mesurer ce risque aux deux saisons (basse et haute). On peut donc considérer que notre évaluation du risque est maximisante, puisqu'elle considère une occupation permanente et optimale des bâtiments étudiés. De la même façon, le risque humain pourrait être évalué à différents moments de la journée, par exemple le jour et la nuit.

I.6 INDICES GLOBAUX DE RISQUES HUMAIN ET ECONOMIQUE

Afin de faciliter la visualisation des résultats cartographiques et de comparer les expositions au risque de chaque bassin-versant, nous avons agrégé les divers indices spécifiques sur des mailles territoriales de 50 m de côté par simples additions divisées par les valeurs maximales de chaque indice, afin d'exprimer le résultat entre 0 et 1 (**figure I3**). Nous verrons que cette agrégation spatiale permet également d'intégrer les indicateurs d'accessibilité dans la construction d'un indice combiné risque-humain/accessibilité des secours.

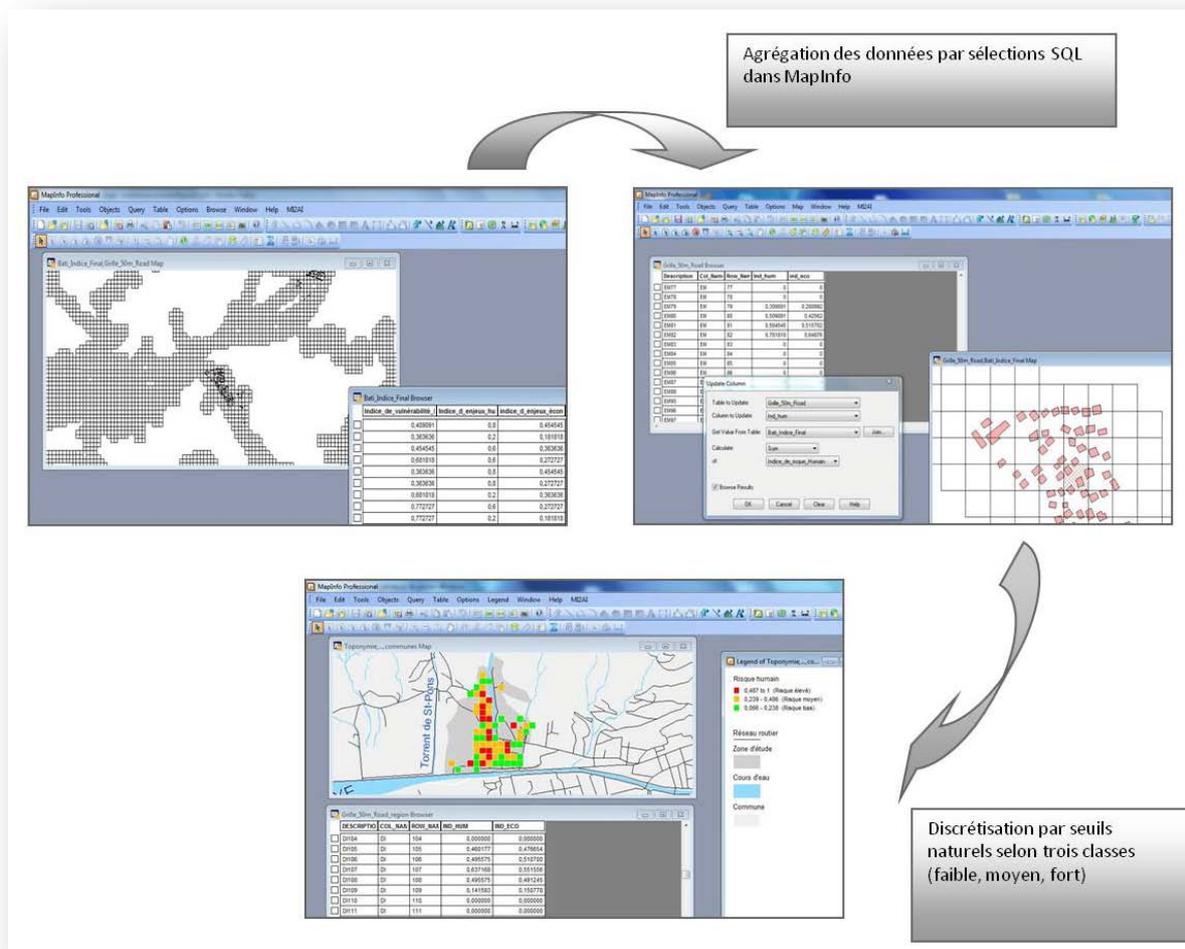


Figure I3 - Méthode d'agrégation des indices spécifiques sur des mailles géométriques (2500m²) au sein du SIG

Ces nouveaux indices agrégés sont assortis du suffixe « global » (maille) pour les différencier des indices spécifiques (bâti). Les principaux indices spécifiques entrant dans le calcul des risques humain et économique ont été traités de la sorte, donnant lieu à toute une série de cartes présentées en **annexe** de ce rapport. Rappelons que ces cartes affichent le risque uniquement sur les zones étudiées, ce qui ne préjuge pas d'une absence de risque sur les autres secteurs de la vallée.

Tous les indices ont été définis entre 0 et 1 et cartographiés en utilisant une gamme de couleur s'étendant du vert (faible) au rouge (fort) afin de respecter les couleurs conventionnelles des échelles de vigilance et d'être ainsi bien interprétés par les utilisateurs finaux. Les différentes classes de valeurs ont été établies selon une méthode de discrétisation basée sur les seuils observés à l'aide du logiciel MapInfo.

J RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

J.1 RISQUE HUMAIN

L'analyse comparative présentée ici se fonde sur le corpus de cartes affichant la vulnérabilité humaine (**figures J1 et J2**). A première vue, on note que le bassin versant de la Valette (communes de St-Pons et Barcelonnette), comporte un grand nombre de bâtiments dont l'indice de vulnérabilité humaine est important. En effet, c'est sur cette zone que l'on a l'indice le plus fort. *A contrario*, le bassin versant qui comporte le moins de bâtiments et le plus faible indice de vulnérabilité humaine (0,818) est celui de Faucon. Ceci peut être expliqué par les fonctions des bâtiments les plus représentées sur cette zone, à savoir l'habitation individuelle (INDIV) et résidentielle (RESID). Par ailleurs, les bâtiments sont de taille moins importante et comportent en grande majorité au moins un étage refuge.

La Valette

Dans le bassin versant de La Valette, les foyers de risque humain se concentrent essentiellement et logiquement dans les zones rouges du P.P.R.. Effectivement, parmi toutes les zones étudiées, le bassin versant de la Valette enregistre le plus grand nombre de bâtis en zone de risque fort. Cela concerne 45 bâtis exposés aux aléas torrentiels, soit 35,43%. Ceux-ci se concentrent très largement de l'amont vers l'aval du torrent de La Valette où le risque humain par bâti est en grande majorité élevé et homogène. D'ailleurs, 51,97% des bâtiments analysés y ont des indices de risque humain élevés, aussi bien en zone bleue (24,41%) qu'en zone rouge (27,56%). Le bassin versant de la Valette se caractérise non seulement par la plus forte occupation de la vallée de l'Ubaye (127 bâtiments), mais aussi par l'indice-risque humain le plus élevé.

Les Galamonds

Dans la zone étudiée de la commune d'Enchastrayes, les bâtis exposés aux aléas torrentiels se situent majoritairement en rive gauche du torrent des Galamonds. Seule une dizaine de bâtis est exposée aux crues et laves torrentiels en rive droite. A noter que trois bâtis en zone d'aléa fort ont des indices-risque humain élevés. Dans l'ensemble, le bassin versant des Galamonds présente un indice-risque humain élevé. En effet, 53,77% des bâtis font partie des classes de risque humain élevé mais sont situés pour la majorité en zone bleue (50,94%). Cela se justifie par une forte présence des habitats individuels. Les familles de trois à cinq personnes y sont d'ailleurs les populations les plus représentées avec 70,18 %. Il s'agit de la deuxième zone d'étude la plus occupée par les familles de trois à cinq personnes après celle de Faucon et du Bourget qui en enregistrent 73,68%.

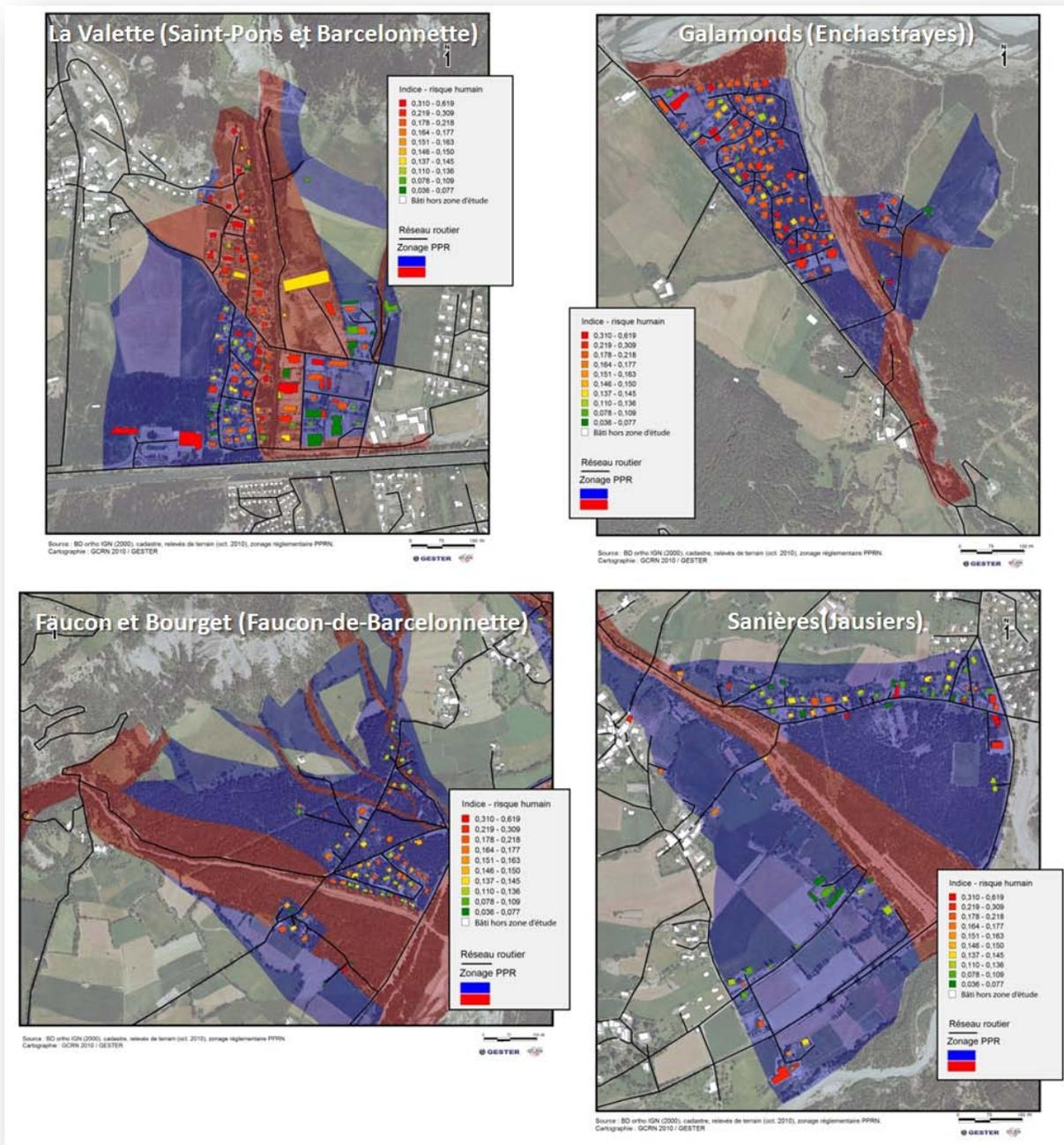


Figure J1 – Indice de risque humain spécifique (par bâtiment) pour chacune des zones

Faucon et le Bourget

La carte d'indice-risque humain de Faucon-de-Barcelonnnette illustre des valeurs très variables d'un bâti à l'autre. Les bâtis ayant des indices-risque humain élevés n'y représentent que 23,46%. En outre, aucun d'entre eux n'est en zone rouge. Le risque humain y est donc très moyen, voir faible.

Les Sanières

L'indice-risque humain y est relativement faible. Cela s'explique d'une part par la faible densité de population. Les résidences principales occupées par des couples de personnes sont les plus représentées. D'autre part, on a une urbanisation moins dense en zone d'aléa. Un parc de l'O.N.F occupe une grande partie de l'espace en rive gauche et une zone agricole s'étend très largement en rive droite. Seuls 21,05% des bâtis y ont un indice-risque élevé. Ils se répartissent généralement au nord de la zone d'étude, proche de la partie la plus densément construite de la commune.

En conclusion

Le bassin versant de la Valette détient le risque humain cumulé le plus élevé avec un indice-risque moyen de 0,198. Il est suivi du bassin versant des Galamonds dont l'indice moyen est de 0,195. A l'inverse, les indices-risque humain moyens de Faucon et des Sanières sont les plus faibles. Ils sont respectivement de 0,146 et de 0,139. Ainsi, deux grands secteurs à fort risque humain se dégagent dans la vallée de l'Ubaye face aux aléas torrentiels ; ceux des bassins versants de la Valette et des Galamonds.

La carte des indices agrégés illustre mieux la variabilité spatiale et la concentration des foyers de risque humain pour chaque commune **figure J2**. Bien que le risque humain soit le plus élevé dans le bassin versant de la Valette, il ne présente pas de foyer de risque unique. Cela s'explique par une urbanisation très étirée en rive droite du torrent de la Valette et donc un risque élevé très dispersé. Dans le bassin versant des Galamonds, le risque humain est au contraire très concentré. Un foyer de risque y est remarquable en rive gauche du torrent des Galamonds. Mis à part le fait que certaines valeurs agrégées soient isolées au sud de la commune d'Enchastrayes, le risque humain y est aussi homogène que dans le bassin de la Valette.

A contrario, les bassins versants de Faucon et du Bourget présentent une dispersion spatiale du risque humain. Les niveaux faibles et moyens y prédominent de part et d'autre du torrent de Faucon. Cependant, une concentration de risque moyen y est tout de même notable au bord de la rive gauche du torrent de Faucon au niveau du lotissement du Bourget. Elle présente quelques valeurs de risque humain plus élevées.

Le bassin versant des Sanières a une situation similaire à celle de Faucon. Son urbanisation très fragmentée explique une répartition du risque très hétérogène. D'ailleurs, un seul regroupement de valeurs agrégées y est notable en rive gauche du torrent des Sanières. De manière générale, cette zone présente un risque humain relativement faible en comparaison des autres zones d'étude de la vallée de l'Ubaye.

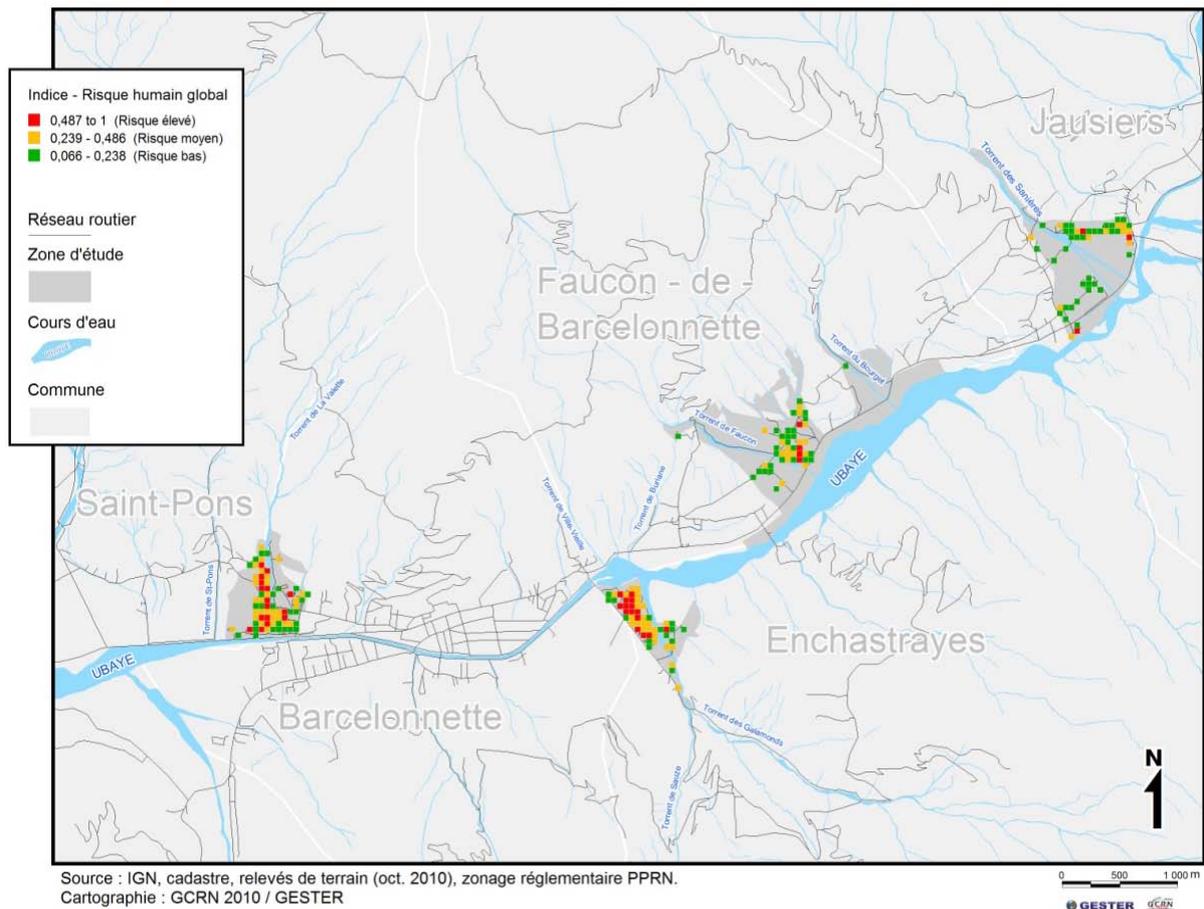


Figure J2 – Indice de risque humain global (agrégation sur mailles de 2500 m²)

J.2 RISQUE ECONOMIQUE

Cet indice a d’abord été traité à l’échelle du bâti pour chacune des zones d’étude (**figure J3**). La valeur minimale est de 0,060 pour une valeur maximale de 0,436. La mise en relation de ces données avec les fonctions des rez-de-chaussée des bâtiments permet de mettre en évidence les structures qui sont les plus exposées au risque. Ce sont les habitats individuels qui dominent avec 46% des fonctions. Nous pouvons noter que les bâtiments agricoles sont particulièrement nombreux à avoir un niveau de risque économique fort (seconde position avec 15%), car l’activité qu’ils génèrent dynamise l’économie locale.

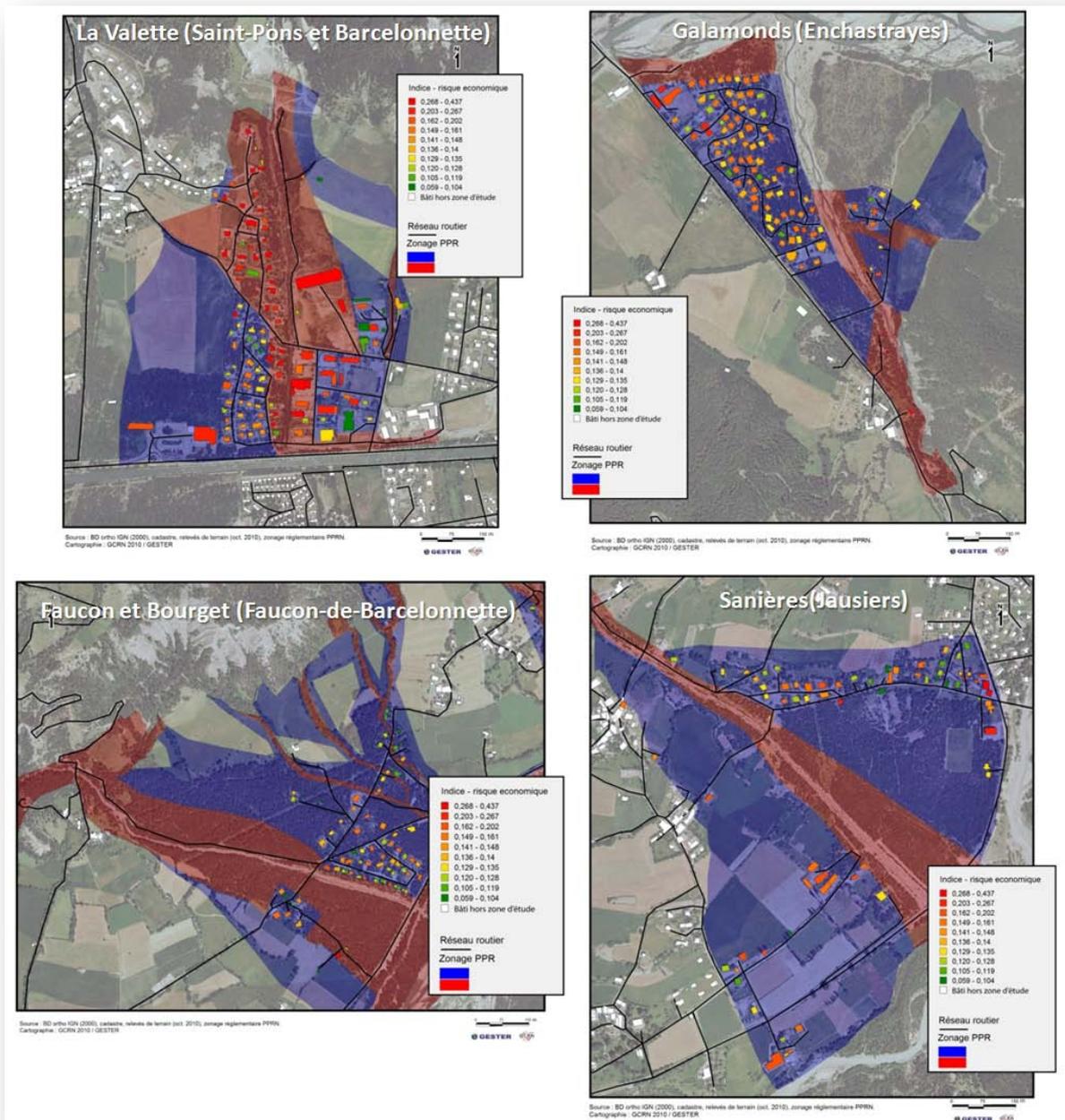


Figure J3 – Indice de risque économique spécifique (par bâtiment) pour chacune des zones

La Valette (Saint-Pons et Barcelonnette)

De nombreux bâtiments de cette zone possèdent un risque fort. D'ailleurs, les trois plus fortes valeurs de toutes les zones d'étude se retrouvent ici. Il s'agit de deux commerces et du terrain d'entraînement militaire. Le risque économique fort s'explique par les fonctions des bâtiments : contrairement aux autres zones, il y a de nombreux bâtiments qui accueillent une activité génératrice de profit pour l'économie : les petits commerces et les centres commerciaux.

Les Galamonds (Enchastrayes)

Pour Enchastrayes et le torrent des Galamonds, le risque économique n'est pas très fort. Le bâtiment au risque le plus fort atteint 0,298 et c'est un bâtiment agricole. Pour les six bâtiments aux indices-risque les plus forts, trois sont des bâtiments agricoles, deux sont des bâtiments industriels et le dernier est une habitation individuelle.

Faucon et Bourget (Faucon de Barcelonnette)

Le risque économique est faible pour la commune de Faucon-de-Barcelonnette. Seuls quatre bâtiments ont une valeur au-dessus du seuil de risque fort, et le maximum atteint seulement 0,161. Les valeurs les plus élevées (qui sont faibles par rapport à l'ensemble de la zone étudiée) se retrouvent pour les bâtiments situés au plus près du torrent de Faucon.

Sanières (Jausiers)

Face à ce torrent, les bâtiments ont un risque économique relativement peu élevé, avec un maximum de 0,290. Les deux bâtiments aux risques les plus élevés sont des bars. Les bâtiments à risque fort ne correspondent pas à une logique spatiale au regard de l'aléa, mais ils sont concentrés à l'est de la zone étudiée. Les autres, le plus souvent des bâtiments agricoles et d'habitations, sont dispersés sur la zone.

En conclusion

Sur l'ensemble de la zone d'étude, nous pouvons dire que les bâtiments sous l'influence du torrent de la Valette à Saint-Pons et Barcelonnette possèdent les indices-risque économique les plus forts. La moyenne y atteint 0,245. La carte en carroyage des indices agrégés montre des concentrations de foyers de risque fort surtout sur les secteurs de la Valette et des Galamonds, un peu moins sur le Faucon et les Sanières (**figure J4**).

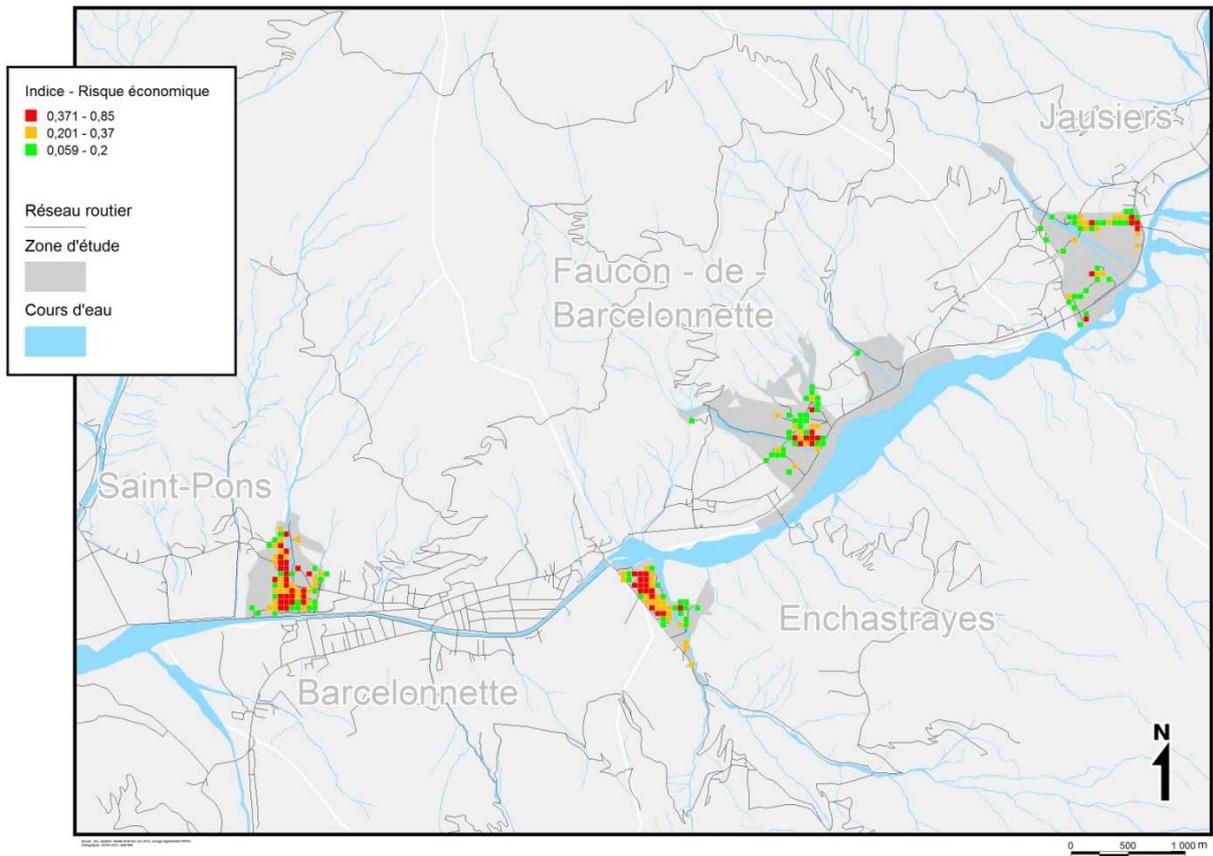


Figure J4 – Indice de risque économique global (agrégation sur mailles de 2500 m²)

K SCENARIOS DE DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE ROUTIERE

K.1 PRESENTATION

La topographie et le climat jouent en défaveur du réseau routier alpin. Cependant il est nécessaire de prendre en compte son importance pour le dynamisme de la vallée et le commerce européen, notamment entre la France et l'Italie. Plus de 3300 véhicules traversent la vallée de l'Ubaye par jour, avec des pointes à 10 000 véhicules en été. Le trafic de poids lourds représente 10% du trafic total de la vallée (source C.G. 04, 2010).

Les échanges de flux sont vitaux pour la cohésion d'un territoire et ses relations avec les autres entités territoriales. A titre d'exemple, les véhicules des services de secours (véhicules anti-incendie, ambulances, etc.) n'existent que par la possibilité de circuler sur le réseau routier et *a fortiori* d'accéder aux enjeux présents sur le territoire. L'accessibilité permise grâce au réseau routier est ainsi un enjeu capital. Afin d'apporter une aide à la gestion de crise nous avons effectué des simulations de dégradation de l'accessibilité suite à des coupures d'ouvrages de franchissement. Pour cela il nous a fallu d'une part déterminer les tronçons de route susceptibles d'être coupés et d'autre part sélectionner nos lieux de départ et d'arrivées. Le point de départ sélectionné a été la caserne de pompier de Barcelonnette. Pour les points d'arrivées, nous avons utilisé une cartographie par carroyage pour représenter nos résultats. Ainsi, les lieux d'arrivées sont les centroïdes des mailles, d'une surface de 2500 m² chacune. Le tout est couplé à un système d'information géographique.

K.2 CHOIX DU RESEAU ROUTIER ET PARAMETRAGE DES VITESSES

Le réseau routier utilisé dans cette phase de l'étude diffère de celui de la première partie. Plus précis, il est tiré de la BD Carto de l'IGN du département des Alpes de Haute-Provence (04). Pour l'ensemble du département, cette base routière comporte 8 334 objets tronçons, pour une longueur totale de 8700 kilomètres. Les tronçons routiers comportent un identifiant mais aussi le nombre de voies et de chaussées, la qualité administrative, etc.

Il est important de souligner le caractère imparfait de cette base de données : certaines parties du réseau local (quelques routes d'accès à des lotissements ou de petites ruelles urbaines) sont absentes. Nous avons ainsi dû créer 281 nouveaux tronçons mais également décomposer certains tronçons préexistants en sous-tronçons indépendants à chaque intersection. Cette base reste néanmoins plus détaillée et plus précise que celle utilisée dans l'approche régionale de l'accessibilité développée dans la première partie de ce rapport.

Il nous a semblé pertinent d'utiliser des vitesses « basses » ou inférieures aux vitesses légalement autorisées. En effet, il faut tenir compte de la topographie de notre zone d'étude. Notre réseau routier se trouve en partie sur des terrains sinueux et accidentés, ce qui influe fortement sur les vitesses permises.

Parmi les classifications de vitesses existantes, on a utilisé le calibrage de vitesse établi par Chapelon (1996). Nous avons légèrement retravaillé cette classification en prenant en

considération les travaux effectués par le C.E.T.E. de l'Est pour l'outil d'analyse des itinéraires alternatifs (A.N.I.T.A.). Nous avons aussi pris en compte les observations faites sur le terrain pour revoir à la baisse quelques vitesses. A partir de la base de données, des vitesses ont donc été attribuées pour chaque type de vocation en tenant compte du classement administratif, du nombre de chaussées, du nombre de voies et du type de revêtement (**tableau K1**). Quatre classes ressortent : liaison principale, liaison régionale, liaison locale et piste. Nous avons appliqué cette dernière classe à tous les nouveaux tronçons rajoutés manuellement.

			km/h	Fcode
Vocation 2	Liaison principale	Départementale ; route de bonne viabilité (2 voies larges)	70	3
Vocation 6	Liaison régionale	Départementale ; route moyenne viabilité (2 voies étroites) ; route étroite	60	5
Vocation 7	Liaison locale	Route étroite, éventuellement privée ou à accès réglementé	40	7
Vocation 11	Piste	Piste / petite ruelle	7	11

Tableau K1 - Paramétrage des vitesses de déplacement automobile selon la vocation du tronçon de la BD Carto de l'IGN

La majorité de nos tronçons sont des liaisons locales de type route étroite, éventuellement privée ou à accès réglementé. Les pistes constituent la seconde classe la plus importante. Ces deux classes regroupent près de 80% de nos tronçons. De ce fait, les vitesses de déplacement à l'intérieur de notre réseau sont très nettement limitées. La majorité des déplacements s'effectue à une vitesse moyenne comprise entre 40 et 7 km/h. Les tronçons à vocation 2 et 6 ne représentent que 20% environ du réseau routier. Il s'agit des routes départementales et d'axes majeurs sur lesquelles les déplacements s'effectuent plus rapidement. Les axes routiers de vocation 2 appartiennent à la départementale 900, axe principal de la vallée. La grande partie des ouvrages de franchissement se situe sur ces tronçons de vocation 2 et 6, soit 15 ponts au total. Par conséquent, ces axes sont potentiellement soumis à des risques de coupure (**figure K1**).

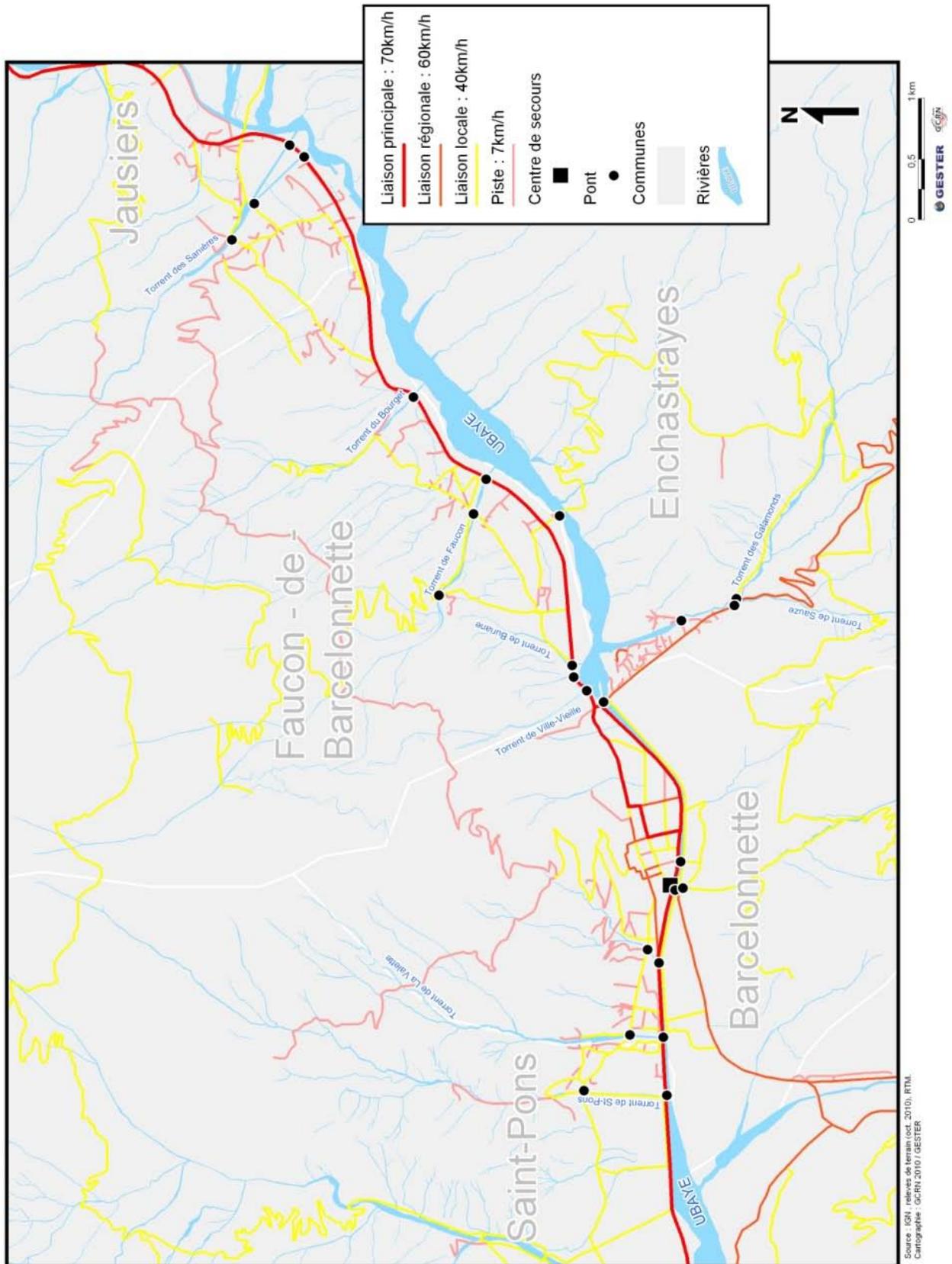


Figure K1 - Typologie du réseau routier retenu et vitesses moyennes associées (automobiles)

K.3 INDICE DE RISQUE DE COUPURE

L'indice de risque de coupure des ouvrages de franchissement a été élaboré à partir du croisement de l'indice de vulnérabilité développé plus haut, et de la probabilité d'occurrence d'un événement dommageable pour l'ouvrage (crue ou lave torrentielle). La probabilité d'occurrence d'un événement dommageable a été établie à partir des données issues de la base événement R.T.M.. Chaque événement recensé depuis 1950 est répertorié par torrent, en distinguant les événements ayant endommagé les ouvrages étudiés et/ou perturbé la circulation à leur niveau, de ceux qui n'ont produit aucune conséquence particulière. Un ratio a été établi entre le nombre d'événements avec dommages et/ou perturbations et le nombre total d'événements recensés. Chaque classe a ensuite été pondérée de 1 à 3 (**tableau K2**). Un ratio égal à 1 signifie que tous les événements ont produit des dommages ou des perturbations sur l'ouvrage.

Classe du ratio	Classe de probabilité d'occurrence
$R \leq 0,25$	1
$0,25 < R < 0,75$	2
$R \geq 0,75$	3

Tableau K2 – Pondération des ratios obtenus entre événements avec dommages et total des événements pour chaque ouvrage de franchissement

La construction de l'indice de risque de coupure résulte alors de la multiplication des valeurs de l'indice de vulnérabilité avec les valeurs de classes de probabilité d'occurrence de chaque ouvrage (**figure K2**). De façon à obtenir un indice compris entre 0 et 1, les valeurs obtenues sont divisées par la valeur maximale de la série.

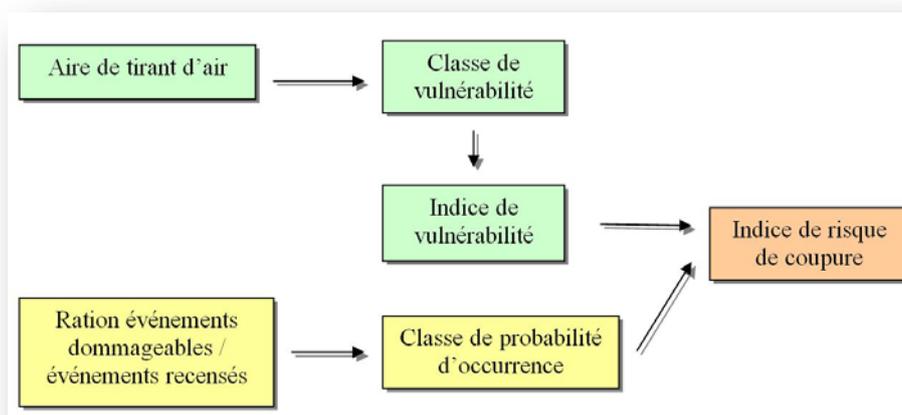


Figure K2 – Principe de construction de l'indice de risque de coupure

Indice de risque de coupure	Classe de risque de coupure
Indice $\leq 0,25$	Faible
$0,25 < \text{Indice} < 0,75$	Moyen
Indice $\geq 0,75$	Fort

Tableau K3 - Classification de l'indice de risque de coupure

Les informations sur les ouvrages de franchissement ont été établies à partir des fiches de vulnérabilité des ouvrages de franchissement. Ces fiches ont été réalisées essentiellement à partir d'observations recueillies sur le terrain. Chacun des ouvrages de franchissement s'est vu attribué une classe de risque de coupure (**tableaux K3 et K4**).

Id Pont	Nom du torrent	Commune	Indice de vulnérabilité	Probabilité d'occurrence des évènements dommageables	Indice de risque de coupure	Risque de coupure
SAN_1	Les Sanières	Jausier	0,33	1	0,13	Faible
SAN_2	Les Sanières	Jausier	0,33	1	0,13	Faible
SAN_3	Ancien bras des Sanières	Jausier	1,00	1	0,40	Moyen
SAN_4	Les Sanières	Jausier	0,17	2	0,13	Faible
BOU_1	Le Bourget	Faucon de Barcelonnette	0,83	3	1,00	Fort
FAU_1	Le Faucon	Faucon de Barcelonnette	0,83	2	0,67	Moyen
UBA_1	L'Ubaye	Faucon de Barcelonnette	0,17	1	0,07	Faible
FAU_2	Le Faucon	Faucon de Barcelonnette	0,50	2	0,40	Moyen
FAU_3	Le Faucon	Faucon de Barcelonnette	0,33	1	0,13	Faible
BUR_1	La Buriane	Faucon de Barcelonnette	0,83	1	0,33	Moyen
THI_1	Le Thiolet	Faucon de Barcelonnette	1,00	1	0,40	Moyen
VIL_1	Ville-Vieille	Faucon de Barcelonnette	0,83	1	0,33	Moyen
UBA_2	L'Ubaye	Barcelonnette	0,17	1	0,07	Faible
GAL_1	Les Galamonds	Enchastraye	0,33	2	0,27	Moyen
SAU_1	Le Sauze	Le Sauze	0,50	1	0,20	Faible
ENC_1	L'Enchastrayes	Le Sauze	0,17	1	0,07	Faible
VAL_1	La Valette	Barcelonnette	0,50	1	0,20	Faible
STP_1	Saint-Pons	Saint Pons	0,67	1	0,27	Moyen
STP_2	Saint-Pons	Saint Pons	0,67	1	0,27	Moyen
VAL_2	La Valette	Barcelonnette	0,67	1	0,27	Moyen
CRO_1	Ravin Torrent de la Croisette	Barcelonnette	1,00	1	0,40	Moyen
CRO_2	Ravin Torrent de la Croisette	Barcelonnette	1,00	1	0,40	Moyen
UBA_3	L'Ubaye	Barcelonnette	0,17	1	0,07	Faible
GAU_1	Le Gaudessart	Barcelonnette	0,67	1	0,27	Moyen
UBA_4	L'Ubaye	Barcelonnette	0,17	1	0,07	Faible

Tableau K4 – Indice de risque de coupure des ouvrages de franchissement

La majorité de nos ponts présente un risque de coupure faible ou moyen. Il n'y a qu'un seul ouvrage qui possède un risque fort. Les ouvrages ayant un indice de risque inférieur à 0,25 (risque faible) ne sont théoriquement que très peu impactés par les phénomènes torrentiels. En effet ils possèdent une section de tirant d'air suffisante pour permettre le passage des crues et laves. Les ponts ayant un indice de coupure compris entre 0,25 et 0,75 (risque moyen) sont ceux auxquels nous allons attacher le plus d'importance. En effet, la majorité de nos ponts appartient à cette classe. Ainsi, la totalité des ouvrages de franchissement localisés sur le CD 900 va être concernée. Le CD 900 constituant l'axe principal de la vallée, ses ponts sont donc stratégiques. Ce sont ces ponts que nous allons préférentiellement utiliser pour modéliser les dégradations d'accessibilité. C'est l'ouvrage franchissant le torrent du Bourget au niveau de la D900 sur la commune de Faucon-de-Barcelonnette (Id : BOU_1) qui possède le risque de coupure le plus fort. Celui-ci a été impacté trois fois depuis 1950 par des phénomènes de type lave torrentielle et crue torrentielle, entraînant chaque fois des perturbations sur le trafic routier (**figure K3**).

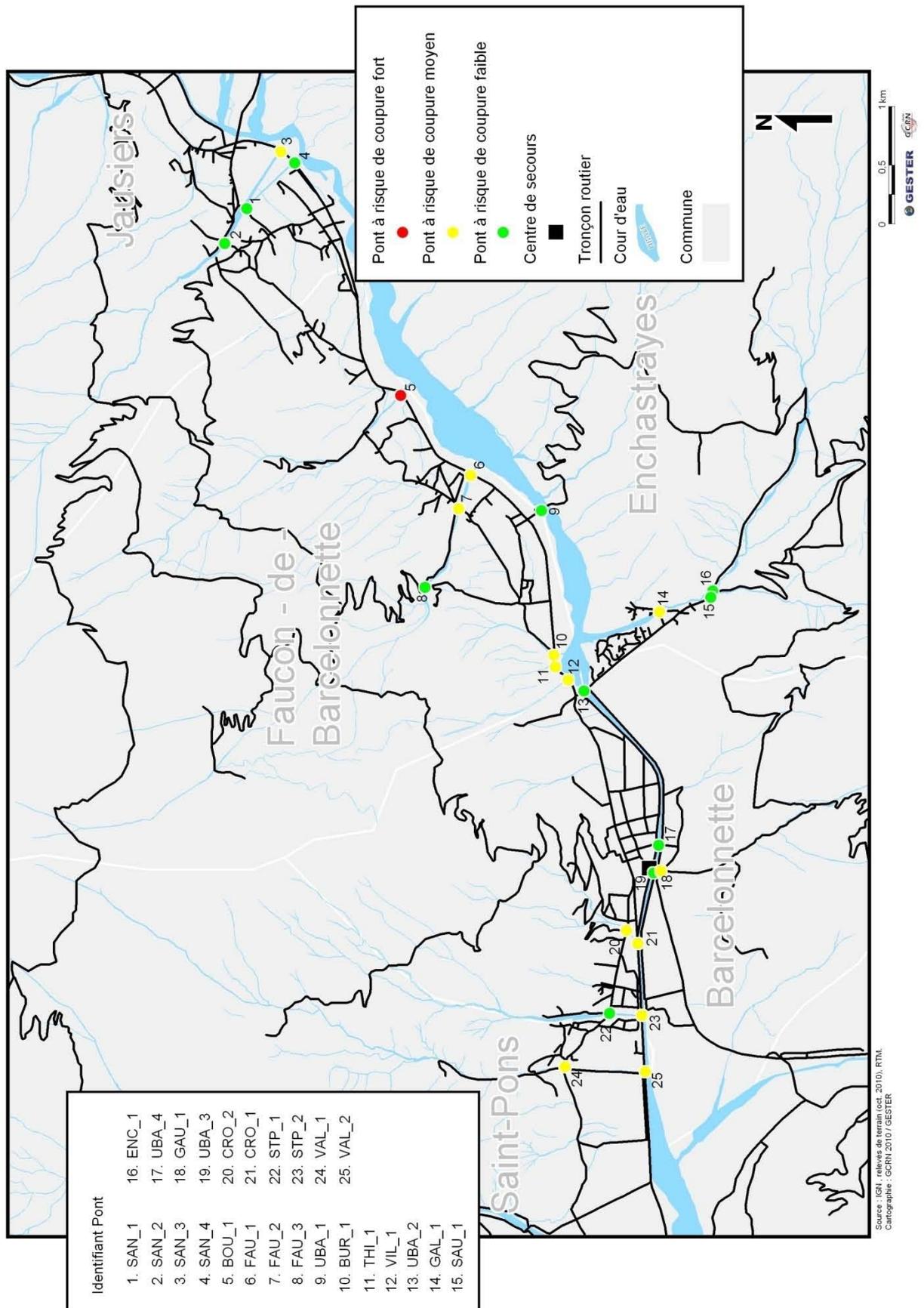


Figure K3 - Ouvrages de franchissement et risque de coupure associé

K.4 L'ACCESSIBILITE ROUTIERE A L'ETAT NORMAL

Afin de mettre en évidence l'altération de l'accessibilité lors de scénarios nous avons dû préalablement établir l'accessibilité à l'état normal (**figure K4**). Nous avons pour cela utilisé le réseau routier dans son état le plus « sain », c'est-à-dire sans fermetures hivernales de cols, ni travaux sur le réseau. En utilisant un réseau sans aucune perturbation, nous pouvons faire apparaître une accessibilité optimale, idéale pour établir une comparaison avec une quelconque dégradation de cette accessibilité.

Le lieu de départ choisi est le centre de secours des pompiers de Barcelonnette. Contrairement au centre de secours de Jausiers, celui-ci est opérationnel en continu, de jour comme de nuit et ce, toute l'année. Avec des moyens humains et matériels nécessaires à tous types d'opération de secours, il semble être le plus adapté pour intervenir en cas de crise.

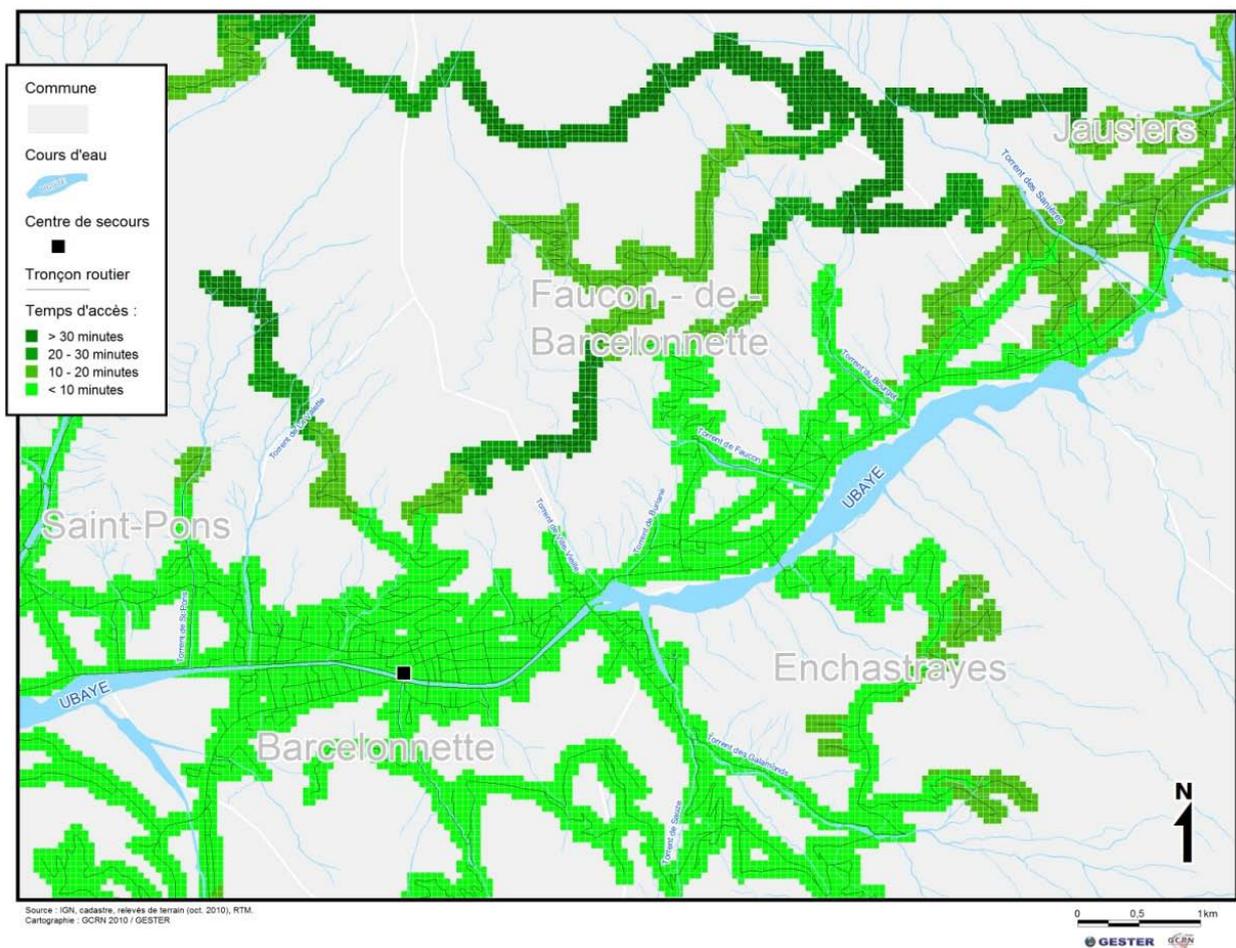


Figure K4 - Temps d'accès (mn) au départ du centre de secours de Barcelonnette à l'état normal

K.5 SCENARIOS DE DEGRADATION DE L'ACCESSIBILITE

Afin de mettre en évidence différentes dégradations de l'accessibilité territoriale nous avons modélisé trois scénarios impliquant des coupures d'ouvrages de franchissement de torrents. Ces pertes d'accessibilité sont calculées pour chaque scénario à partir de la différence de temps d'accès entre l'état normal et l'état dégradé. Il est donc indispensable que nos points de départ et d'arrivée soient les mêmes. Il en est de même pour le tracé du réseau routier.

K.5.1 SCENARIO N°1, JUIN 1957

Le premier scénario est élaboré à partir d'un évènement historique. Il s'agit de faire rejouer la crue du torrent des Galamonds de juin 1957. Cet épisode est recensé dans la base de données R.T.M. La crue torrentielle avait entraîné la destruction du pont d'accès à la ferme des Galamonds. Le nouveau pont (Id : GAL_1) reconstruit depuis a un indice de vulnérabilité moyen (0,33). Mais l'augmentation du nombre d'habitations au lieu dit des Galamonds justifie de modéliser ce scénario. Le pont des Galamonds (Id : GAL_1) possède un indice de risque de coupure moyen de 0,66. Malgré le risque de coupure moyen de ce pont, il faut garder à l'esprit que ce pont est le seul moyen d'accès au lieu dit des Galamonds. Nous avons donc simulé une coupure de cet ouvrage de franchissement. La modélisation de l'accessibilité routière suite à la coupure du pont des Galamonds met évidence un isolement total de la zone directement desservie par ce pont (**figure K5**).

Ce scénario permet de mettre en évidence plusieurs points :

- Si l'on prend en compte la vulnérabilité d'un territoire par le biais de l'accessibilité (et notamment l'accès aux secours), cette vulnérabilité augmente si l'accessibilité ne peut être garantie.
- On peut considérer comme stratégiques certains ouvrages de franchissement, à l'instar du pont des Galamonds. En tant qu'unique point d'accès à une zone, la coupure d'un tel ouvrage entraîne l'isolement routier de cette même zone.

Face à la complexité de mise à disposition de moyens aériens (coût, matériel en nombre limité, etc.), les moyens terrestres restent les meilleurs outils pour accéder à un territoire.

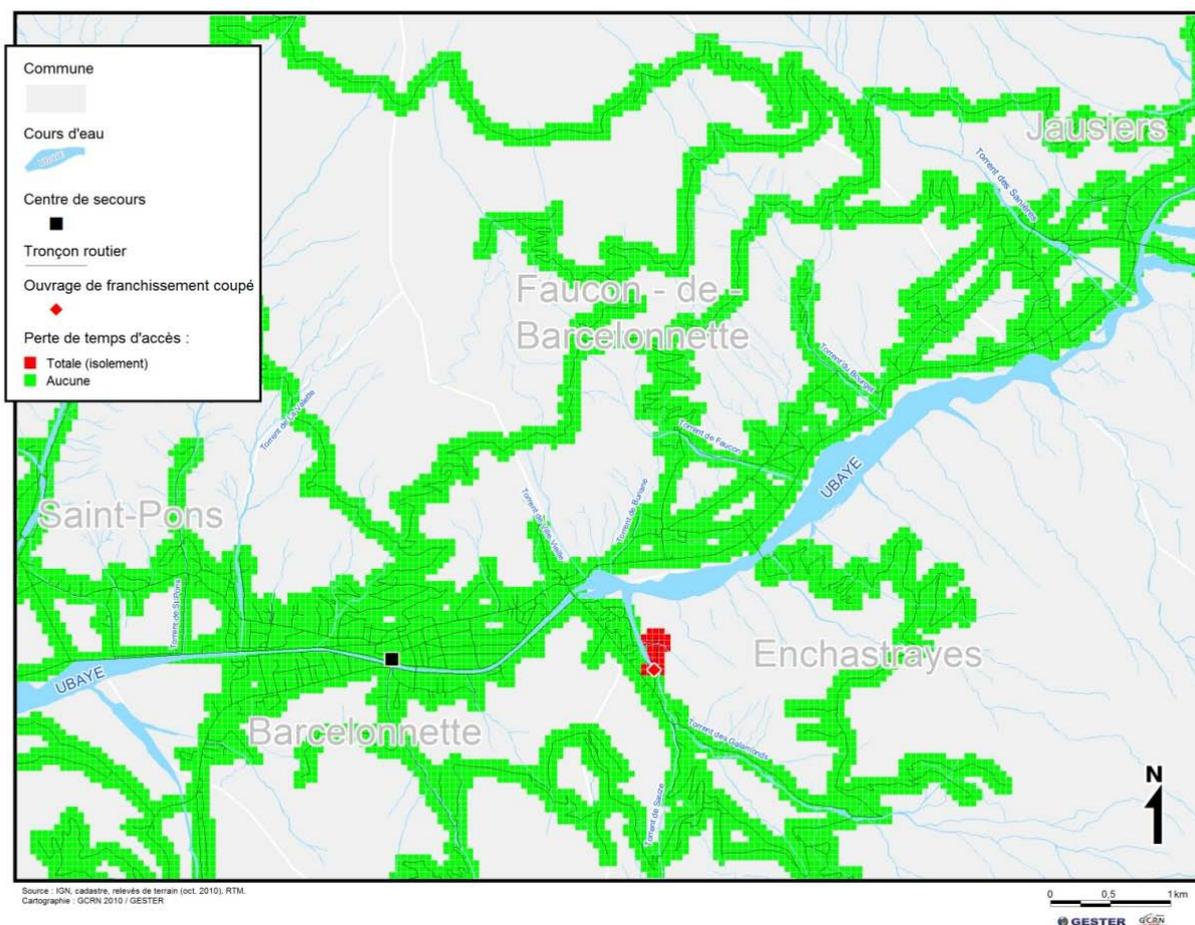


Figure K5 - Perte de temps d'accès au départ du centre de secours de Barcelonnette suite à l'altération du réseau routier, scénario 1

K.5.2 SCENARIO N°2, AOUT 2003

Notre deuxième scénario a été modélisé à partir d'un épisode récent ayant entraîné plusieurs coupures de route. Le 5 août 2003 sur la commune de Faucon-de-Barcelonnette ont eu lieu les crues torrentielles des torrents du Faucon et du Bourget suite à de fortes précipitations sur les bassins versants concernés. Les informations contenues dans la base de données R.T.M. nous font part de 30 000 m³ de boue déposés sur le cône de déjection du torrent du Bourget. Plus important encore, les agents des R.T.M. ont estimé le dépôt de boue sur le cône de déjection du torrent du Faucon à 60 000 m³. Le lotissement du Bérard sur la rive gauche s'est retrouvé sous 1,50 mètre de boue. D'après un témoin, la vague de boue aurait atteint une hauteur de 6,50 mètres. Ces phénomènes torrentiels ont endommagé plusieurs ponts et causé des perturbations sur de nombreuses sections de routes. On a dénombré 4 ouvrages de franchissements affectés : au croisement du CD 900 et du torrent du Faucon (Id : FAU_1), le pont du Berard (Id : FAU_2), le pont d'accès Châtelaret (Id : FAU_3) et enfin le pont radier du CD 900 au niveau du torrent du Bourget (Id : BOU_1).

Il n'est d'ailleurs pas étonnant de retrouver parmi ces ouvrages de franchissement les ponts ayant l'indice de coupure le plus élevé et notamment le pont du Bourget sur le CD 900 (Id :

BOU_1) avec un indice de risque de coupure de 1. Au regard de ces évènements, il apparaît utile de remodeliser cet épisode. S'il est peu probable que cet épisode survienne à l'identique dans l'avenir, on peut néanmoins envisager des évènements s'y rapprochant.

En modélisant ce scénario 2, aucune perte totale d'accessibilité n'apparaît. Cette absence d'isolement s'explique par la présence de plusieurs routes secondaires permettant le contournement des sections de routes coupées (**figure K6**). Cependant il est nécessaire de souligner les pertes de temps d'accès parfois importantes qu'entraîneraient les interruptions de circulation suite aux coupures de ponts.

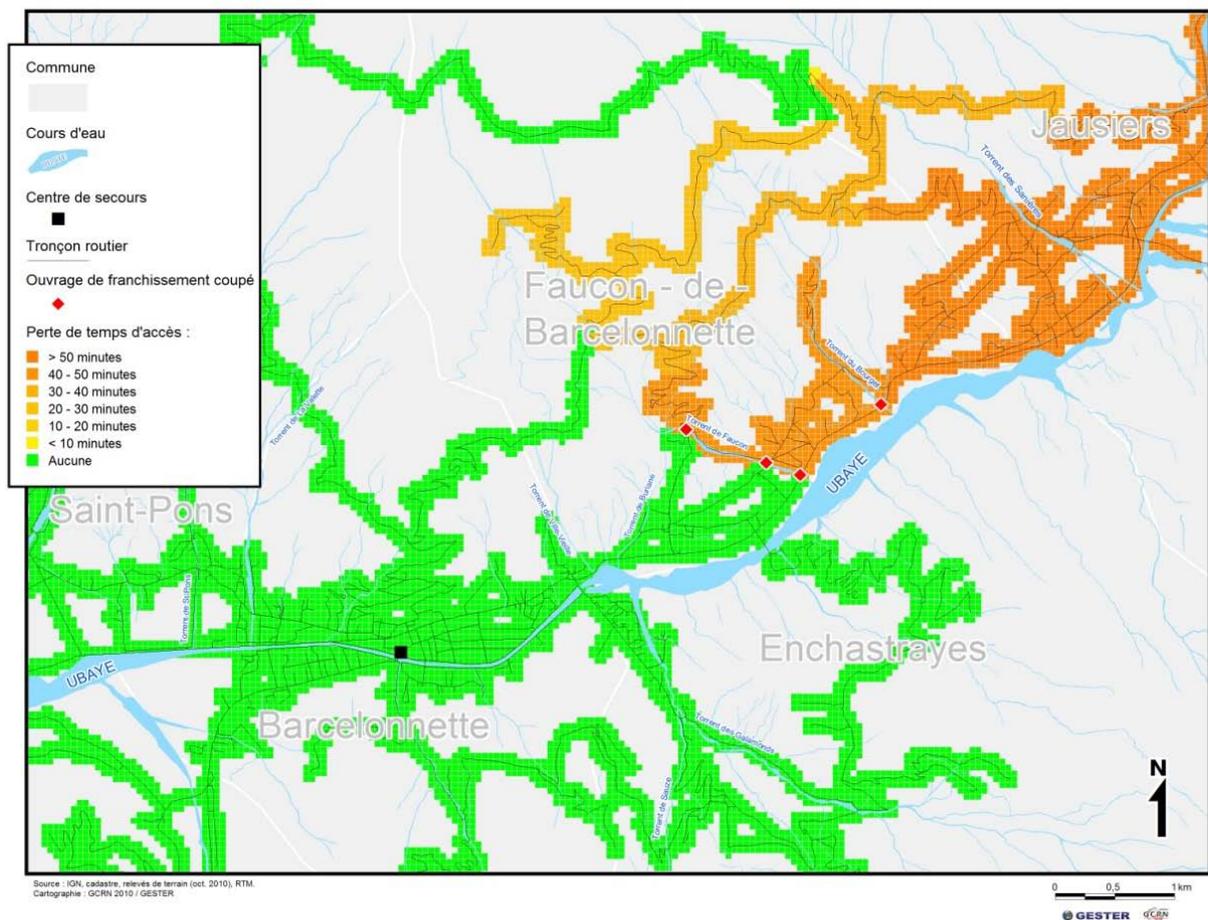


Figure K6 - Perte de temps d'accès au départ du centre de secours de Barcelonnette suite à l'altération du réseau routier, scénario 2

A l'Est des torrents du Faucon et du Bourget on note une différence de temps d'accès entre le réseau routier à l'état normal et le réseau routier à l'état altéré allant jusqu'à 93 minutes. Si à l'état normal 15% de la surface territoriale se trouve à plus de 20 minutes⁶ du centre de secours de Barcelonnette, c'est 35% des mailles de 2500 m² qui passent à plus de 20 minutes du centre de secours (**figure K7**). Le contournement des routes coupées se fait dans la vallée de l'Ubaye par les pistes à l'amont de la zone critique. Si la distance augmente relativement peu, le rallongement de la durée de circulation s'explique par les limitations notables de

⁶ Dans le cadre des schémas départementaux d'analyse et de couverture des risques (S.D.A.C.R.) un délai de couverture de 20 minutes a été retenu pour les délais d'intervention des sapeurs pompiers.

vitesse⁷ induites par la difficulté de circuler sur ces pistes (absence de bitume, chaussée unique défoncée, forte sinuosité, dénivelé important).

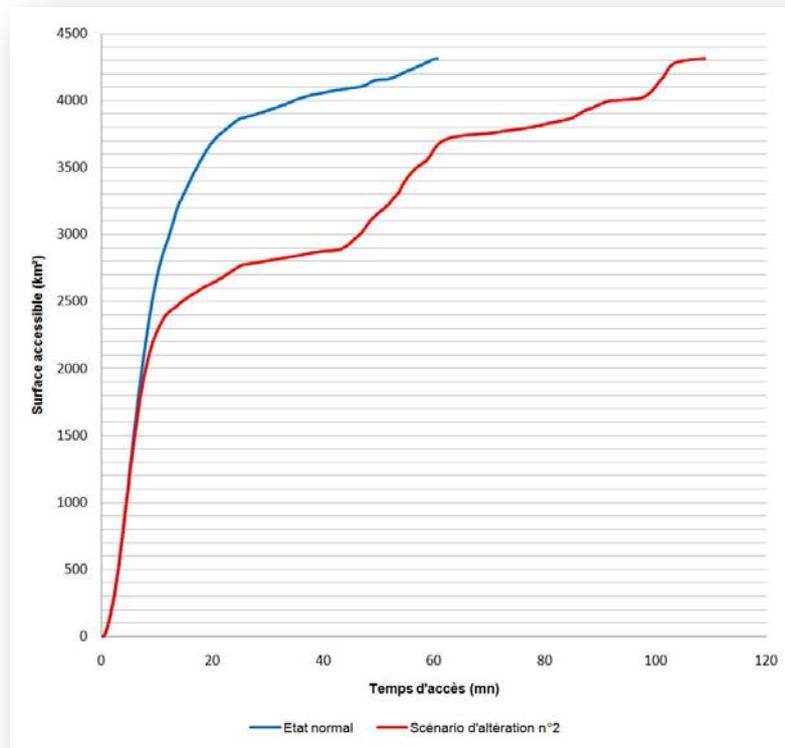


Figure K7 - Surface territoriale cumulée accessible au départ du centre de secours de Barcelonnette, scénario 2

Il est aussi important de prendre en considération deux points : en cas d'intempéries violentes, l'utilisation de ces pistes peut être compromise. De plus, les véhicules lourds ne peuvent les emprunter. L'utilisation des voies alternatives peut donc répondre à un besoin de circulation des secours uniquement. Par contre, la déviation par les pistes à l'amont ne peut pas être une solution au report du trafic en cas de coupure du CD 900 ; ces axes n'étant pas viables pour la circulation touristique de masse ainsi que le transport de marchandises.

K.5.3 SCENARIO 3 (PREDICTIF)

Le troisième scénario est élaboré à partir de l'indice de risque de coupure établi pour chacun des ouvrages de franchissement. Il prend en compte ceux qui possèdent les indices les plus élevés et simule leurs coupures simultanées. Il s'agit donc d'un scénario prédictif probable.

Parmi les 25 ouvrages recensés dans cette étude, deux se distinguent par des indices élevés de 0,671 et 1. Toutefois, ces ouvrages de franchissement sont également utilisés dans le deuxième scénario modélisant un épisode historique. Pour ne pas doubler ce scénario 2, ce sont donc les ouvrages possédant l'indice de risque de coupure le plus élevé inférieur à 0,67 qui ont été choisis pour alimenter le scénario 3. Cela concerne cinq ouvrages de

⁷ Lors du paramétrage de RouteFinder, nous avons calibré ce type de voie avec une vitesse moyenne de 7km/h.

franchissement dotés d'un indice de 0,40. Il s'agit des ouvrages correspondant aux identifiants « CRO_1 », « CRO_2 », « THI_1 », « FAU_2 » et « SAN_3 »).

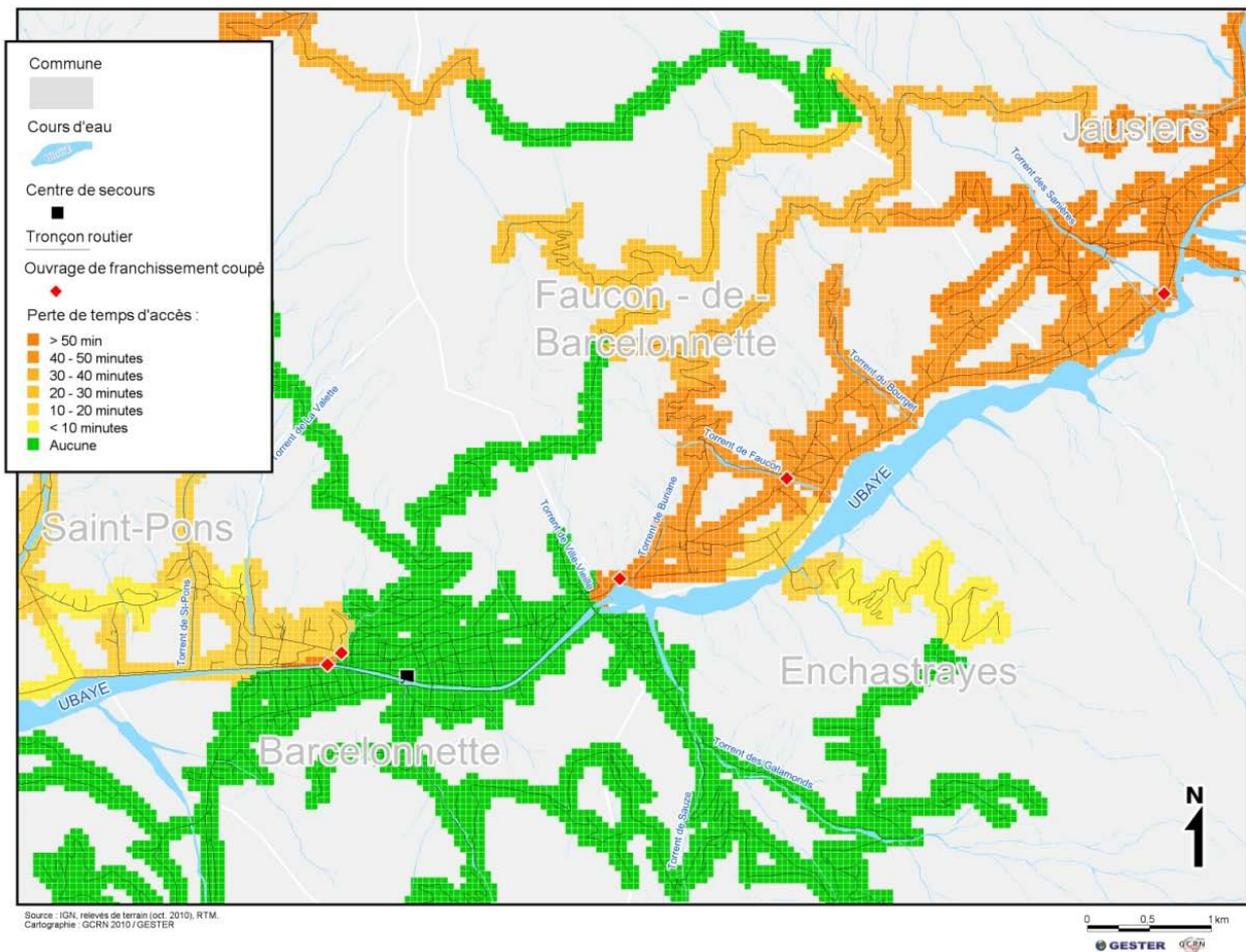


Figure K8 - Perte de temps d'accès au départ du centre de secours de Barcelonnette suite à l'altération du réseau routier, scénario 3

Dans le cas de ce troisième scénario, le maximum de perte de temps d'accès au départ du centre de secours de Barcelonnette est de 92,4 minutes (**figure K8**). Les principales pertes de temps d'accès se situent au nord-est de la zone d'étude, essentiellement sur les communes de Faucon-de-Barcelonnette et de Jausiers. Suite à la coupure de l'ouvrage THI_1, il n'y a plus d'accès direct par la D900 à ces deux communes depuis celle de Barcelonnette. Elles restent toutefois accessibles par la commune d'Enchastrayes en empruntant un parcours plus long avec une vitesse moyenne plus basse, ce qui engendre un temps d'accès plus élevé. Les deux ouvrages FAU_2 et SAN_3 se trouvent dans cette zone de perte de temps élevée. Ils provoquent cependant moins de perte de temps d'accès par leur coupure, en raison de la présence d'itinéraires de contournement proches des ouvrages et dont la longueur de rallongement reste faible. À la sortie ouest de Barcelonnette se trouvent les ouvrages CRO_1 et CRO_2, qui empêchent les secours d'accéder directement à la commune de Saint-Pons en cas de coupure. Le trajet de contournement le plus court doit donc s'orienter vers la commune de Pra-Loup puis traverser Les Thuiles pour pouvoir accéder à Saint-Pons par l'Ouest.

L INTÉGRATION DE LA PERTE D'ACCESSIBILITE DANS LA MESURE DU RISQUE HUMAIN

L.1 PRINCIPE DES INDICES

Le fait d'avoir traité les indices de risque humain global et l'accessibilité sur un maillage identique, permet de croiser ces deux informations. Pour ce faire nous utilisons une matrice de corrélation (**tableau L1**). Cette matrice permet de définir le niveau de risque global combiné (faible, moyen, fort) sur des mailles de 50m*50m. L'indice de risque humain global y est hiérarchisé selon trois classes (faible, moyen, fort). L'accessibilité y est découpée en trois classes de temps basées sur des seuils d'intervention des pompiers conformes aux recommandations des schémas départementaux d'analyse et de couverture des risques (S.D.A.C.R.). Ainsi trois classes de temps d'accès depuis Barcelonnette ont été définies (de 0 à 20 minutes, supérieur à 20 minutes et isolé).

		Classes de temps d'accès (pompiers)		
		0-20 min	> 20 min	Isolé
indice de risque humain global	Faible	faible	faible	moyen
	Moyen	faible	moyen	Fort
	Fort	moyen	fort	Fort

Tableau L1 - Matrice de détermination de l'indice de risque combiné (accessibilité et risque humain global)

Cet indice expérimental a pour objectif de mettre en évidence le rôle de l'accessibilité dans l'évaluation des risques de pertes humaines. La présence d'une faible accessibilité fait ressortir l'existence d'une vulnérabilité *a priori* de l'espace et des éléments que ce dernier supporte (D'Ercole et Metzger, 2009). Autrement dit l'accessibilité est un facteur aggravant ou compensateur du risque humain.

L.2 RESULTATS CARTOGRAPHIQUES

Trois cartes de risque global combiné sont proposées :

- Une en période normale d'accessibilité ;
- Deux autres selon différents scénarios de coupure d'accès (scénarios 1 et 2).

En **situation normale**, la totalité des mailles de la grille d'étude sont accessibles en moins de 20 minutes à partir de la caserne de pompiers de Barcelonnette (**figure L1**). A l'échelle de notre zone d'étude, l'accessibilité à l'état normal a donc peu influence sur le niveau de risque humain global.

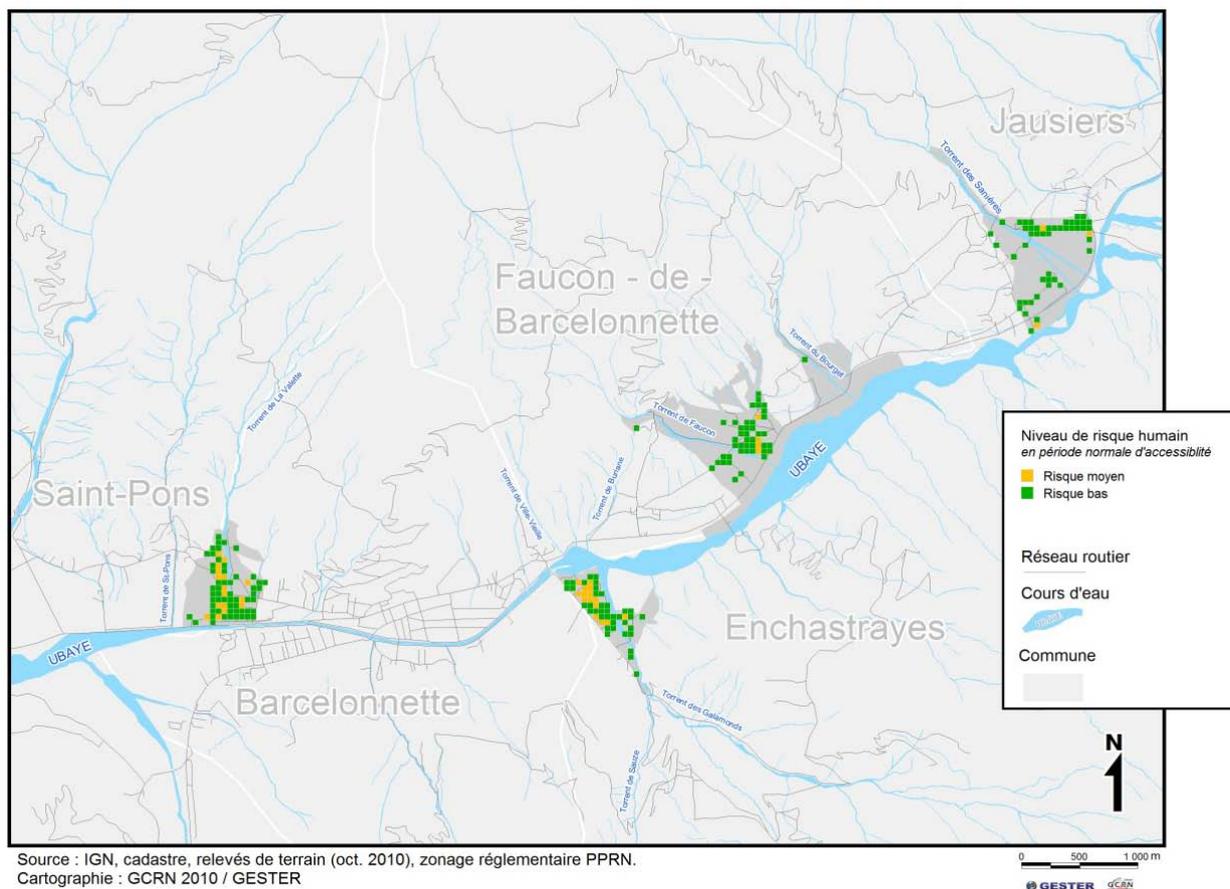
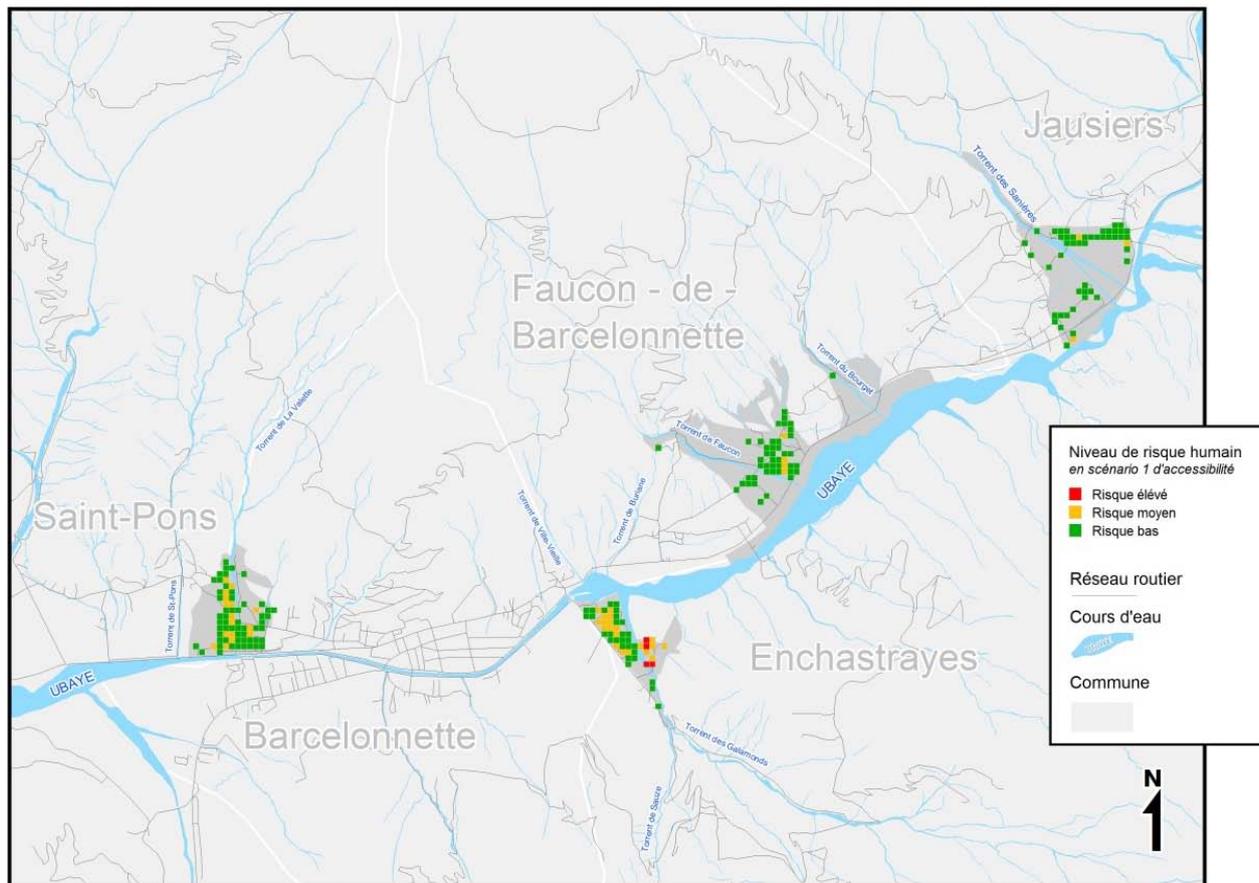


Figure L1 - Risque humain global combiné en situation normale d'accessibilité

Nous constatons qu'il y a une forte corrélation entre la carte du niveau de risque humain combiné en période normale d'accessibilité et celle des indices-risque humain global. Ceci s'explique par le fait que la totalité des mailles de la grille d'étude sont à moins de 20 minutes de la caserne de pompiers de Barcelonnnette. De par la faible étendue de notre zone d'étude, l'accessibilité a de façon homogène un effet compensateur du risque humain global. Les mailles qui ont un niveau de risque moyen en période d'accessibilité normale correspondent à celles ayant un indice-risque élevé. En période normale d'accessibilité les foyers de risque se concentrent à Saint-Pons dans les espaces qui bordent le torrent de la Valette et à Enchastrayes dans la partie nord de la zone étudiée. Comparons à présent la situation décrite précédemment avec celles des *scenarii* 1 et 2.



Source : IGN, cadastre, relevés de terrain (oct. 2010), zonage réglementaire PPRN.
 Cartographie : GCRN 2010 / GESTER

0 500 1 000 m
 GESTER IGN

Figure L2 - Niveau de risque humain combiné en scénario 1 de dégradation de l'accessibilité

Dans le **scénario 1** de dégradation d'accessibilité nous constatons l'apparition d'une zone avec des niveaux de risque humain combiné élevés dans la commune d'Enchastrayes (**figure L2**). Ceux-ci se concentrent en rive droite du torrent des Galamonds. En effet la coupure du pont des Galamonds (GAL_1) a pour conséquence l'isolement de toute cette partie d'Enchastrayes. La perte d'accessibilité totale de cet espace amplifie les niveaux de risque humain. A l'inverse, ce scénario n'a aucun impact sur le reste de la zone d'étude, celle-ci étant toujours accessible en moins de 20 minutes.

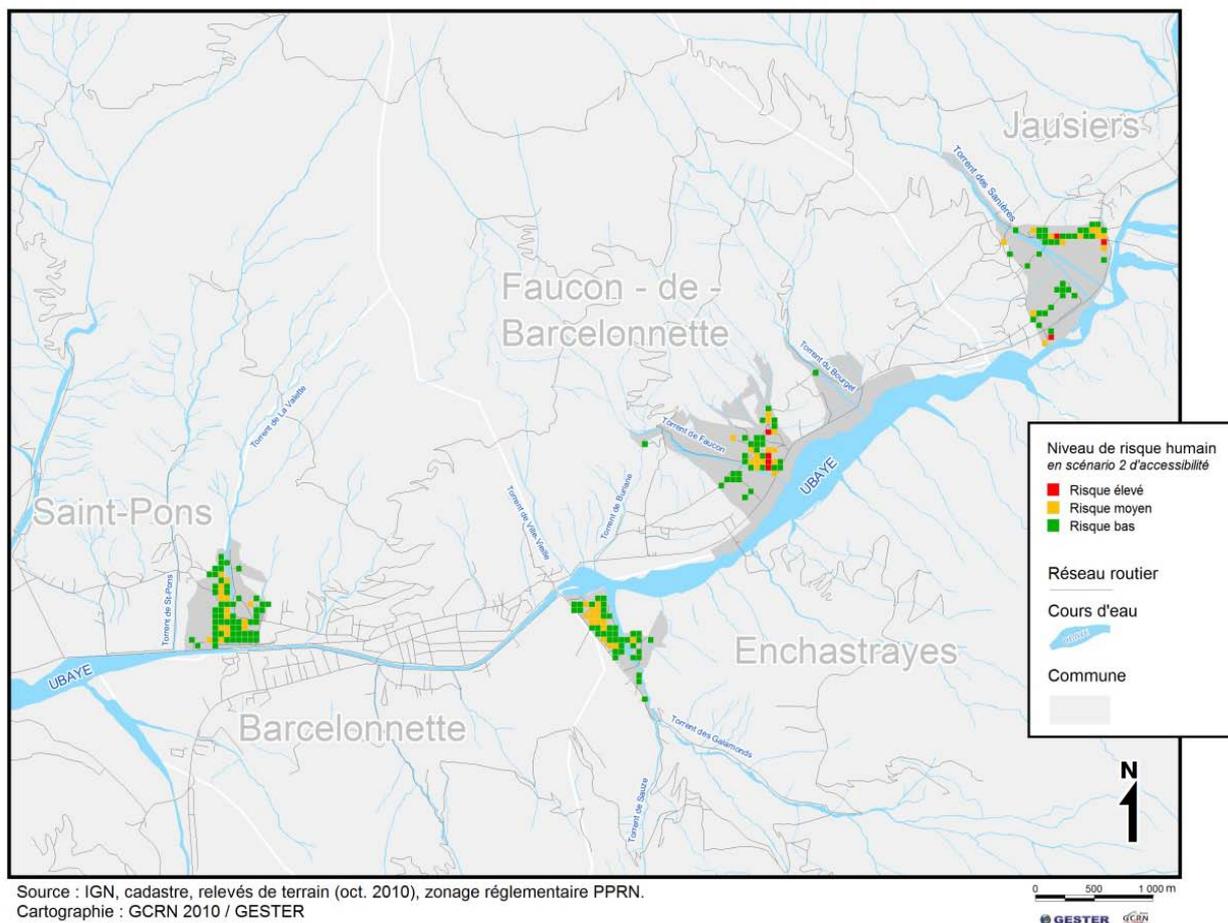


Figure L3 - Niveaux de risque humain combiné pour le scénario 2 de dégradation de l'accessibilité

En comparant les résultats du **scénario 2** avec le précédent nous voyons clairement qu'il y a un déplacement des foyers de risque humain combiné de niveau élevé (**figure L3**). Le temps d'accès vers les communes de Faucon-de-Barcelonnette et Jausiers dépasse le seuil critique de 20 minutes. Cette situation dégradée par rapport à la période normale joue un rôle amplificateur des niveaux de risque de ces espaces.

CONCLUSION PARTIE 2

Au cours de cette étude nous avons développé une méthodologie de mesure du risque humain et économique à l'échelle locale. Cette méthodologie se veut facilement reproductible. Elle se base sur la construction d'indices à partir de données récoltées sur le terrain et d'une approche multicritère « à dire d'expert ». La pondération des critères permet d'obtenir des valeurs quantitatives de vulnérabilité et de risque pour chaque habitation. L'intégration de toutes ces données dans un système d'information géographique permet de cartographier les différents indices et de faciliter l'analyse comparative entre les différentes zones étudiées. L'objectif n'est pas d'évaluer les pertes potentielles, mais d'apprécier le plus finement possible la variabilité spatiale du risque et ses principaux foyers.

Les indices agrégés établis pour des mailles de 50 m de côté peuvent être combinés avec des temps d'accès. La modélisation de l'accessibilité, basée sur la vulnérabilité des réseaux routiers, permet d'analyser le risque indirect (en particulier d'isolement géographique) et par voie de conséquence la notion de vulnérabilité territoriale. C'est une méthodologie qui peut être transposée à d'autres aléas naturels et d'autres réseaux. Elle offre la possibilité de modéliser des événements passés mais d'établir également des scénarios fictifs et prospectifs utiles aux services de secours afin de tester leurs capacités de réponse en cas de crise future.

Cependant, des incertitudes demeurent sur la qualité des différentes bases de données constituées, en particulier sur la précision du réseau routier, la fréquence des crues et laves torrentielles. Par ailleurs, les conditions réelles de trafic en cas de crise (chassés-croisés de vacanciers, migrations pendulaires) ne sont pas exploitées dans nos scénarios, alors qu'elles auraient un impact sur les vitesses de circulation. De même, d'autres perturbations potentielles de la circulation (travaux de voirie, accidents routiers, autres phénomènes naturels, etc.) pourraient être intégrées dans des scénarios complémentaires. Ce sont des conditions de l'accessibilité à ne pas sous-estimer lors d'une gestion de crise nécessitant des interventions de secours vers ou en provenance de zones impactées.

BIBLIOGRAPHIE PARTIE 2

- Ballandras S., Nevriere C.** (1991) - Le détritisme torrentiel holocène intra-alpin : l'exemple du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud) - *Physio-Géo*, 22/23, pp. 15-20.
- Ben Mena S.** (2000) - Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision - *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, pp. 83-93.
- CEPRI** (Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation) (2010) – *Le bâtiment face à l'inondation. Diagnostiquer et réduire sa vulnérabilité* – Guide méthodologique, Ed. CEPRI, 56 p. (www.cepri.fr).
- D'Ercole R., Metzger P.** (2009) - La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain - *Cybergeog: European Journal of Geography*, URL : <http://cybergeog.revues.org/index22022.html>.
- 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 de « débris flow » dans les départements des Alpes de Haute Provence, des Hautes-Alpes et de Savoie* - Mémoire de Master 1 Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels (G.C.R.N.), Université Montpellier III, 102 p.
- Etienne D.** (2007) - *Evaluation quantitative et cartographie du risque "glissement de terrain" - Application au Bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence - France)* – Mémoire de Master 2 Recherche, Université Louis Pasteur - Strasbourg 1.
- Leone F.** (1996), *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* - Thèse de doctorat, spécialité géographie, Université J. Fourier, Grenoble, publiée dans les Documents du B.R.G.M., N°250, Editions du B.R.G.M., Orléans, 286 p.
- Leone F.** (2007) - *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)* - Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université Paul Valéry – Montpellier III, Laboratoire GESTER, Montpellier, 245 p. + Annexes.
- Leone F., Vinet F.** (2006) – La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels – In : Leone F. & Vinet F. (dir.) : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques – Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, pp. 9-25.
- Leone F., Vinet F.** (dir.) (2011) - *Projet SCAMPEI : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Diagnostic territorial intégré du risque torrentiel (Vallée de l'Ubaye) - Rapport collectif de stage de terrain, Master 2 « Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels », Département de Géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 182 p. + Annexes.*
- Leone F., Vinet F., Denain J.C., Bachri S.** (2007) – Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie). Premiers résultats pour l'élaboration de futurs scénarios de risque – *Géocarrefour*, Vol. 82, n°1-2, (numéro spécial risques et territoires), pp. 77-90.
- Miramont C.** (1998) - Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance - Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 286 p.

- Remaître A.** (2006) - Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud) - Thèse de Doctorat, Univ. de Caen-Basse-Normandie, Caen, 487 p.
- Remaître A., Maquaire O, Pierre S.** (2002) - Zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Exemple du torrent de Faucon (Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence) - *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2002-1, pp. 71-84.
- Remaître A., Maquaire O., Malet J.P.** (2005) - Morphology and sedimentology of a complex debris flow in clay-shales basin - *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, pp. 339-348.
- Sivan O.** (2000) - *Torrents de l'Ubaye* - Editions Sabeņa de la Valeia, Barcelonnette, 48 p.