Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du master 2 GEOIDES

LES SIG COMME OUTIL DE PREPARATION A LA GESTION DE CRISE DU RISQUE AVALANCHE

LE CAS DE L'EVACUATION DES POPULATIONS

Réalisé au Pôle Alpin d'étude et de recherche sur les Risques Naturels,
encadré par Simon GERARD

Mémoire soutenu le 29 juin 2021

Par : Cyrille THOMAS

Devant un jury constitué de :

Madame Elise Beck, Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes
Monsieur Humbert Fiorino, Maître de conférences à l'Université Grenoble Alpes

Année 2020-2021

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe du PARN pour leur accueil au sein de l'association. Je remercie Simon Gérard pour m'avoir permis de réaliser ce stage. Au cours de ces trois mois, j'ai pu découvrir sous un nouvel angle la gestion des risques naturels. Merci pour la liberté et la confiance accordées lors du développement de mon travail.

Résumé

En France, 611 communes de montagne sont concernées par le risque avalanche. Compte tenu des aléas et enjeux présents au sein de ces communes, la connaissance, la planification et la prévention du risque avalanche apparaissent comme primordiales. Si de nombreux outils sont mis en place pour la gestion du risque, ces documents ne figurent pas dans toutes les communes ou n'ont pas été mis à jour depuis de nombreuses années. Un réel intérêt apparait donc dans l'élaboration d'un outil permettant de s'inscrire dans la préparation de gestion du risque avalanche, applicable sur toutes les communes concernées, et pouvant être mis à jour régulièrement. Cette étude s'intéresse aux apports des SIG dans la gestion du risque avalanche, plus particulièrement dans le cas de l'évacuation des populations.

Table des matières

Remerciements 2

Résumé 2

Sigles et acronymes : 4

Introduction 5

1. Contexte 7

1.1 Le PARN 7

1.2 Risque avalanche et évacuation 9

1.3 Territoires étudiés 11

2. Méthodologie 13

2.1 QGIS comme logiciel de traitement 13

2.2 Données mobilisées 13

2.3 Méthodologie développée 14

2.4 Diagnostic du risque avalanche 14

2.5 Vulnérabilité des réseaux de communication 16

2.6 Estimation des temps d'évacuation 19

3. Résultats 22

3.1 Manigod 22

3.2 Chamonix 29

Conclusion 36

Bibliographie 37

Sitographie 38

Sigles et acronymes :

DICRIM : Document d'Information Communal sur les RIsques Majeurs

ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile

PAE : Plan d'Alerte Evacuation

PCS : Plan Communal de Sauvegarde

PPRA : Plan de Prévention des Risques Avalanche

PPRN : Plan de Prévention des Risques Naturels

SIG : Système d'Information Géographique

Introduction

En France, les risques naturels occupent une grande partie du territoire : plus des deux tiers des communes sont exposées à au moins un risque (Ministère de la transition écologique).

Dans sa définition scientifique, le risque résulte d'un croisement entre deux composantes. D'une part, il y a l'aléa : la probabilité d'occurrence d'un phénomène, caractérisé par une intensité, une extension spatiale et temporelle. Et de l'autre, la vulnérabilité des enjeux, représentés par l'ensemble des personnes et biens susceptibles de subir les conséquences de l'aléa.

En France, les aléas sont nombreux, l'inondation est le plus important, tant par le nombre de communes concernées, que par les dommages qu'elle provoque (Géorisques, 2021). A cela s'ajoutent les mouvements de terrain, les avalanches, les feux de forêt, les tempêtes et les séismes. Si ces phénomènes ont toujours existé, la présence de l'homme induit une notion de vulnérabilité. Cette dernière exprime le niveau des conséquences prévisibles d'un aléa sur les enjeux (Géoconfluence, 2021).

Les massifs montagneux peuvent apparaitre comme des territoires paisibles, imposants et certains ; pourtant ces zones sont fortement sujettes aux aléas naturels. Les communes de montagne présentent généralement une situation multirisque, dont les inondations et risques gravitaires en sont les principaux. Au sein des Alpes, au moins deux aléas sont recensés par commune (FFCAF, 2014).

De plus, en montagne, les enjeux sont de taille : la population du massif des Alpes augmente chaque année, avec environ 1.1% de croissance démographique par an depuis 1999. Aujourd'hui on compte 2,7 millions d'habitants au sein du massif des Alpes (Massif des Alpes, 2020). Bien que cette population se polarise essentiellement autour des grandes agglomérations, les communes de montagne ont la particularité d'accueillir un grand nombre de touristes, situation qui augmente alors la vulnérabilité de ces territoires. Basées essentiellement sur l'économie touristique, ces communes comptent 6,7 fois plus de résidences secondaires que la moyenne métropolitaine (SDES, 2020).

Compte tenu des aléas et enjeux, la connaissance, la planification et la prévention de chacun des risques naturels apparaissent comme primordiales pour les communes de montagne. Au cours de ce travail, nous nous concentrerons sur un risque en particulier : le risque avalanche qui concerne 611 communes de haute montagne (SDES, 2020).

La gestion du risque avalanche (et de l'ensemble des risque naturels) peut être divisée en trois axes : la planification, la protection et la gestion de crise. Pour la mettre en place, divers outils sont mis en place à destination des communes. Parmi ces outils, on retrouve le Plan de Prevention de Risques Naturels (PPRN), parfois spécifique aux avalanches dans certaines communes. Ce document vise à la fois à règlementer l'urbanisme mais également à déterminer les zones à risque. Le Document d'Information Communal sur les RIsques Majeurs (DICRIM) est destiné aux populations qui souhaitent s'informer des risques présents sur leur territoire. On

retrouve également l'ensemble des mesures de protection, ainsi que les outils relatifs à la gestion de crise comme les Plan Communaux de Sauvegarde (PCS) ou encore le dispositif ORSEC (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile).

Toutefois, ces documents ne figurent pas dans toutes les communes ou n'ont pas été mis à jour depuis de nombreuses années. Un réel intérêt apparait donc dans l'élaboration d'un outil permettant de s'inscrire dans la préparation de gestion du risque avalanche, applicable sur toutes les communes concernées, et pouvant être mis à jour régulièrement. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce stage.

D'une manière générale, ce travail vise à répondre à la problématique suivante : de quelles manières peut-on intégrer les SIG dans la préparation de gestion de crise du risque avalanche ? Le cas de l'évacuation des populations.

Plusieurs objectifs sont développés ; le premier est de comprendre et connaitre le risque avalanche au sein du territoire, le second concerne l'analyse de la vulnérabilité de ces territoires vis-à-vis de l'évacuation. Enfin, le dernier objectif se consacre à l'estimation des temps d'évacuation des populations. Pour ce faire, une méthodologie générale est développée, dans le but que ce travail puisse être reproductible, mis à jour ou poursuivi. L'ensemble des traitements est réalisé sur le logiciel SIG QGIS 3.10.14.

Après une présentation de la structure d'accueil, nous reviendrons plus en détail sur la thématique ainsi que le choix des territoires étudiés. Une seconde partie sera consacrée à la description de la méthodologie mise en place, puis nous présenterons quelques résultats avant de conclure.

1. Contexte

1.1 Le PARN

Le Pôle Alpin d'étude et de recherche sur les Risques Naturels est une association loi 1901 fondée en 1988. Situé sur le campus de l'Université Grenoble Alpes (UGA) à Saint-Martin-d'Hères, le PARN a été créé avec deux objectifs principaux.

Le premier est de rassembler les organismes ayant une activité d'études et de recherche dans le domaine des risques naturels, afin de mettre en place des programmes de recherche coordonnés et remédier ainsi à la dispersion des efforts en ce domaine. Aujourd'hui le PARN compte neufs membres différents, ce sont aussi bien des universités, que des associations, laboratoires de recherches et établissements publiques.

Le second objectif consiste à développer des outils scientifiques et techniques performants à disposition des pouvoirs publics et des services opérationnels pour améliorer la prévision et la prévention des risques naturels. D'une manière globale, le PARN joue le rôle d'interface entre la sphère territoriale (techniciens, gestionnaires, et décideurs) et la sphère scientifique (la recherche).

Si les risques naturels en milieu de montagne sont le principal domaine de compétence du PARN, l'association ne s'arrête pas aux aspects physiques des risques et intervient également sur d'autres domaines transversaux tels que les impacts du changement climatique, les approches socio-économiques des risques, la gouvernance des risques ou encore la résilience territoriale.

Les actions du PARN s'appliquent à toutes échelles, aussi bien à l'échelle locale lors d'intervention auprès des territoires qu'à l'échelle nationale et transfrontalière (notamment avec l'appui aux politiques publiques telles que EUSALP/SUERA et Interreg).

Pour mener à bien l'ensemble de ses projets, l'équipe permanente est composée de six personnes : un directeur, une assistante de direction, une cheffe de projet et trois chargés de missions. Les compétences du PARN s'articulent autour des trois réseaux suivants :

- La Gestion Intégrée des Risques Naturels dans les Alpes (GIRN), une opération interrégionale, co-financée par les régions (AuRA et PACA), l'Etat et l'Union Européenne. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la Convention Interrégionale du Massif des Alpes (CIMA) et du Programme Opérationnel Interrégional du massif Alpin (POIA). L'objectif est d'améliorer la gestion des risques naturels, en accompagnant les territoires via un appui technique et méthodologique dans l'élaboration de stratégies à leurs échelles. Depuis son lancement en 2009, 14 territoires alpins ont souscrit à une démarche GIRN.
- Science Décision Action (SDA), un réseau d'interface en lien avec la GIRN, dont l'objectif est l'émergence de projets scientifiques coconstruits avec des acteurs locaux pour développer des outils innovants de gestion intégrée des risques naturels et d'adaptation au changement climatique. Le projet est structuré autour d'un réseau d'acteurs (scientifiques,

opérationnels, territoires) et d'une démarche d'accompagnement (de la construction à la valorisation).

- Alpes Climat Risques est une plateforme de veille scientifique dédiée au changement climatique. Animée par le PARN depuis 2006, elle permet le rassemblement des connaissances ainsi qu'un appui aux partenaires (opérationnels, scientifiques ou associatifs) en matière d'adaptation.

1.2 Risque avalanche et évacuation

De nombreux territoires de montagne affichent une vulnérabilité aux avalanches. Chaque année, en moyenne, une vingtaine de personnes sont emportées par les avalanches (ANENA, 2020). La gestion et prévention du risque avalanche s'inscrivent dans l'objectif de réduire au mieux ce risque et ainsi protéger les populations. Comme évoqué en introduction, la gestion du risque s'organise en trois phases et la planification en est la phase la plus longue, demandant un long travail en amont.

Face au risque avalanche, l'évacuation des populations doit être envisagée et peut s'avérer être la principale mesure de protection. Dans sa définition, une évacuation correspond au déplacement de populations d'une zone à risque vers une zone sûre en situation de crise. La procédure d'évacuation doit être préparée afin de prendre en compte les évolutions possibles de la situation : un environnement potentiellement perturbé additionné au stress peut engendrer le refus de l'évacuation, des accidents, une exposition directe à la catastrophe, ou encore une paralysie des services de secours (Daudé, 2016). En France, la question de l'évacuation se pose généralement pour le risque inondation mais n'est pas généralisée à tous les types de risques, en raison de la faible probabilité d'occurrence d'autres évènements extrêmes. De ce fait, il peut être difficile pour les gestionnaires de crise de comprendre et d'anticiper les enjeux liés à la conception de plans d'évacuation (Daudé, 2016). Une évacuation peut être locale et ponctuelle à l'échelle d'une commune ou d'un département, mais elle peut également être massive (Fujik, 2018).

Il existe deux grandes catégories d'évacuation : l'évacuation dite « horizontale » et l'évacuation « verticale ». L'évacuation horizontale est le déplacement des populations situées dans une zone à risque vers une zone sûre, cela peut s'effectuer au sein d'un quartier, d'une ville ou dans d'autres mesures vers un autre territoire (Fujik, 2018). Lorsque l'évacuation horizontale est impossible, l'option d'une évacuation verticale se présente : elle consiste en un confinement des populations au sein de leur bâtiment ou maison, dans des zones moins exposées, souvent en hauteur.

Dans tous les cas, une évacuation doit être anticipée et étudiée en amont, car plusieurs paramètres sont à prendre en compte. Tout d'abord, une bonne connaissance du territoire et de l'aléa auquel il est soumis est indispensable pour permettre de déterminer les potentielles zones à évacuer (ESCAPE, 2016). Ensuite, les enjeux du territoire requièrent une attention particulière : la population exposée, ainsi que les types de bâtiments concernés (école, maison, hôtels…) doivent être étudiés. L'objectif est de déterminer des zones de regroupement et d'hébergement. Enfin, une analyse des réseaux de communication et de leur vulnérabilité est nécessaire. Ainsi, cela permet de construire des itinéraires d'évacuation (en tenant compte des paramètres qui peuvent entraver l'évacuation).

Face à ces problématiques, les systèmes d'informations géographiques (SIG) apparaissent comme un outil intéressant dans la préparation du risque avalanche. Les domaines d'application des SIG sont multiples, tout comme leurs possibilités ; ils représentent la synthèse

des progrès réalisés dans le traitement numérique de l'information géographique (Denègre, 1992).

Les SIG sont utilisés dans la gestion des risques naturels, en raison de leurs nombreux avantages, à la fois pour la recherche mais également pour les territoires et leurs gestionnaires. Les SIG permettent de mobiliser des informations de sources variées sur un support unique (Gourmelon, 2008), avec la possibilité de gérer ces informations, les mettre à jour, les transformer au travers différentes analyses (recherche d'informations, analyse spatiale, analyse topologique, croisement de couches d'informations) et de restituer l'information géographique sous forme de cartes, tableaux, ou graphiques (Tarhouni, 2012).

1.3 Territoires étudiés

La gestion des risques diffère selon les communes, et dépend de plusieurs paramètres tel que la taille du territoire, le degré d'exposition au risque avalanche, la population, ou encore les évènements passés. Pour autant, il ne semble pas impossible de développer une méthodologie commune dans l'intégration des SIG pour la planification du risque avalanche.

C'est pourquoi, il a été décidé d'étudier deux territoires différents, deux communes, sites pilotes, situées en région Auvergne Rhône Alpes dans le département de Haute Savoie. D'un côté Chamonix Mont Blanc et de l'autre Manigod (FIGURE 1).

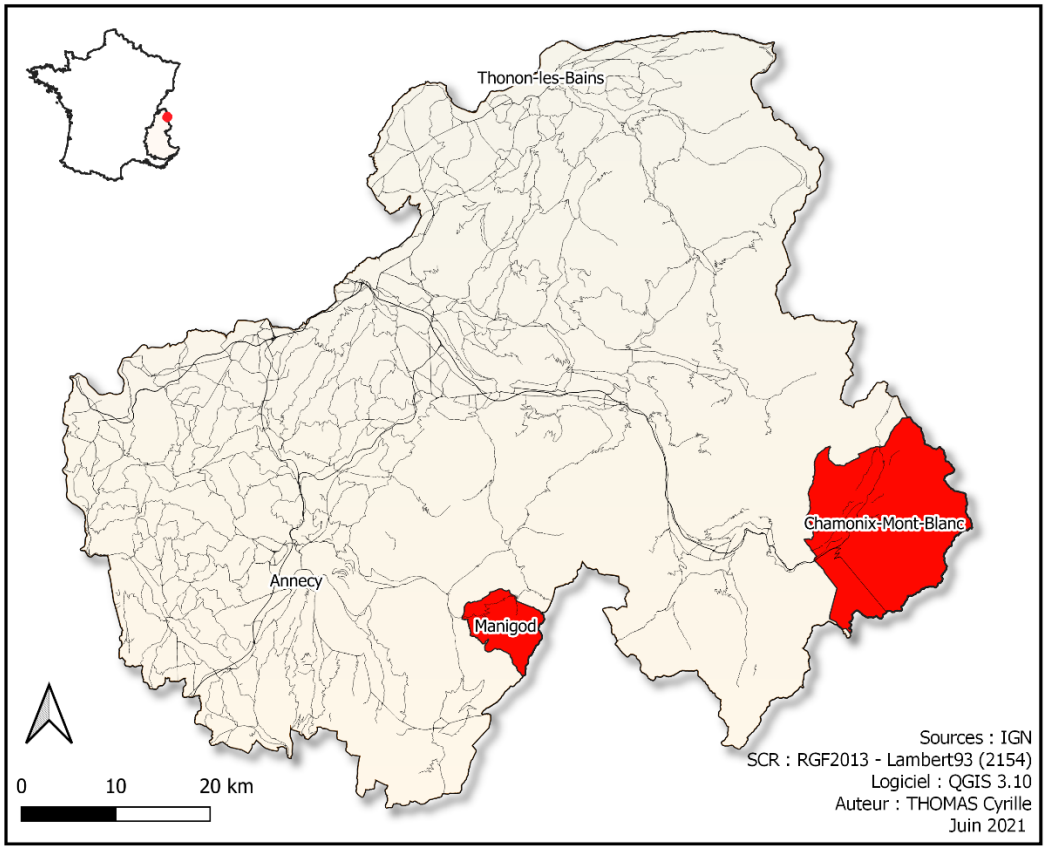


Figure 1 : carte de localisation des territoires étudiés

Chamonix est une commune de 8 600 habitants (INSEE, 2018), qui s'étend sur 116 km² pour une densité totale de 74 hab./m². Mondialement connue pour son sommet le plus haut d'Europe, le Mont Blanc, ainsi que la Mer de Glace, glacier historique, Chamonix attire de nombreux touristes avec quelques 2.5 millions de visiteurs par an (COMETE, 2014). Le risque avalanche y est présent, le territoire étant régulièrement frappé par les avalanches à l'origine d'un bilan parfois lourd. Un des évènements les plus dramatiques est certainement l'avalanche de Montroc survenue le 9 février 1999, détruisant sur son passage 14 chalets et faisant 12 victimes et 20 blessés. Quelques mois après ce drame était créée l'AIRAP (l'Association d'Information sur les Risques d'Avalanche en milieu urbain et leur Prévention).

La gestion du risque avalanche occupe ainsi une grande place au sein de cette commune. C'est pourquoi, on retrouve à Chamonix divers outils mis en place à la fois pour une bonne planification, protection et gestion de crise des avalanches. La commune dispose d'un Plan de Prévention des Risques Naturels spécifique aux Avalanches (PPRA), révisé en 2015, qui intègre désormais les zones d'aléa de référence exceptionnel (autrement dit, une avalanche exceptionnelle dépassant le caractère centennal) ; elles sont appelées « zones jaunes ». Un DICRIM a été rédigé et est mis à disposition pour la population qui souhaite s'informer des risques présents sur le territoire. En matière de protection, on retrouve à Chamonix plusieurs dispositifs paravalanches tels que les ouvrages de protection ainsi que huit Plan d'Intervention de Déclenchement des Avalanches (PIDA). Enfin, pour ce qui est de la gestion de crise, le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) rédigé en 2010 est régulièrement mis à jour. Aussi, ce dernier intègre une cartographie du Plan d'Alerte Evacuation avalanche (PAE) pour l'ensemble de la commune, couplé à un système d'alerte.

Manigod est une commune plus petite, avec 1001 habitants (INSEE, 2020) pour une superficie totale de 44 km². Village de montagne accueillant les touristes en saison hivernale, la population à Manigod se multiplie pendant ces périodes. Au cours du XXe siècle, 13 avalanches sont survenues sur la commune. Les deux avalanches les plus récentes ont eu lieu en 2015 et 2018. En termes de gestion du risque avalanche, Manigod possède un PPRn, il est multi risque, non spécifique aux avalanches. Toutefois, ce PPRn a été révisé en 2019 et intègre désormais les « zones jaunes » comme à Chamonix. Le PCS a été rédigé en 2010, et la commune dispose également d'un DICRIM à destination de sa population.

Le tableau 1 résume les différences entre les deux territoires étudiés.

		Chamonix	**Manigod**
	Superficie	116 km²	44 km²
	Nombre d'habitants	8 600	1 001
	Longueur du réseau routier	305 kms	164 kms
	Part du territoire exposé aux avalanches	17%	22%
Outils de panification	Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) global	✓	✓
	PPRN spécifique aux avalanches	✓	✗
Outils de protection	Ouvrages de protection	✓	✗
	Plan d'Intervention de Déclenchement des Avalanches (PIDA)	✓	✗
Outils de gestion	Document d'Information Communal sur les RIsques Majeurs (DICRIM)	✓	✓
	Plan Communal de Sauvegarde (PCS)	✓	✓
	Plan d'Alerte Evacuation (PAE)	✓	✗

Tableau 1 : caractéristiques des territoires étudiés

2. Méthodologie

Comme vu en introduction, trois grands objectifs sont traités au cours de cette étude :

- Comprendre et connaitre le risque avalanche au sein du territoire
- Analyser la vulnérabilité du territoire vis-à-vis de l'évacuation (vulnérabilité des réseaux de communication, possible enclavement)
- Et enfin, estimer les temps d'évacuation des populations.

Afin de répondre à la problématique, l'étude est divisée en trois axes. La première étape est la collecte des données, c'est une phase qui demande un certain temps et ne doit pas être négligée. Les données ont été récupérées auprès des territoires étudiés mais également auprès des fournisseurs de données libres de droit. La seconde phase est la plus importante concerne le développement de la méthodologie et les suites de traitements pour mener à bien ce travail. Enfin la dernière phase comprend la rédaction, mise en page des cartes et des différents projets QGIS.

2.1 QGIS comme logiciel de traitement

QGIS est un logiciel de cartographie gratuit et libre de droit, il est apparu comme un choix évident. Si ce travail est voué à être poursuivi, développé voire appliqué sur d'autres territoires, il était préférable de réaliser ce travail sur ce type de logiciel. Cependant il est tout à fait possible de transposer l'ensemble des traitements sur n'importe quel logiciel de SIG.

Avant d'exposer la méthodologie de travail ainsi que les résultats, il est nécessaire de présenter brièvement les données à mobiliser.

2.2 Données mobilisées

La tableau 2 liste les données brutes nécessaires afin de mener à bien le travail de cartographie. Les données seront récupérées au format Shape en Lambert 93 (EPSG 2154).

Données	**Sources**
Communes françaises	IGN
Réseau routier	IGN
Réseau ferré	IGN
Données CLPA	INRAE
PPRn	DDT 74
Bâti	IGN

Tableau 2 : liste de données brutes mobilisées

Aussi, d'autres données non géoréférencées sont nécessaires pour le travail de cartographie. L'ensemble des outils disponibles pour la gestion du risque avalanche sont récupérés lorsque

cela est possible (PCS, DICRIM, PAE, règlementation PPRN, ensemble de protocoles d'évacuation…). Ces données sont généralement en format PDF.

2.3 Méthodologie développée

Cette partie est consacrée au développement de la méthodologie engagée sous forme d'explication et diagrammes d'exécution. Afin que ce travail soit reproductible facilement, la méthodologie se veut générale. Les aspects techniques et spécifiques aux territoires étudiés ainsi que les résultats cartographiques réalisés jusqu'à présent seront présentés au sein de la dernière partie résultats.

2.3.1 Préparation des données

Avant tous traitements spécifiques, la préparation des données est primordiale. La première étape consiste à créer les limites administratives du territoire étudié. Une fois la couche obtenue, chaque jeu de donnée peut être découpé en fonction du territoire étudié, ainsi nous obtenons des données spécifiques aux territoires. La figure 2 résume les traitements effectués pour y parvenir.

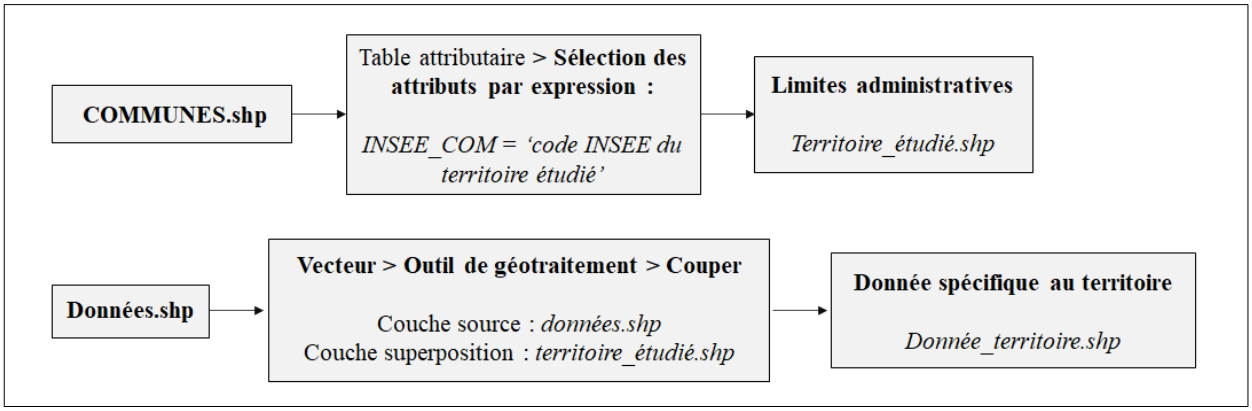


Figure 2 : diagramme d'exécution pour la préparation des données

2.4 Diagnostic du risque avalanche

Dans l'objectif de réaliser un diagnostic du risque avalanche d'un territoire, deux données principales sont utilisées.

La première est mise à disposition par l'INRAE : ce sont les données extraites au format shapefile de la CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes Avalancheux). Comme son nom l'indique, cette donnée représente les différents phénomènes avalancheux observés ou historiques. Ces données CLPA sont divisées en deux catégories : l'un des jeux de donnée est le produit d'un recueil de témoignages par enquête, l'autre jeu est le résultat d'une étude d'interprétation sur la base de photographies aériennes (Bonnefoy et al, 2010).

Les données CLPA représentent différentes zones, pour notre étude, seules les avalanches, zones avalancheuses et zones présumées avalancheuses sont conservées. L'ajout d'une

symbologie catégorisée en fonction de ces zones permet la cartographie des couloirs d'avalanche de la commune étudiée. La figure 3 présente la chaine des traitements réalisés.

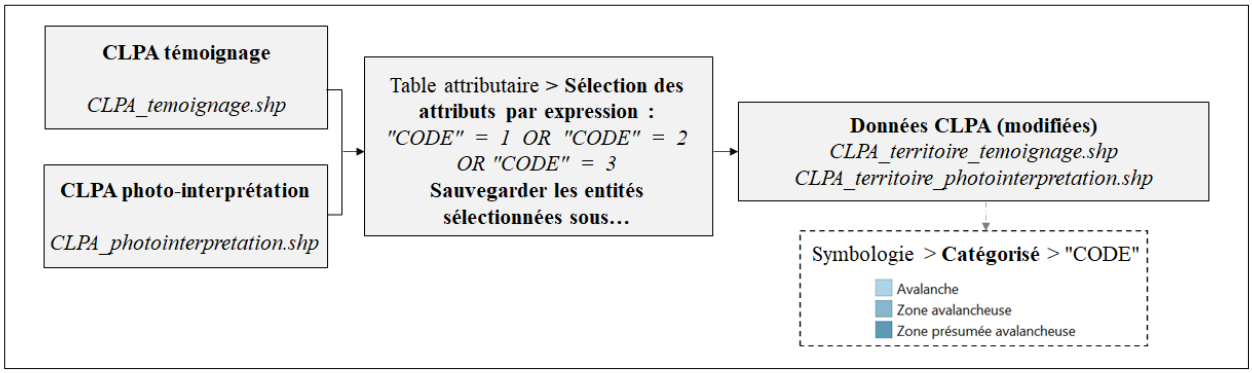


Figure 3 : diagramme d'exécution pour le traitement des données CLPA

La seconde donnée utilisée pour le diagnostic du risque avalanche est l'ensemble des données relatives aux PPRn. Ces données ont été récupérées sur le service web de métadonnées *data-gouv* et sont fournies par la Direction Départementale des Territoires de Haute-Savoie (DDT 74).

Pour les communes dont le PPR est spécifique aux avalanches, la donnée nécessite peu de traitement si ce n'est une symbologie catégorisée. En revanche pour les communes qui possèdent un PPRn multirisque, il est nécessaire d'extraire les données spécifiques aux avalanches, d'une part pour les zones règlementaires et de l'autre pour les zones d'aléas.

Concernant les zones réglementaires ; au sein des documents de règlementation des PPRn, des codes spécifiques sont attribués aux zones règlementaires en fonction des aléas auxquelles elles sont soumises. Ainsi, en se référant à ce document, les zones règlementaires concernées par l'aléa avalanche peuvent être extraites. La figure 4 illustre l'extraction des données avalanches.

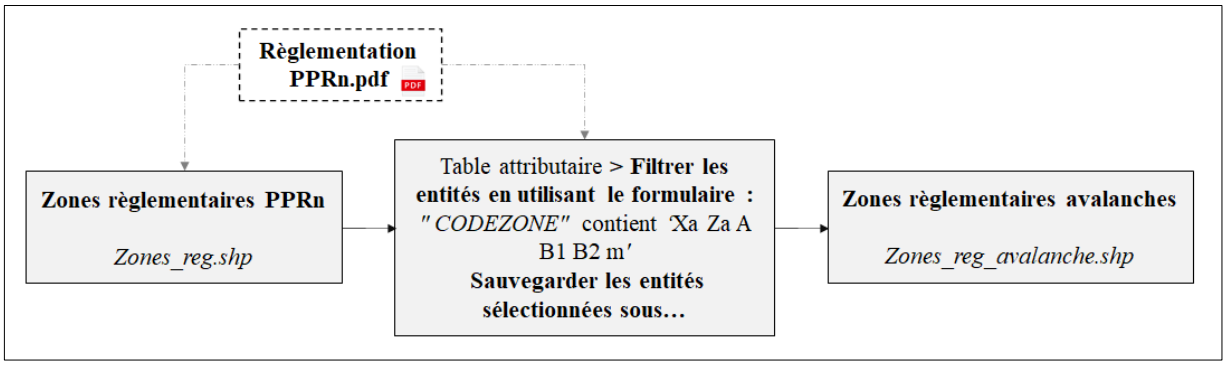


Figure 4 : diagramme d'exécution pour l'extraction des zones règlementaires avalanches

Pour ce qui est des zones d'aléas, on retrouve au sein de la table attributaire de nombreuses informations, comme le nom de l'aléa de la zone en question. Cependant, si certaines zones sont clairement associées à l'aléa avalanche, la plupart d'entre elles sont catégorisées comme multi-aléas. Afin d'extraire les zones multi-aléas concernées par les avalanches, il faut s'intéresser au champ « natnivddt » qui détaille à l'aide de codes, les aléas. La lettre A correspond aux avalanches et est toujours suivie d'un chiffre 1, 2 ou 3 précisant ainsi le degré d'intensité de l'aléa. A l'aide de quelques requêtes, on isole les données

multirisques concernées par les avalanches, pour en faire une donnée à part entière ; puis on crée un nouveau champ qui détaille le niveau de l'aléa avalanche (1 : faible, 2 : moyen, 3 : fort). Ainsi en suivant le diagramme de la figure 5, on obtient une carte des aléas avalanches à partir d'un PPRn multirisques.

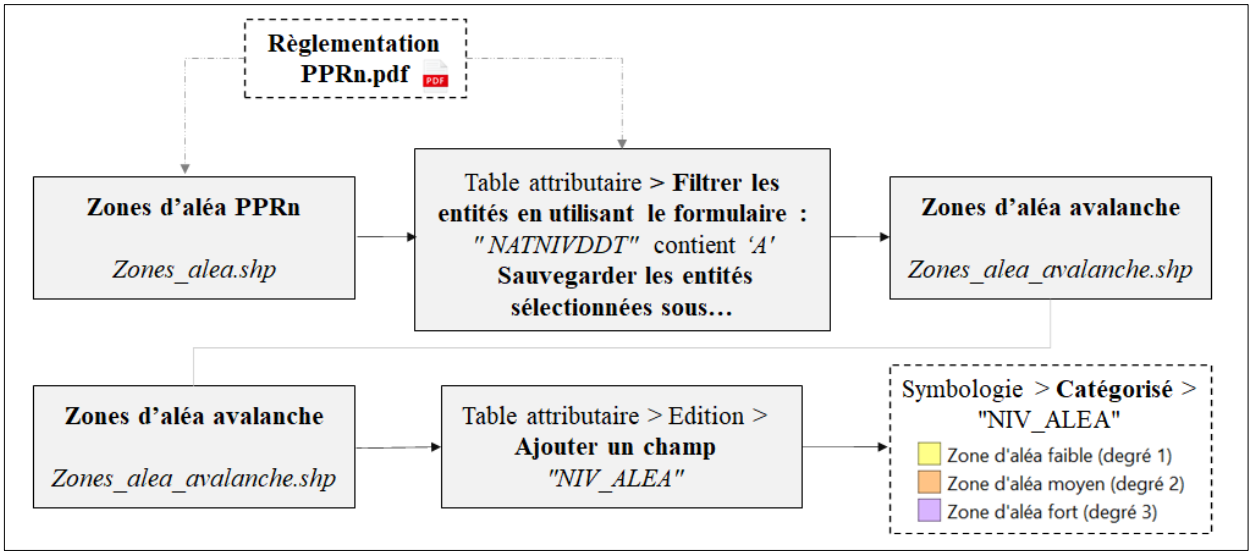


Figure 5 : diagramme d'exécution pour l'extraction des zones d'aléa avalanche

Une fois le diagnostic de l'aléa avalanche réalisé, nous nous sommes intéressés à l'ensemble des réseaux de communication, plus particulièrement à leur potentielle vulnérabilité.

2.5 Vulnérabilité des réseaux de communication

2.5.1 Le choix des données IGN

Afin d'analyser la vulnérabilité des réseaux de communication vis-à-vis de l'évacuation, nous avons fait le choix d'utiliser la base de données TOPO de l'IGN, la version 3.0. Ces données sont disponibles pour l'ensemble du territoire français. C'est une base très complète, qui comporte de nombreux avantages, en particulier le renseignement de la nature des tronçons. En effet, à chaque portion de route ou chemin est attribué (en fonction de ses caractéristiques physiques), une des valeurs suivantes : sentier, bac ou liaison maritime, bretelle, chemin, escalier, piste cyclable, rond-point, route à 1 chaussée, route à 2 chaussées, route empierrée, type autoroutier.

2.5.2 Déterminer les impasses dans le réseau routier

Caractériser les impasses sur le réseau routier permet de déterminer le possible enclavement des territoires. On considère ici une impasse comme la route menant d'un point A à un point B et dont la seule manière de rejoindre à nouveau le point A est de repasser par la même route que celle du trajet aller.

Un travail de tri et d'uniformisation du réseau routier a été réalisé. Les tronçons de routes physiquement inaccessibles par les véhicules à moteur ont été supprimés. Les impasses ont été sélectionnées manuellement, grâce à une analyse visuelle sur fond de carte satellite. Ainsi il est possible de caractériser le réseau routier. La figure 6 présente le diagramme d'exécution de l'ensemble des traitements.

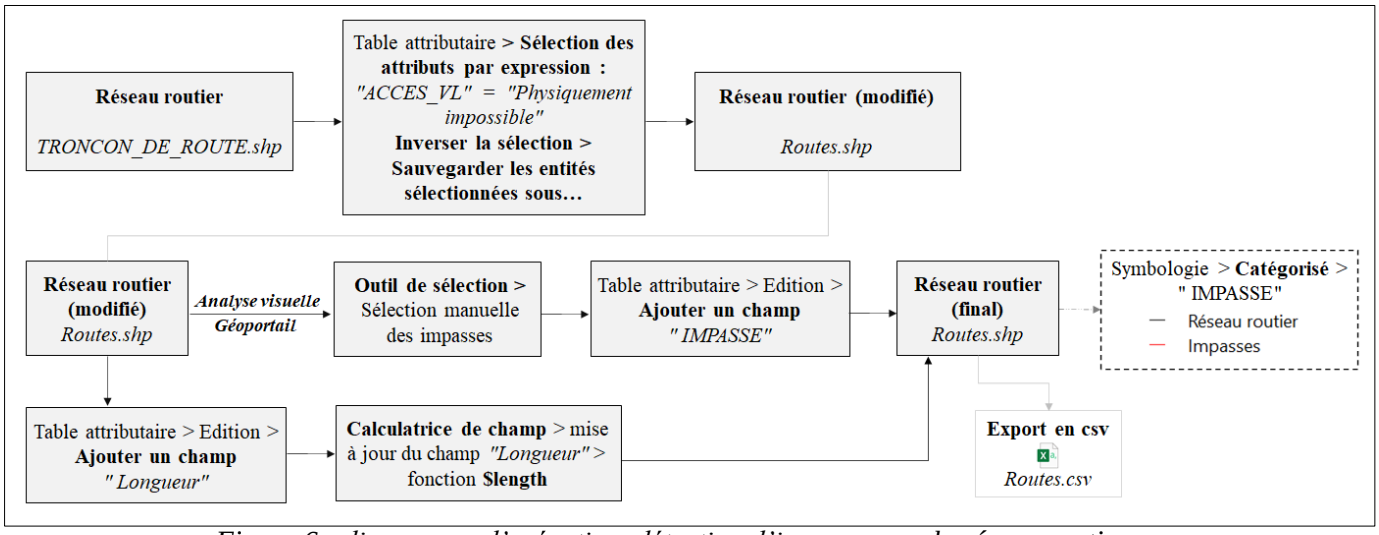


Figure 6 : diagramme d'exécution, détection d'impasses sur le réseau routier

2.5.3 Réseau routier impacté par les avalanches

Afin d'évaluer l'exposition du réseau routier face aux avalanches, plusieurs traitements ont été réalisés. Tout d'abord nous avons fait le choix de croiser le réseau routier avec les données CLPA à l'aide de l'outil « intersecter » : cela permet de visualiser les portions de routes qui ont pu être coupées par une avalanche ou qui, potentiellement peuvent être coupées. Grâce au traitement précédent, les impasses peuvent être ajoutées à l'analyse, ainsi ressortent les impasses vulnérables aux avalanches (FIGURE 7).

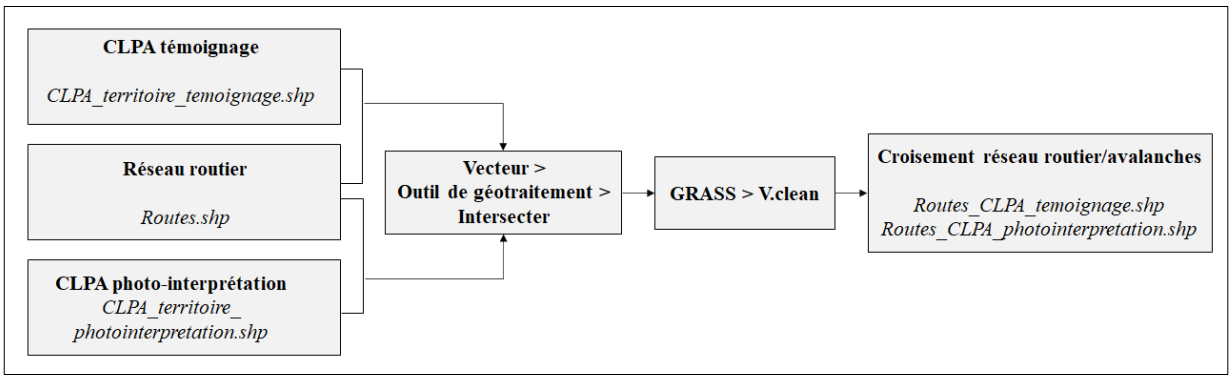


Figure 7 : diagramme d'exécution, croisement du réseau routier avec les données avalanche

L'utilisation de l'outil « V.clean » n'est pas obligatoire pour la réalisation de carte mais a toute son importance lors de statistique. En effet, cet outil permet d'isoler chacune des portions de routes intersectées par un même couloir d'avalanche. Par exemple, sur la figure 8, l'outil « intersecter » dénombrera trois coupures, contre quatre avec l'outil « V.clean ».

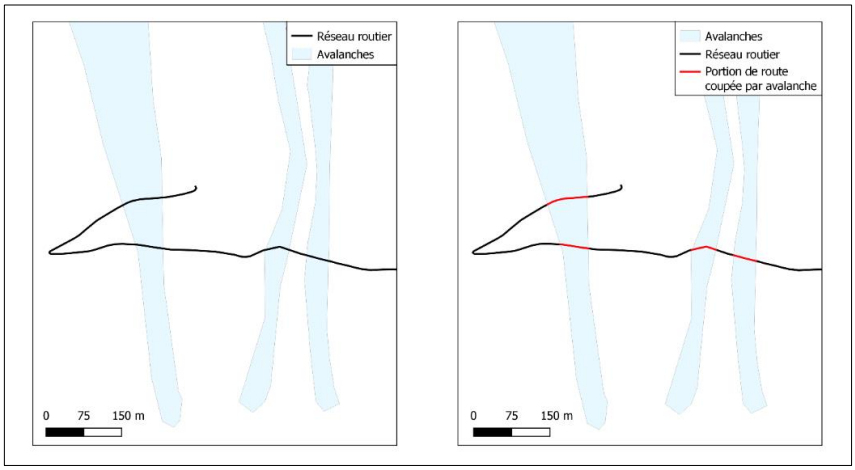


Figure 8 : exemple de l'utilité de l'outil V.clean dans le décompte des tronçons de route coupés par une avalanche

2.5.4 Quantifier l'exposition du réseau routier face aux avalanches

Dans l'optique de pousser l'analyse du réseau routier, une catégorisation du réseau routier en fonction de son exposition aux avalanches est réalisée. Le principe est le suivant : pour chaque route, on comptabilise le nombre total de coupures provoquées par avalanche, on crée un nouveau champ et lui attribue cette valeur. La figure 9 illustre la manipulation réalisée. Ce traitement permet de quantifier l'exposition du réseau routier aux avalanches.

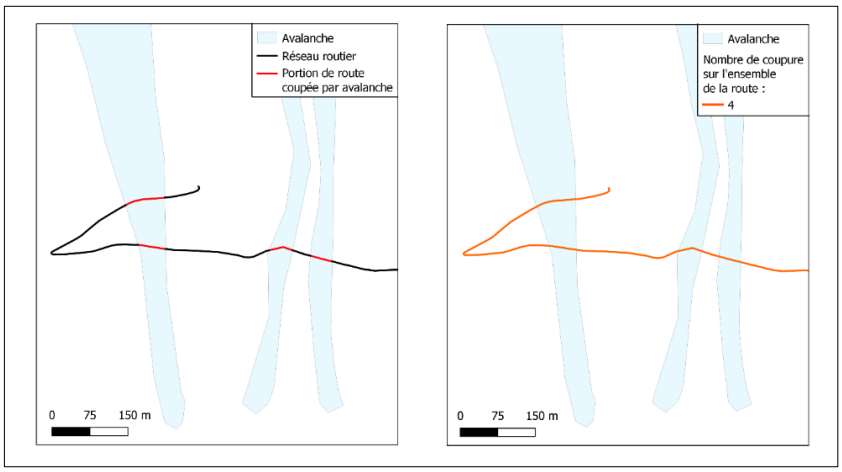


Figure 9 : exemple de traitement réalisé afin de quantifier l'exposition du réseau routier face aux avalanches

2.5.5 Réseau ferré

Pour les communes couvertes par un réseau ferré, une première étape de tri et uniformisation des données est réalisée. Seules les gares de voyageurs sont conservées, et les terminus de ligne sont catégorisés. Puis, les étapes précédentes concernant la vulnérabilité du réseau routier sont appliquées sur le réseau ferré (en suivant la même méthodologie décrite ci-dessus). En voici le diagramme d'exécution (FIGURE 10).

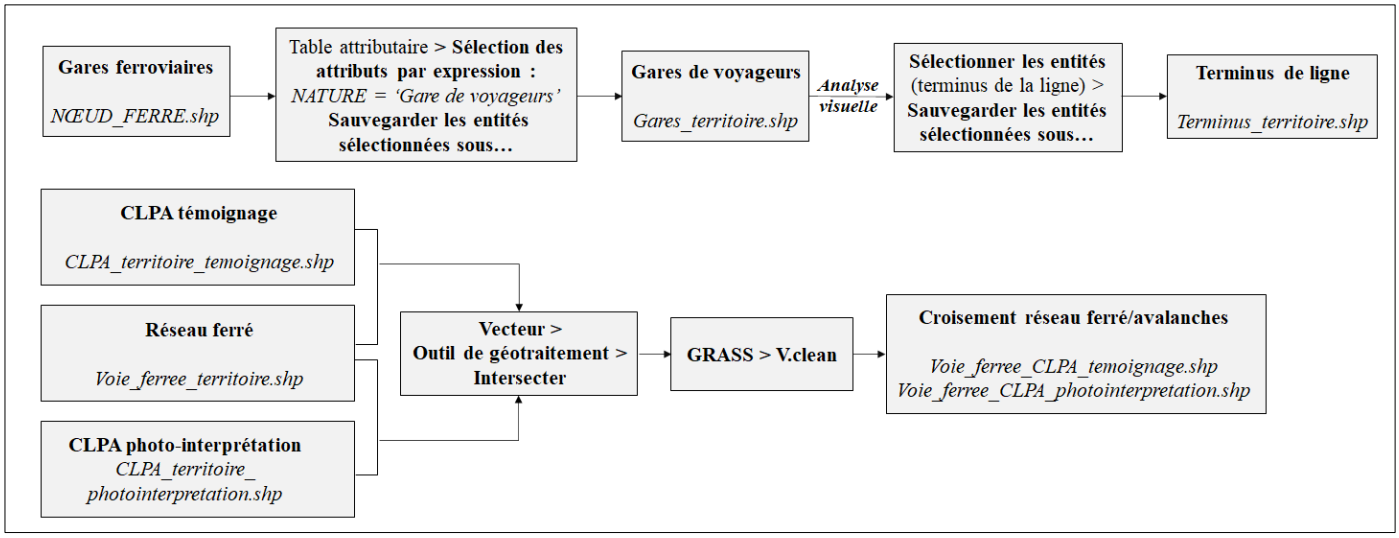


Figure 10 : diagramme d'exécution pour l'ensemble des traitements du réseau ferré

2.6 Estimation des temps d'évacuation

Au cours de cette dernière partie, nous nous sommes intéressés aux temps d'évacuation des populations. Ces derniers sont évalués dans le cas d'une évacuation horizontale. Comme mentionné plus haut, cela consiste en un déplacement d'une zone à risque vers une zone sûre. De ce fait, avant de s'intéresser aux temps d'évacuation, il est nécessaire de déterminer : les enjeux en zone à risque ainsi que les zones sûres vers lesquelles la population peut être évacuée.

2.6.1 Bâtiments exposés à l'aléa avalanche

Pour l'analyse des enjeux des territoires, nous avons fait le choix d'utiliser la donnée BATI de l'IGN, issue de la base TOPO, version 3.0. En plus d'être disponible pour l'ensemble du territoire français, cette donnée est extrêmement détaillée. La version 3.0 comporte de précieux renseignements tels que le nombre d'étage et de logement par bâtiment, c'est pourquoi le choix s'est porté vers cette donnée en particulier.

Afin de déterminer le bâti exposé aux avalanches, un croisement de données entre la couche de bâti et la couche des PPR (après traitements) est réalisé. A la suite de ce croisement, on obtient l'ensemble du bâti exposé que l'on peut catégoriser en fonction du degré d'intensité de l'aléa avalanche. La table attributaire issue du croisement nous permet de réaliser des analyses quantitatives (FIGURE 11).

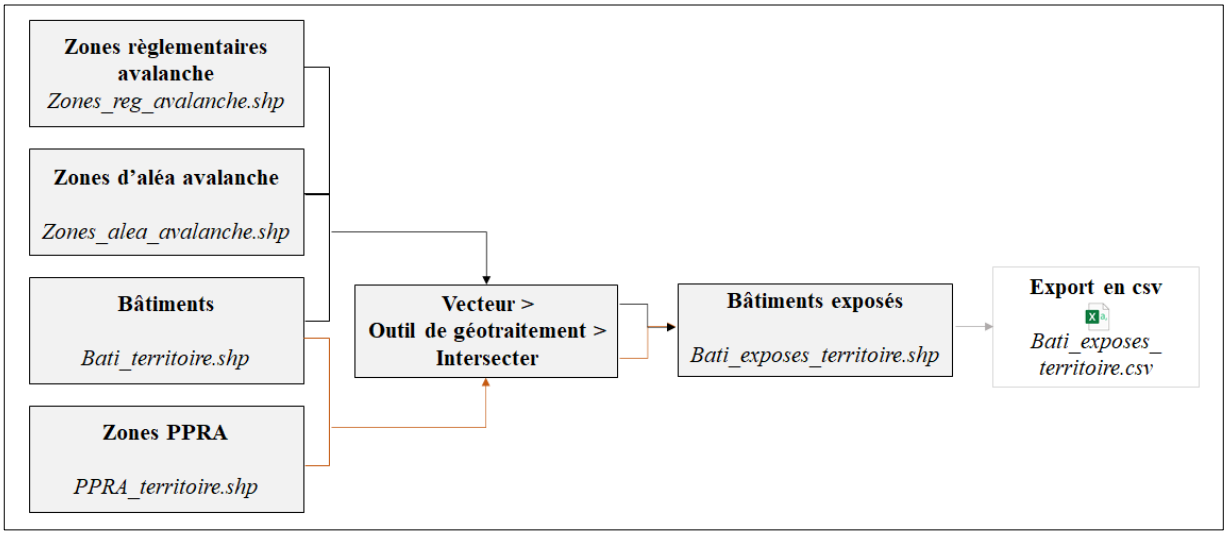


Figure 11 : diagramme d'exécution pour la détermination des bâtiments exposés à l'aléa avalanche

2.6.2 Points de rassemblement

Les zones sûres (vers lesquelles la population doit être évacuée) sont désignées comme points de rassemblement. Pour les communes qui possèdent un Plan d'Alerte Evacuation (PAE), ces différents points de rassemblement sont renseignés au sein de ce document. Cette donnée n'est généralement pas disponible au format Shape. De ce fait, il est nécessaire de digitaliser les points de rassemblement sur QGIS à l'aide d'un fond satellite et de la couche bâti. On obtient alors une couche vecteur multipoint qui représente les différents points de rassemblement du territoire.

Toutefois, la majorité des communes ne possède pas de PAE. Pour ces communes-ci, il faut se référer au PCS. Les points de rassemblement ne sont pas systématiquement mentionnés dans les PCS, car généralement, les communes prennent cette décision lors de la gestion de crise et non lors de la préparation de gestion de crise. En revanche, au sein du PCS, une partie est dédiée au recensement des différents locaux d'hébergement d'urgence disponibles pour la commune. On considèrera alors ces locaux comme points de rassemblement. Ces derniers n'étant pas digitalisés, une méthode similaire à celle expliquée plus haut est appliquée (FIGURE 12).

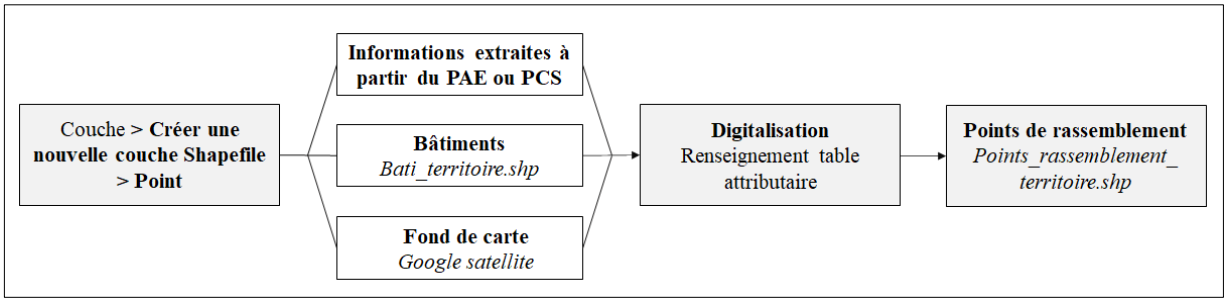


Figure 12 : diagramme d'exécution pour digitaliser les différents points de rassemblement

2.6.3 Evacuation des populations

Une fois l'ensemble des données triées, uniformisées et après quelques traitements, la partie d'estimation du temps d'évacuation des populations peut être envisagée, et pour cela, plusieurs questions se sont posées.

QGIS est un logiciel avec de nombreux plugin d'analyse de réseau ; outre l'outil d'analyse par défaut, on retrouve différents plugins, certains basés sur des services Web tels que ORS Tools ou encore TravelTime et d'autres basés sur des données de réseau comme QGIS Network Analysis Toolbox 3 (QNEAT3). Ayant à disposition la donnée ROUTE500 très complète de l'IGN, le choix s'est porté vers le plugin QNEAT3. Ce dernier propose de nombreux algorithmes d'analyse de réseau avancés, des possibilités multiples. Le plugin est relativement bien documenté (en anglais) et se prend facilement en main.

2.6.3.1 Isochrones

Le premier algorithme utilisé est Iso-Area, il permet d'effectuer des isochrones autour des points de rassemblement. Plusieurs paramètres sont à renseigner et diverses options sont possibles : la taille de l'isochrone peut être exprimée aussi bien en distance qu'en temps. Aussi, il est envisageable de paramétrer l'ensemble du réseau de sorte à ce que la vitesse, ainsi que les sens de circulation soient pris en compte.

Dans notre cas, nous avons fait le choix d'une évacuation à pied, sur la base d'une vitesse moyenne de 5km/h. Les isochrones sont exprimés en temps. Ainsi, nous obtenons une cartographie de l'ensemble des routes et zones accessibles à pied entre 5 et 30 minutes à partir des points de rassemblement.

2.6.3.2 Chemin le plus court

Le second algorithme utilisé est l'algorithme « *shortest path* » ; comme son nom l'indique, ce dernier détermine le plus court chemin entre deux points donnés et nous indique le temps nécessaire pour y parvenir (en fonction du choix des différents paramètres). Nous avons conservé les mêmes paramètres cités plus haut.

Cet algorithme a été utilisé pour les deux communes de la même façon : pour chaque bâtiment situé en zone à risque, un itinéraire d'évacuation le plus rapide est tracé. On peut ensuite fusionner l'ensemble des itinéraires d'évacuation par point de rassemblement.

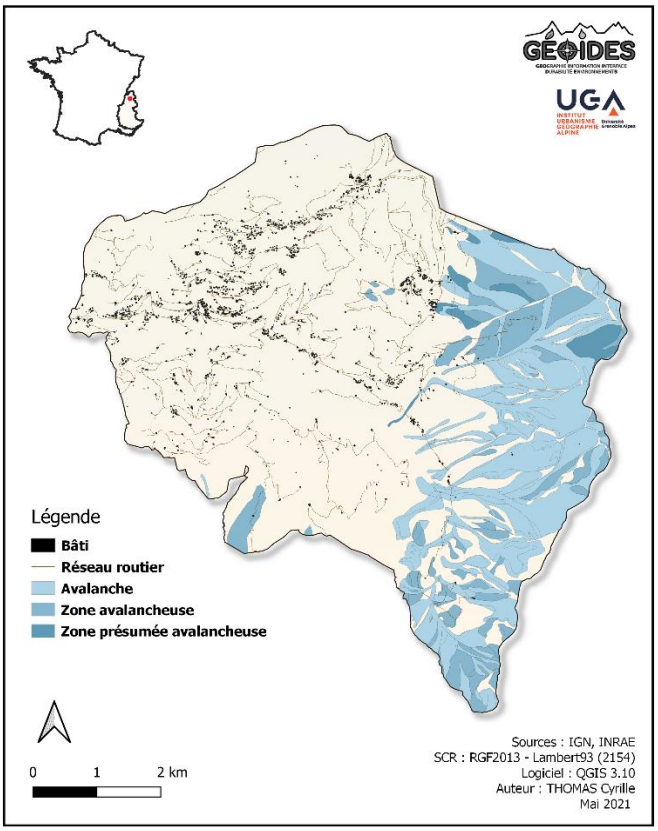
3. Résultats

Dans cette dernière partie nous nous consacrerons au développement des différents résultats obtenus jusqu'à présent. La majorité des cartes seront présentées au sein de cette partie, toutefois un atlas cartographique est présent en annexe de cette étude. Cet atlas regroupe la totalité des cartes réalisées, en grand format.

3.1 Manigod

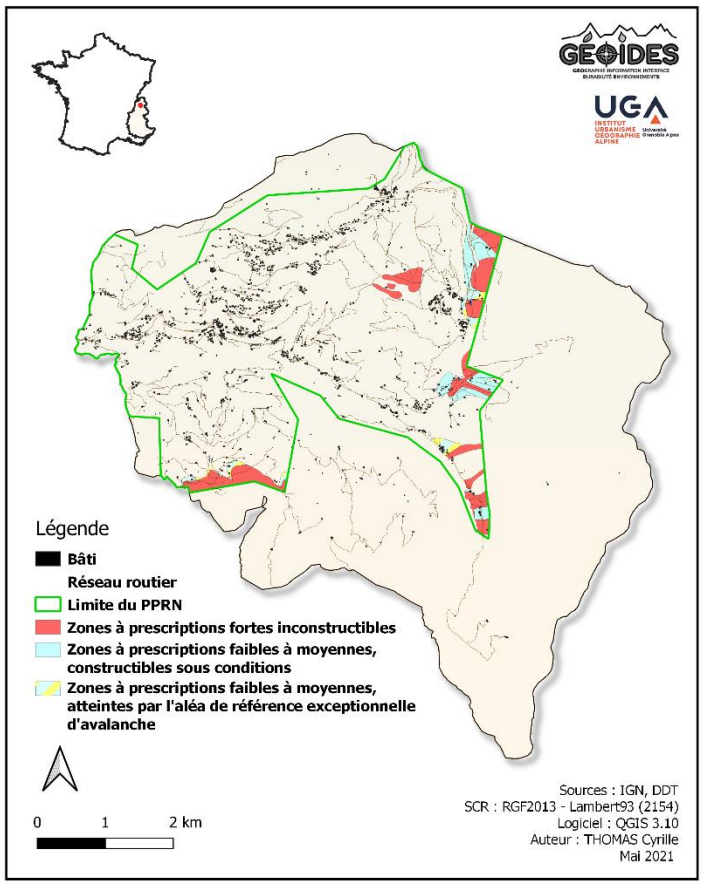
Diagnostic de l'aléa avalanche

A Manigod, les couloirs d'avalanches se situent principalement au sud ainsi qu'à l'est de la commune. Selon les données de la CLPA, témoignage et photo-interprétation, on dénombre 100 avalanches, 68 zones avalancheuses ainsi que 10 zones présumée avalancheuses (carte 1).

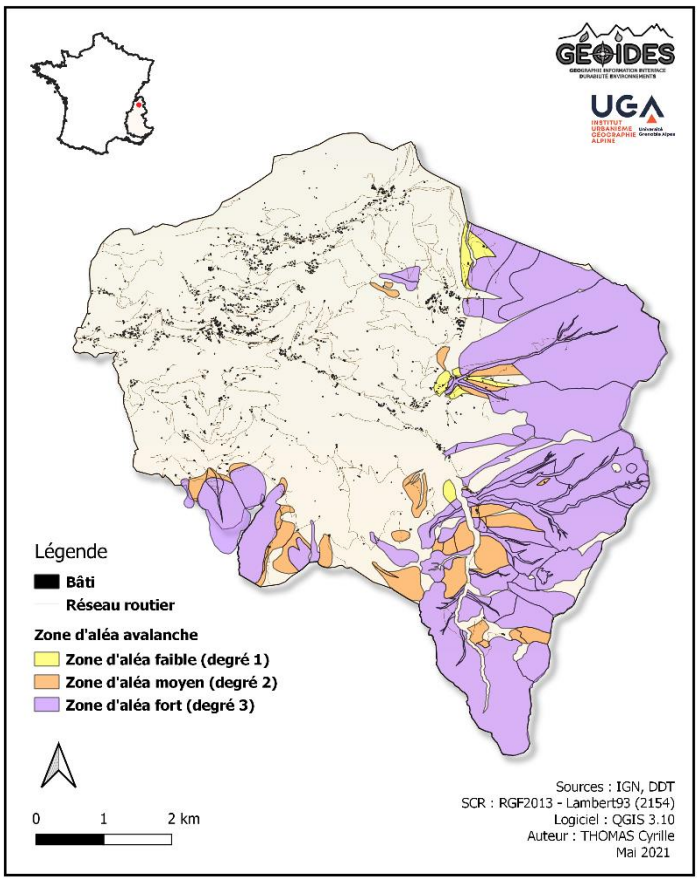


Carte 1 : Localisation des couloirs d'avalanche à Manigod

Les cartes 2 et 3 vous illustrent les zones règlementaires ainsi que les zones d'aléas, spécifiques aux avalanches. Ces données ont été extraites du PPRn multirisque de la commune. Révisé en 2019, ce PPRn intègre les « zones jaunes » avalanches.



Carte 2 : Zones règlementaires avalanches issue de PPRn de Manigod



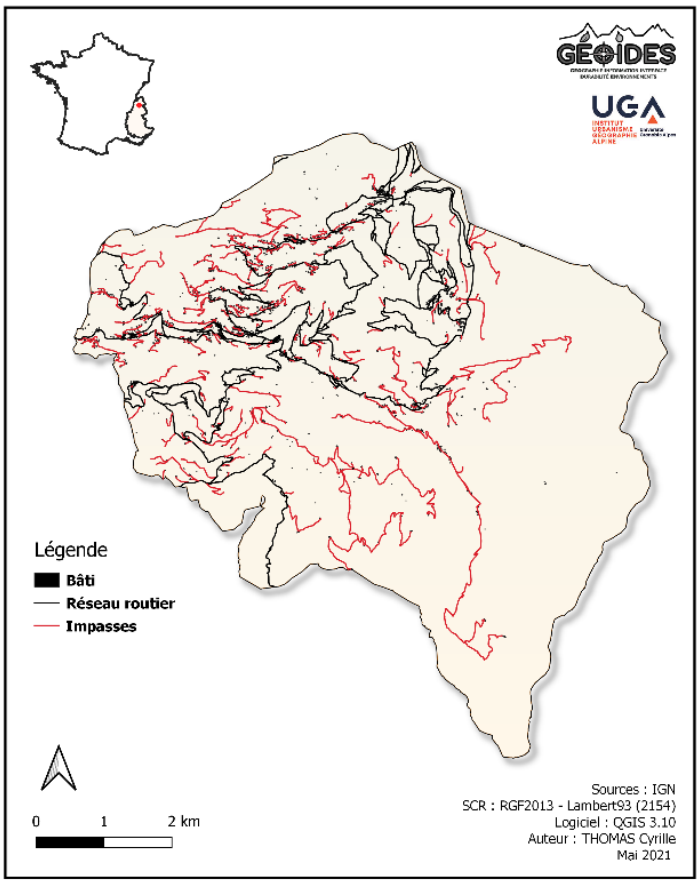
Carte 3 : Zones d'aléas avalanches issue de PPRn de Manigod

Vulnérabilité du réseau routier

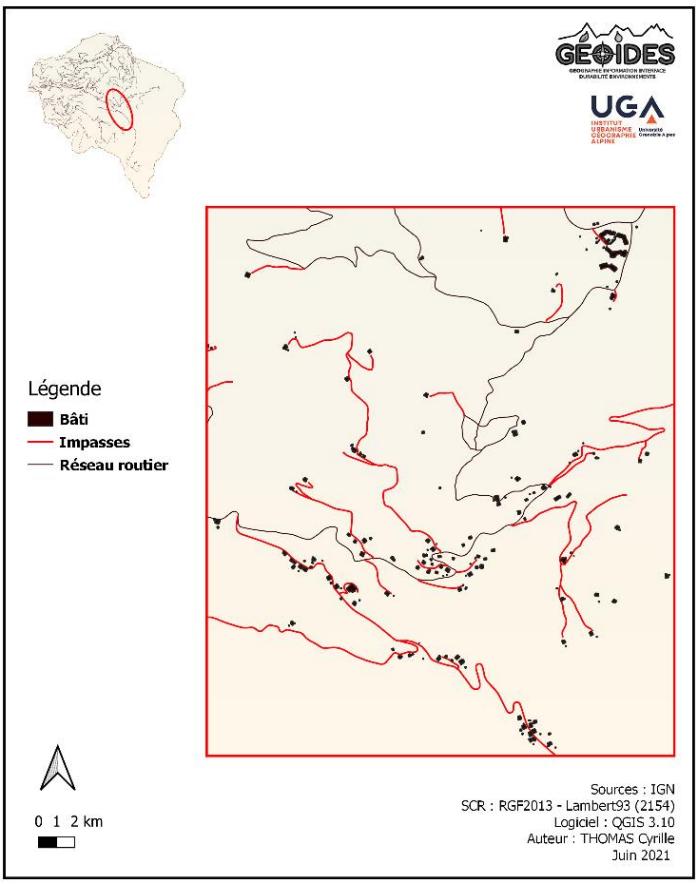
Concernant la vulnérabilité des réseaux de communication, à Manigod, seul le réseau routier a été étudié car la commune n'est pas couverte par le réseau ferré.

Le réseau routier s'étend sur 164 kilomètres, et est caractérisé par un grand nombre d'impasses (carte 4). Ces dernières représentent 50% du réseau routier, en effet, sur les 164 kms de réseau routier, 83 kms sont catégorisés comme étant des impasses.

De ce fait, en cas de coupure ou fermeture de ces routes (représentées en rouge sur les cartes), de nombreux hameaux sont sujets à l'enclavement. La carte 5 présente un des exemples de ces hameaux enclins à l'isolement.

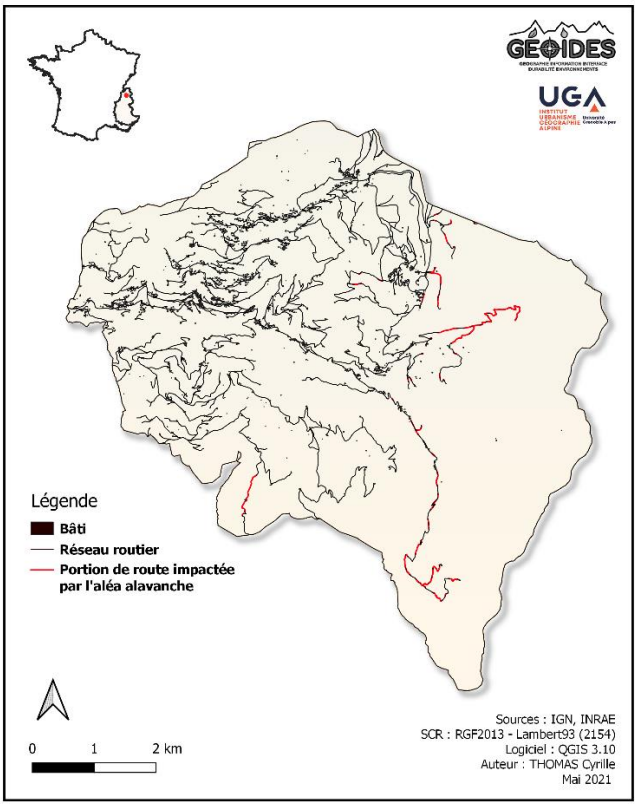


Carte 4 : Réseau routier de Manigod, caractérisé par ses nombreuses impasses



Carte 5 : Hameaux situés en fin d'impasse, sujets à l'enclavement

Après croisement du réseau routier avec les données avalanches, on obtient les différentes portions de routes touchées par l'aléa avalanche (carte 6).



Carte 6 : Portion du réseau routier à Manigod impacté par l'aléa avalanche

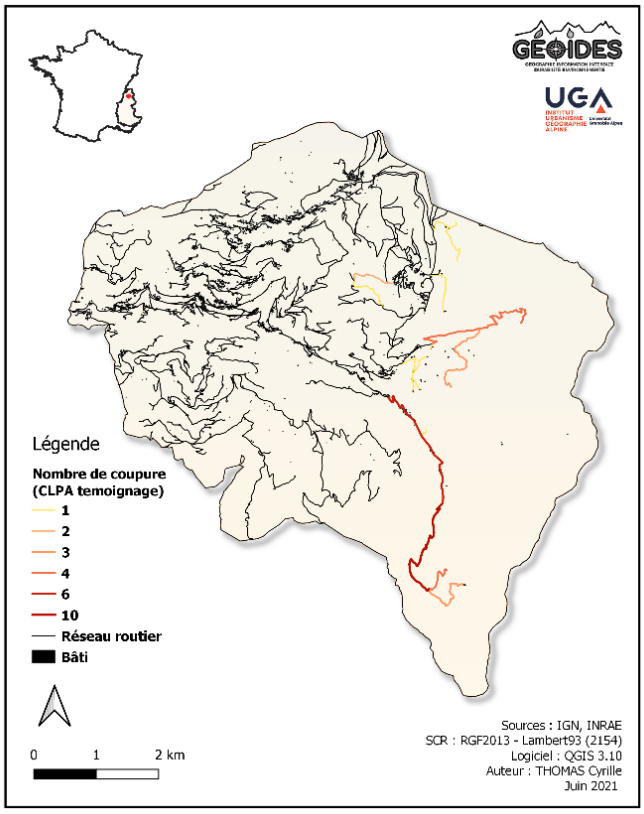
Selon les données CLPA témoignage, on dénombre 43 portions de route coupées par avalanche, représentant au total 5,7 kilomètres. Ces 43 portions de route sont toutes catégorisées comme des impasses (TABLEAU 3).

En ce qui concerne les données CLPA photo-interprétation, on recense moins de portion de route impactée (35 contre 43), en revanche la longueur du réseau routier concerné est plus importante avec 6,3 kilomètres au total. Sur les 35 portions de route, seules 4 d'entre elles ne sont pas des impasses.

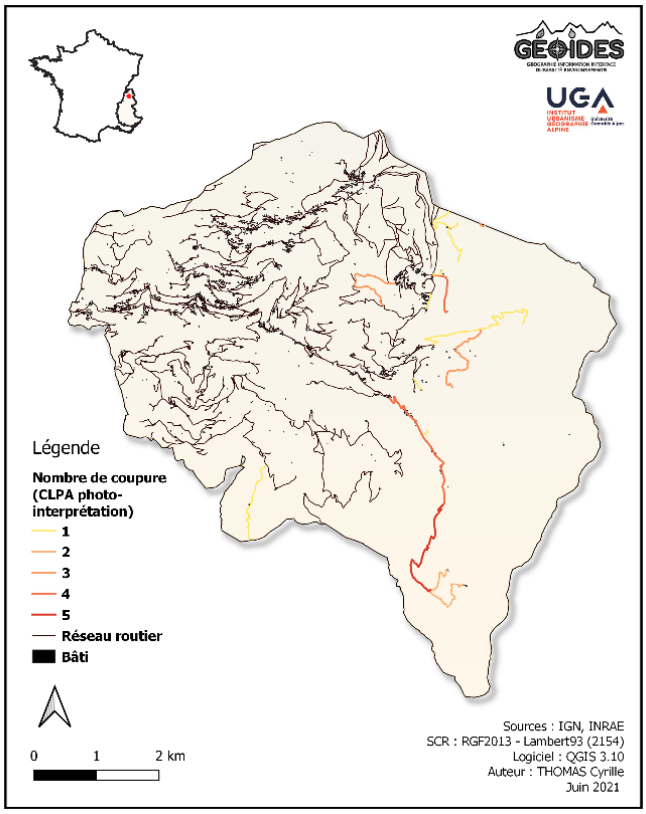
	Avalanche (par témoignage)	**Avalanche (photo-interprétation)**
Portion de route coupée	43	35
Longueur de réseau concerné	5,7 kms	6,3 kms

Tableau 3 : Longueur du réseau routier de Manigod impacté par les avalanches

Les carte 7 et 8 quantifient l'exposition des routes dans leur ensemble, face au risque avalanche. La carte 7 est réalisée avec les données CLPA par témoignage et la carte 8 avec les données CLPA par photo-interprétation.



Carte 7 : Exposition du réseau routier de Manigod face aux avalanches (CLPA témoignage)



Carte 8 : Exposition du réseau routier de Manigod face aux avalanches (CLPA photo-interprétation)

D'une manière générale, ce sont les mêmes routes qui sont impactées par l'aléa avalanche (à l'exception de trois routes). La route la plus touchée est le chemin rural de l'Aulph de Fier à la Gutary, permettant entre autres, de rejoindre les hameaux : la Gutary, la Charmette et sous l'Aiguille. A l'aide de ces deux cartes, on remarque que selon les données CLPA témoignage, le nombre de coupure est systématique plus important (ou égal) au nombre de coupure des données CLPA photo-interprétation. Cela rejoint ce que nous venons d'évoquer plus haut.

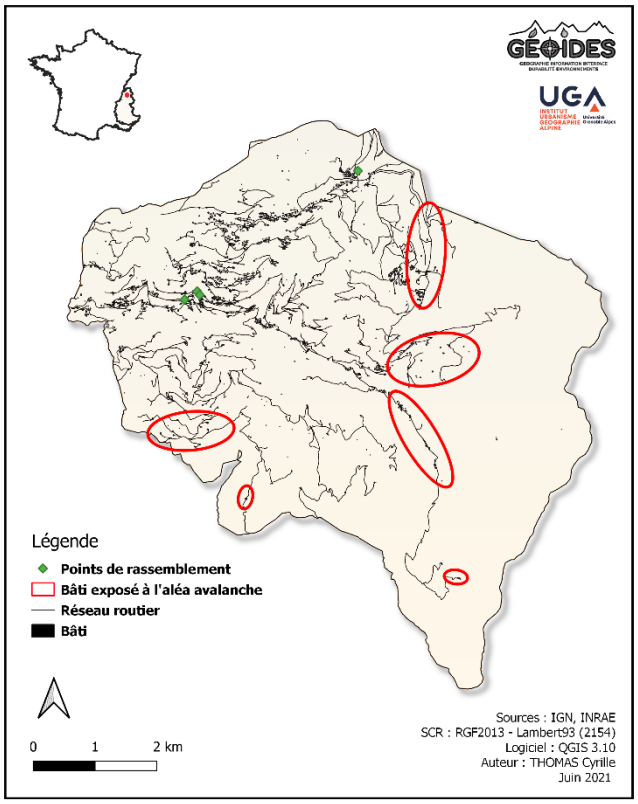
Enjeux et bâti exposés

Les zones d'enjeux à Manigod sont représentées sur la carte 9, on perçoit également les quatre locaux d'hébergement d'urgence renseignés au sein du PCS de la commune. Le bâti exposé est obtenu après croisement des données extraites du PPRn.

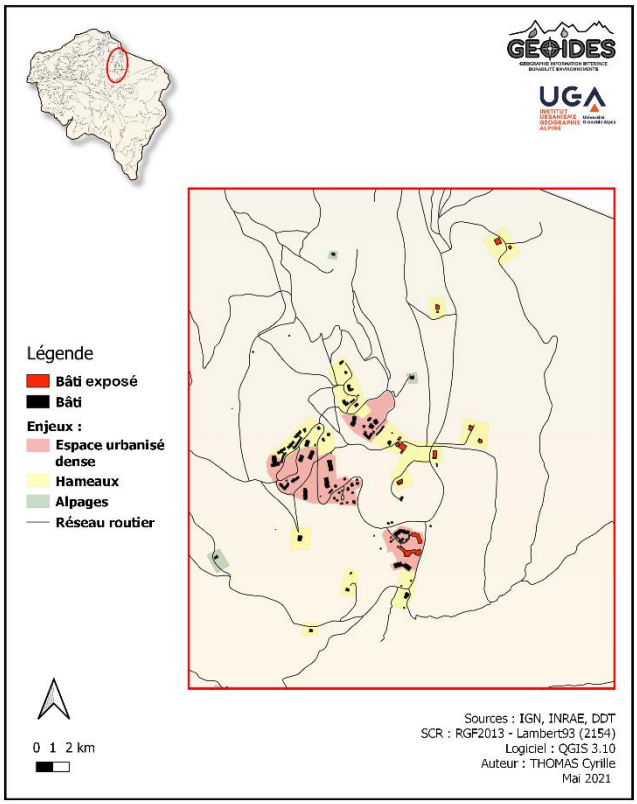
La carte 10 est réalisée dans le but de montrer que les zones d'enjeux concernent aussi bien des hameaux, que des espaces denses ou des alpages. Au total, 55 bâtiments sont exposés aux avalanches, le tableau 4 détaille les informations à propos de ces bâtiments.

	Nombre de bâti exposé	*Type de bâti*			
		4 étages et +	*3 étages*	*2 étages*	*1 étage*
Espace urbanisé	**2**	2	0	0	0
Hameaux	**40**	0	3	9	28
Alpage	**13**	0	0	0	13
Total	**55**	2	3	9	41

Tableau 4 : Nombre et type de bâti exposé aux avalanches à Manigod



Carte 9 : Localisation des différents bâtis exposés aux avalanches à Manigod

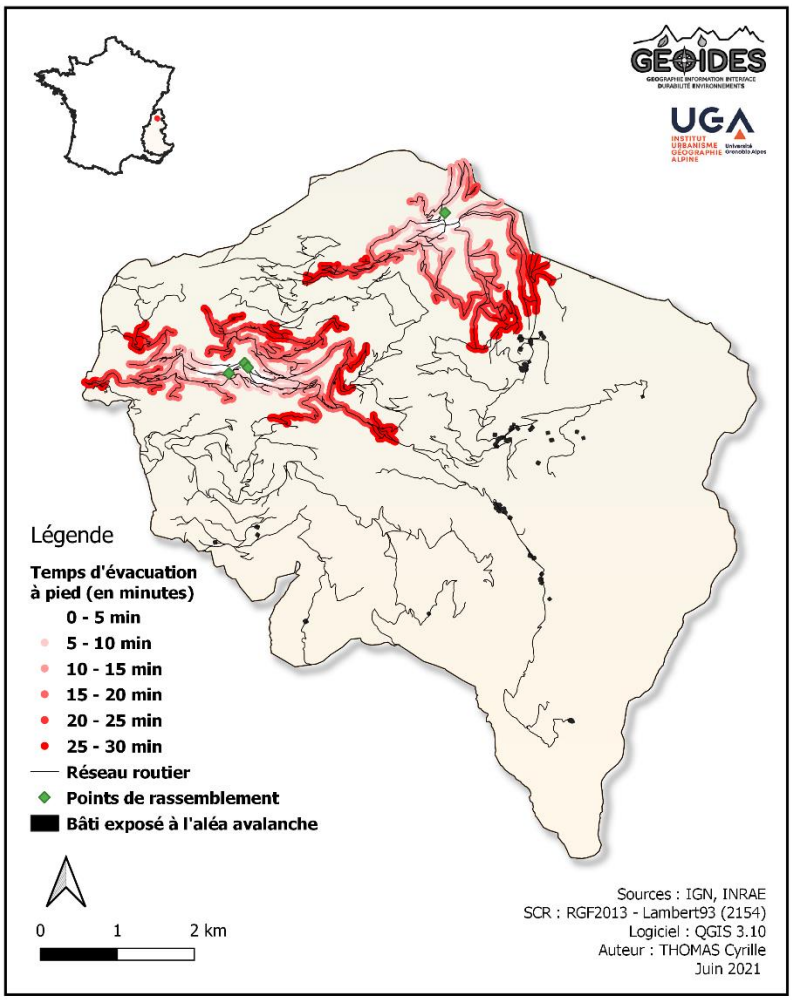


Carte 10 : Exemple d'une zone de bâtis exposés aux avalanches à Manigod

Evacuation des populations

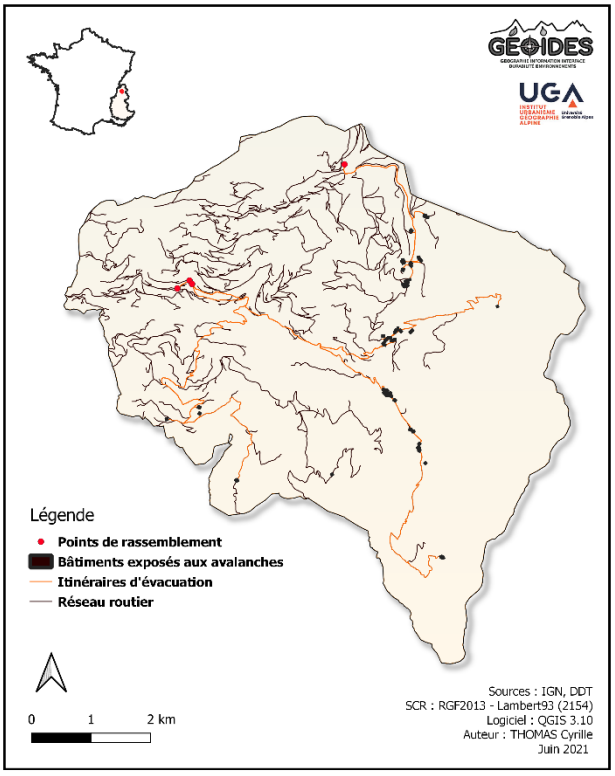
Concernant la partie des temps d'évacuation, une première simulation a été effectuée à Manigod, dans l'idée d'une évacuation à pied en se basant sur une vitesse de 5kms par heure. Pour cela, des isochrones ont été réalisés autour des quatre points de rassemblement, cela nous donne une idée des zones accessibles en 30 minutes maximum.

A partir de cette carte 11, on se rend compte que la totalité des bâtiments exposés se trouvent à bien plus de 30 minutes des points de rassemblement. De ce fait, une évacuation à pied en plein hiver sous la neige en cas d'avalanche serait difficilement envisageable.

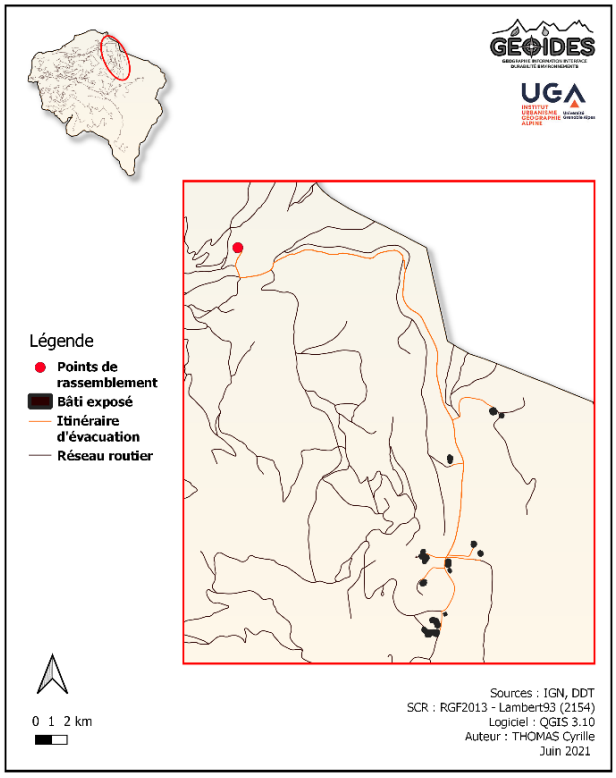


Carte 11 : Zones accessibles en 30 minutes maximum à partir des points de rassemblement de Manigod

Pour finir, à Manigod, des itinéraires d'évacuation ont été réalisés à l'aide de l'algorithme « shortest path ». Cela permet de déterminer pour chaque bâti exposé, l'itinéraire à emprunter afin de se rendre le plus rapidement possible au point de rassemblement (carte 12 et 13).



Carte 12 : Itinéraires d'évacuation à Manigod

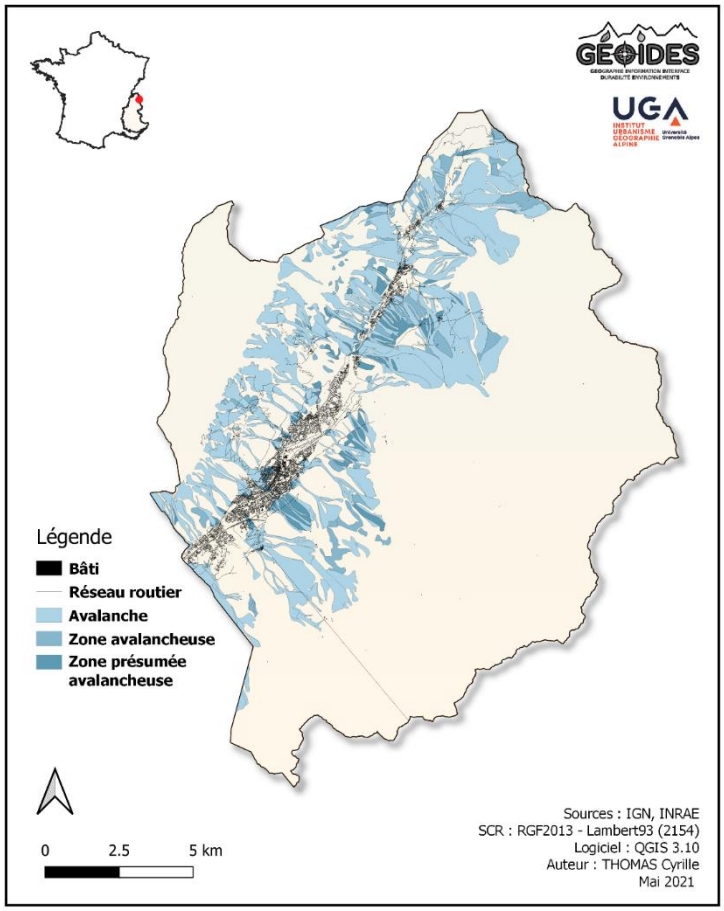


Carte 13 : Itinéraires d'évacuation à Manigod entre une zone à risque et son point de rassemblement le plus proche

3.2 Chamonix

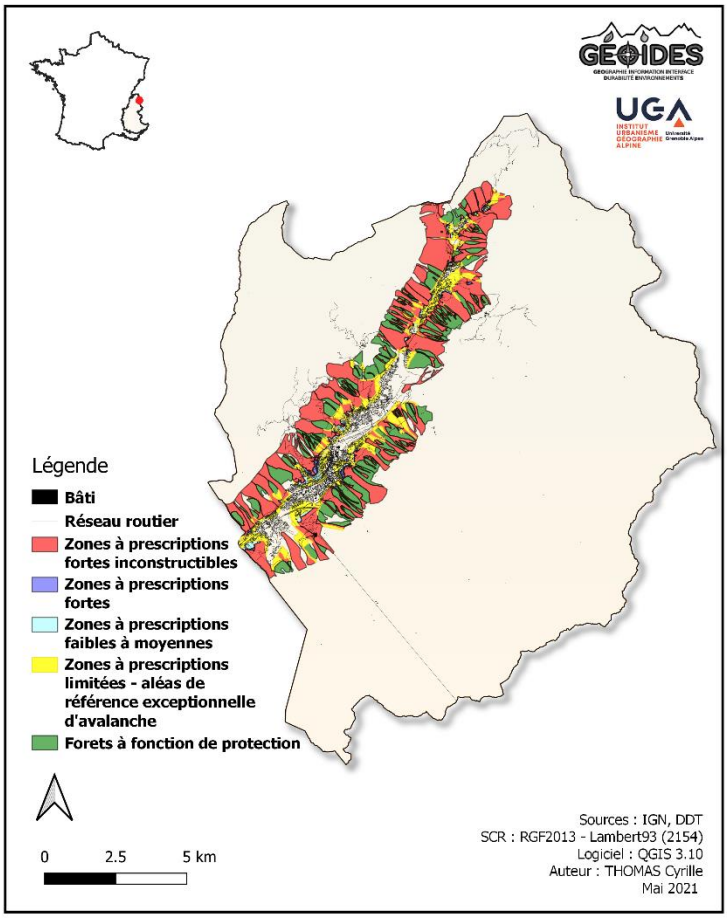
Diagnostic de l'aléa avalancheux

A Chamonix, le risque avalanche est très présent, les couloirs d'avalanches sont répartis tout le long de la commune (carte 14).

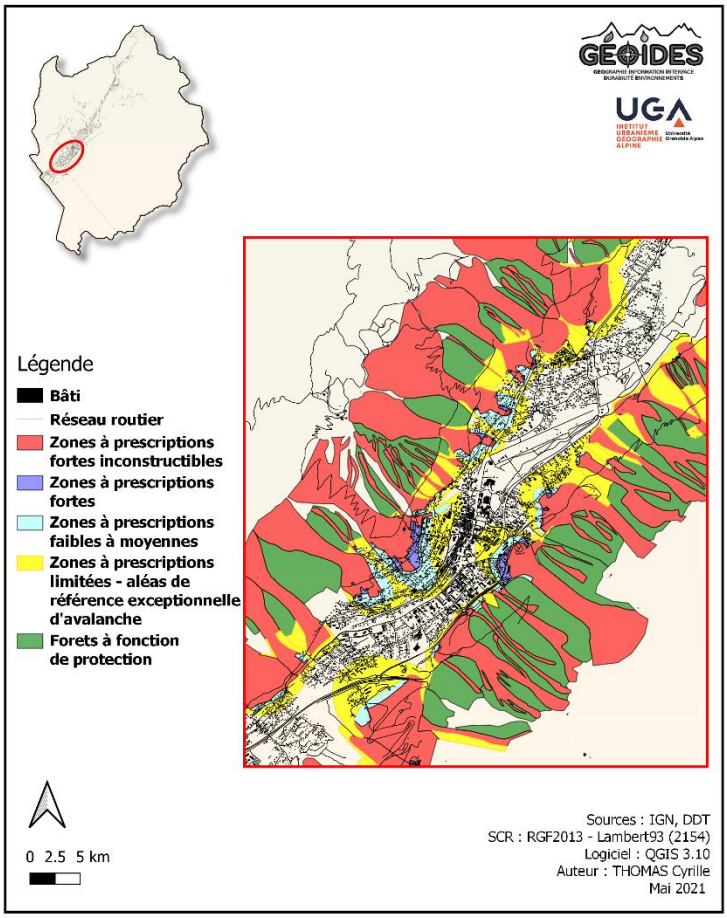


Carte 14 : Couloirs d'avalanche à Chamonix

Comme évoqué plus haut, la gestion du risque avalanche occupe une grande place au sein de cette commune. Les carte 15 et 16 illustrent le PPR spécifique aux avalanches, avec l'intégration des « zones jaunes ». On peut apercevoir sur la carte 16, les nombreux bâtis compris dans ces zones.



Carte 15 : Zones règlementaires avalanches à Chamonix



Carte 16 : Zones règlementaires avalanches dans le centre de Chamonix

Réseau ferré et exposition aux avalanches

Concernant l'étude des réseaux de communication, nous débuterons avec le réseau ferré. A Chamonix on retrouve deux lignes de chemin de fer (carte 17).

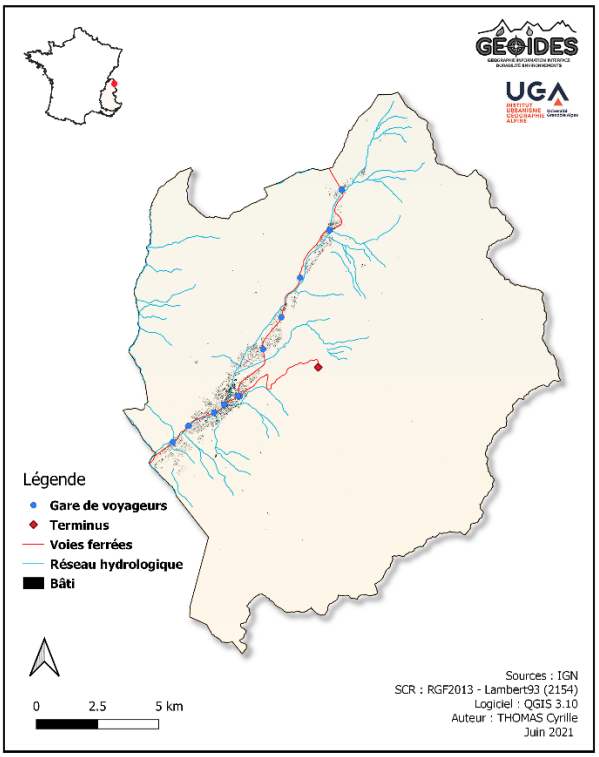
D'une part la ligne du Montenvers, un train touristique permettant d'accéder au Montenvers : un point de vue sur la mer de Glace ainsi qu'un accès à la grotte de glace ; c'est une ligne à sens unique, une impasse.

D'autre part, la ligne de Saint-Gervais-les-Bains-Le Fayet à Vallorcine frontière, traversant en long la commune de Chamonix. Plusieurs gares de voyageurs se trouvent sur cette ligne.

Le réseau ferré est dans son ensemble, bien exposé aux avalanches. Concernant la ligne principale, les données CLPA témoignage dénombre 29 portions de voie ferrée impactées par les avalanches, contre 16 pour les données CLPA par photo-interprétation. Au total, ces portions représentent respectivement 2,7 kilomètres et 1,5 kilomètre du réseau ferré. La ligne de Montenvers est elle aussi impactée par les avalanches, on comptabilise 13 à 16 coupures pour une longueur totale d'1,2 à 2,2 kilomètres (TABLEAU 5). Compte tenu de la longueur totale des deux lignes (16 kms pour la principale et 5 kms pour la ligne touristique), le train menant à Montenvers présente une exposition importante à l'aléa avalanche.

	CLPA témoignage		CLPA photo-interprétation		Longueur totale du réseau ferré
	Tronçons de voie ferrée coupés	Longueur de réseau concerné	Tronçons de voie ferrée coupés	Longueur de réseau concerné	
Ligne principale	**29**	**2,7 kms**	**16**	**1,5 kms**	**16 kms**
Ligne Montenvers	**16**	**2,2 kms**	**13**	**1,2 kms**	**5 kms**

Tableau 5 : longueur de réseau ferré exposé à l'aléa avalanche

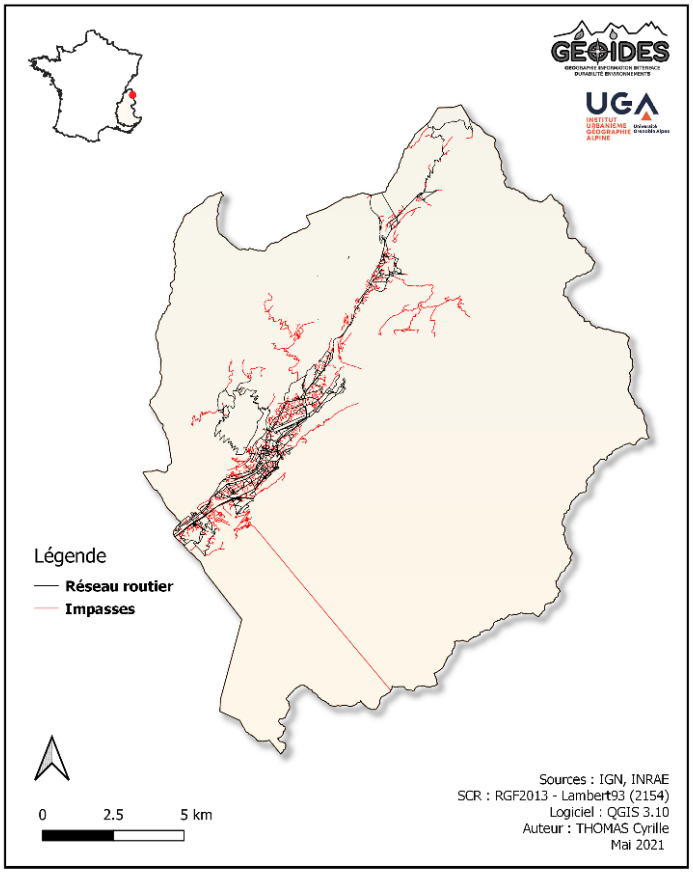


Carte 17 : réseau ferré à Chamonix

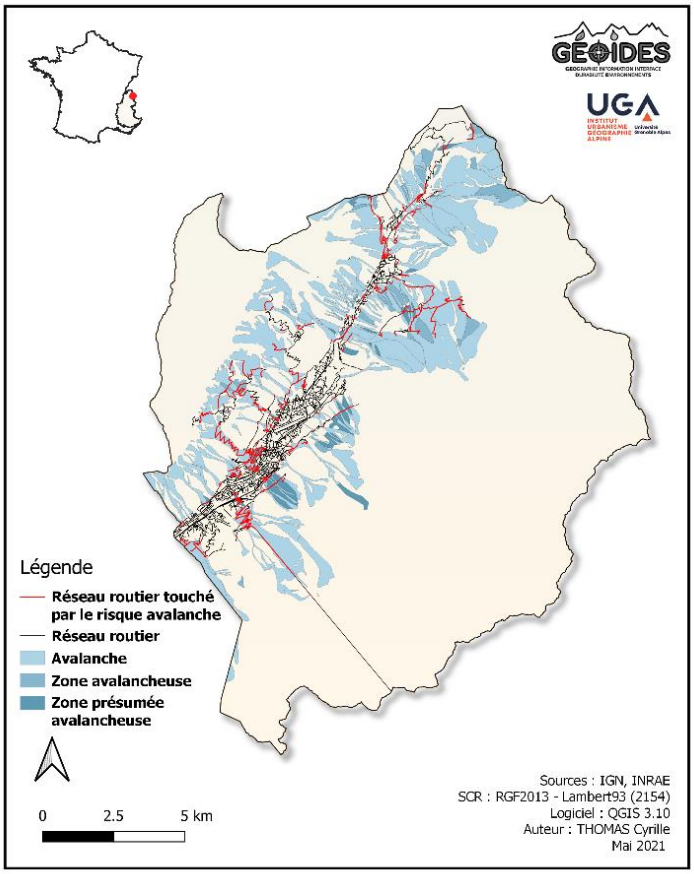
Vulnérabilité du réseau routier

Concernant le réseau routier à Chamonix, ce dernier s'étend sur plus de 305 kilomètres. Comme pour Manigod, la commune de Chamonix est caractérisée par un nombre important d'impasses (carte 18). On comptabilise près de 135 kilomètres d'impasses, soit 44% du réseau routier.

La carte 19 présente l'exposition du réseau routier face à l'aléa avalancheux. Selon les données CLPA témoignage, ce sont au total 73 kilomètres de réseau routier exposés aux avalanches, dont 41 kilomètres catégorisés comme étant des impasses. Concernant les données par photo-interprétation : 44 kilomètres de réseau routier exposés dont 25 kilomètres sont des impasses. Si ces chiffres diffèrent entre les deux jeux de données, la tendance reste la même, sur l'ensemble du réseau routier exposé à l'aléa avalancheux, 56% sont des impasses.



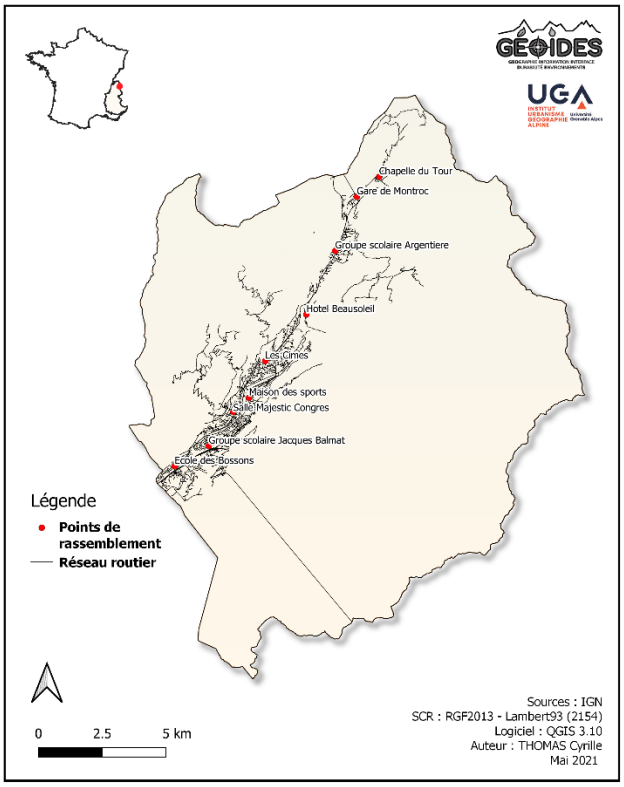
Carte 18 : Réseau routier de Chamonix



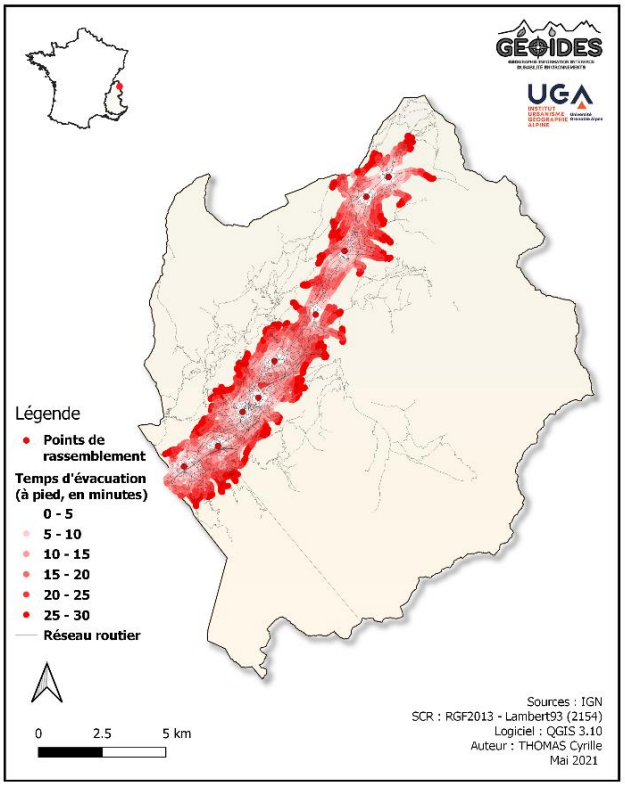
Carte 19 : Réseau routier exposé aux avalanches

Evacuation des populations

A Chamonix, les 9 points de rassemblement (carte 20) sont extraits du PAE, et sont répartis tout au long de la commune. Au sein du PAE, pour chaque zone à risque, un point de rassemblement lui est attribué. En revanche les temps d'évacuation ne sont pas indiqués, c'est pourquoi, des isochrones ont été réalisés autour des points de rassemblement (la même méthode que celle appliquée à Manigod) afin d'avoir une estimation de temps d'évacuation (carte 21). Contrairement à Manigod, ici, la totalité des bâtiments exposés à l'aléa avalanche sont situés dans un rayon de 30 minutes maximum des points de rassemblement.

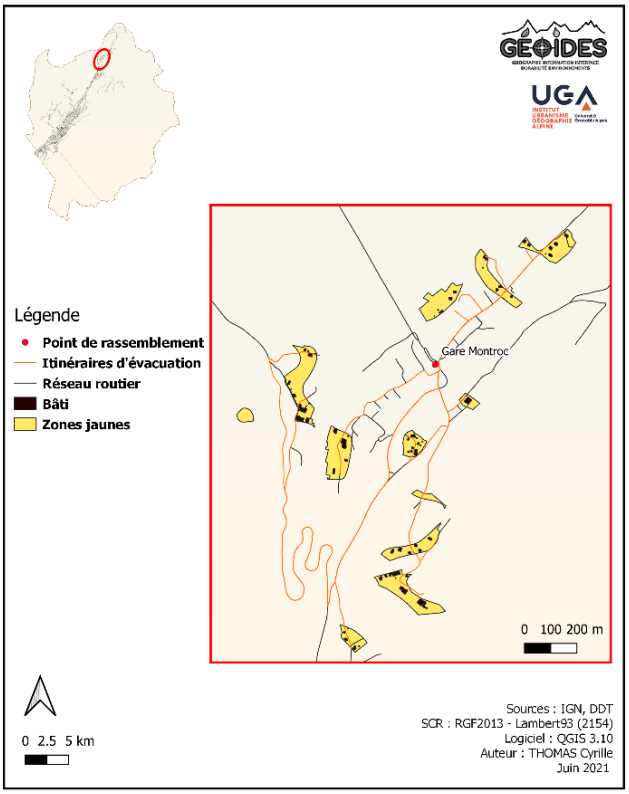


Carte 20 : Points de rassemblement à Chamonix

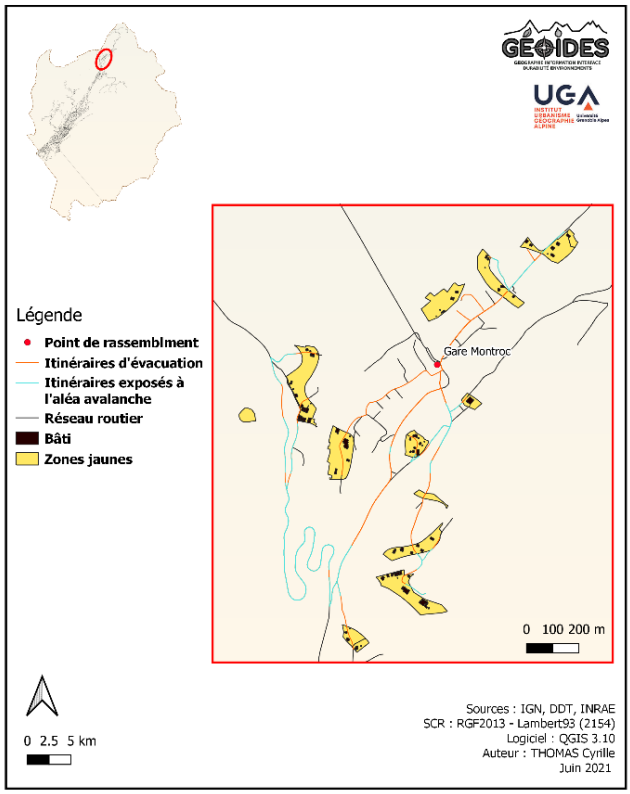


Carte 21 : Zones accessibles à partir des points de rassemblement, en 30 minutes maximum à Chamonix

Comme pour Manigod, les itinéraires d'évacuation sont créés à l'aide de l'algorithme « shortest path » : pour chaque bâtiment situé en zone jaune, le chemin le plus court entre ce dernier et le point de rassemblement est tracé (carte 22). Par la suite, ces itinéraires sont croisés avec les données CLPA (carte 23). L'objectif de cette manipulation est de déterminer si le chemin le plus rapide est également le chemin le plus sûr.



Carte 22 : Itinéraires d'évacuation des bâtis en zones jaunes vers le point de rassemblement



Carte 23 : Itinéraires d'évacuation exposés aux avalanches

Avec le plugin QNEAT3, il est possible de demander à l'algorithme « shortest path » de trouver l'itinéraire le plus rapide en évitant les zones avalancheuses (les données CLPA). De ce fait, un nouvel itinéraire est tracé. Cependant, dans certains cas, ce nouvel itinéraire s'avère être trop long trop pour être envisagé. Dans d'autres cas, l'itinéraire est impossible, en particulier pour des hameaux situés en impasse. Dans ces cas-là, ces bâtiments peuvent être isolés et la question d'une évacuation verticale peut alors se poser.

Conclusion

Pour conclure, cette étude a permis d'exploiter les possibilités des SIG dans le cadre de la gestion du risque avalanche. Même si ce travail n'est pas terminé et vise à être poursuivi, les premiers résultats montrent un réel intérêt pour l'intégration des SIG dans la préparation de la gestion de crise du risque avalanche.

Afin de rendre cette intégration la plus simple possible, une grande importance a été accordée au développement d'une méthodologie détaillée. Chaque traitement est explicité et illustré par les diagrammes d'exécution. La construction d'un guide méthodologique permettra aux territoires intéressés d'intégrer facilement les SIG dans la planification du risque avalanche.

L'objectif étant de s'intéresser à l'évacuation des populations, cela ne pouvait se faire sans l'étude du risque avalanche ni sans l'étude de la vulnérabilité des réseaux de communication. Au final, trois thématiques ont été étudiées et se révèlent complémentaires.

L'étude de deux territoires bien différents permet de tirer quelques conclusions. D'une part, il semble possible de mettre en place une méthodologie commune à tout territoire, même si cette dernière demande parfois quelques ajustements. D'autre part les SIG interviennent différemment en fonction des besoins et objectifs des communes. Par exemple, à Chamonix, même si la commune possède un PAE, les temps d'évacuation des populations n'étaient pas abordés. A Manigod, les SIG permettent une première approche dans l'élaboration d'un plan d'évacuation.

Toutefois, certaines limites peuvent être évoquées : l'utilisation des SIG requière des données. La phase de récolte des données demande du temps, et dans certains cas, les données se révèlent être inaccessibles ou inexistantes pour des territoires. Aussi, une certaine critique des résultats doit être prise en compte. En particulier pour les temps d'évacuation, ils sont donnés à titre indicatif mais ne reflètent pas la réalité. En effet, si l'algorithme prend en compte la vitesse indiquée, plusieurs choses ne sont pas intégrées dans le calcul comme par exemple le nombre de personnes, leur santé physique, le temps d'évacuation entre le logement et la route, la météo ou encore l'heure d'évacuation. Tout un ensemble de facteurs susceptibles d'augmenter ces temps d'évacuation.

Enfin, pour ce qui est des poursuites de travail, les possibilités sont multiples. Dans un premier temps, l'évacuation verticale sera étudiée pour les deux communes. Aussi, une estimation du nombre maximal de personnes par bâtiment pourrait être très intéressante à la fois pour comparer ces données avec les capacités maximales des locaux d'hébergement mais également dans l'optique d'étudier l'évacuation verticale. A Manigod il serait intéressant de développer une analyse multicritère permettant de trouver des points de rassemblement ou locaux d'hébergement plus proches que ceux indiqués au sein du PCS. D'autres scenarios d'évacuation pourraient être développés pour les deux communes comme par exemple une évacuation en voiture.

Bibliographie

Cassayre, Yves. « Avalanche de Taconnaz. Travaux de protection et cartographie d'urbanisme ». *Revue de Géographie Alpine* 86, n° 2 (1998): 115-17. https://doi.org/10.3406/rga.1998.4623.

Daudé, Eric, Kevin Chapuis, Patrick Taillandier, Pierrick Tranouez, Clément Caron, Alexis Drogoul, Benoit Gaudou, Sebastien Rey-Coyrehourq, Arnaud Saval, et Jean-Daniel Zucker. « ESCAPE: Exploring by Simulation Cities Awareness on Population Evacuation ». In *ISCRAM*. Valencia, Spain, 2019. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02130387.

Demoraes, Florent. « 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*, 31 mars 2009. https://doi.org/10.4000/cybergeo.22101.

Fujiki, Kenji, et Mélanie Laleau. « Une approche géographique pour spatialiser les besoins en hébergements d'urgence en situation de crise : une étude appliquée au cas d'une évacuation massive provoquée par une crue majeure de la seine en région francilienne ». *La Houille Blanche*, n° 3-4 (1 octobre 2019): 75-83. https://doi.org/10.1051/lhb/2019043.

Gasparotto, Thomas. « Modélisation de l'évacuation des personnes en situation d'incendie ». Phdthesis, Université de Lorraine, 2018. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01896773.

Gourmelon, Françoise. « La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral ». Thesis, Université de Bretagne occidentale - Brest, 2003. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00321106.

IGN. « BD TOPO Version 3.0 - Descriptif de contenu », avril 2021, 378.

Jolly, Patricia. « Les avalanches en zone habitée menacent toujours ». *Le Monde.fr*, 11 février 2019. https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/02/11/les-avalanches-en-zone-habitee-menacent-toujours_5422098_3244.html.

Le Gallou, Jean-Yves, et Philippe Guignard. « Modalités de prise en compte des avalanches exceptionnelles pour améliorer la prévention des risques et renforcer la sécurité des personnes », avril 2011. https://escape.cnrs.fr/.

Leone, Frédéric, Albert Colas, Yann Garcin, Nicolas Eckert, Vincent Jomelli, et Monique Gherardi. « Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français. Évaluation des impacts et cartographie de la perte d'accessibilité territoriale ». *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, n° 102-4 (26 mars 2014). https://doi.org/10.4000/rga.2491.

Palumbo, Sergio. « Chamonix et le Massif du Mont-Blanc », 20 octobre 2014. https://123savoie.com/chamonix-mont-blanc/.

Schläppy, Romain, Vincent Jomelli, Delphine Grancher, Markus Stoffel, Christophe Corona, Daniel Brunstein, Nicolas Eckert, et Michael Deschatres. « A New Tree-Ring-Based, Semi-Quantitative Approach for the Determination of Snow Avalanche Events: use of Classification Trees for

Validation ». *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 45, n° 3 (1 août 2013): 383-95. https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.3.383.

SDES. « Risques climatiques : six Français sur dix sont d'ores et déjà concernés », janvier 2020, 4.

Tchioffo, Gael. « Conception et réalisation d'une application de webmapping d'analyse territoriale sur des SIG et bases de données open source : cas du territoire camerounais ». *Memoire Online*, 2008. https://www.memoireonline.com/02/10/3158/m_Conception-et-realisation-dune-application-de-webmapping-danalyse-territoriale-sur-des-SIG-et-bas6.html.

Tifine, Pierre. « Les dispositifs juridiques de prévention des risques majeurs naturels en France ». *Revue Géographique de l'Est* 53, n° vol. 53 / 1-2 (31 août 2013). https://doi.org/10.4000/rge.4567.

Tisné, Mathieu. « La gestion du risque avalanche dans la vallée de Chamonix », 3 janvier 2019, 3.

Trémélo, Marie-Laure, Leca De Biaggi, Université Jean Moulin Lyon, Olivier Chareire, Université Jean Moulin Lyon, Jacques Comby, Université Jean Moulin Lyon, et Philippe Tran. « Apport de la géomatique à l'analyse des risques Application aux départs de feux de forêts dans le Var », 2005, 45.

Sitographie

http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr

https://www.anena.org

https://www.avalanches.fr

https://www.catnat.net

https://www.cc-valleedechamonixmontblanc.fr

https://www.cerema.fr

https://www.chamonix.fr

https://www.data.gouv.fr

http://www.donnees.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr

https://www.ecologie.gouv.fr/avalanches

https://www.geoportail.gouv.fr/

https://geoservices.ign.fr/

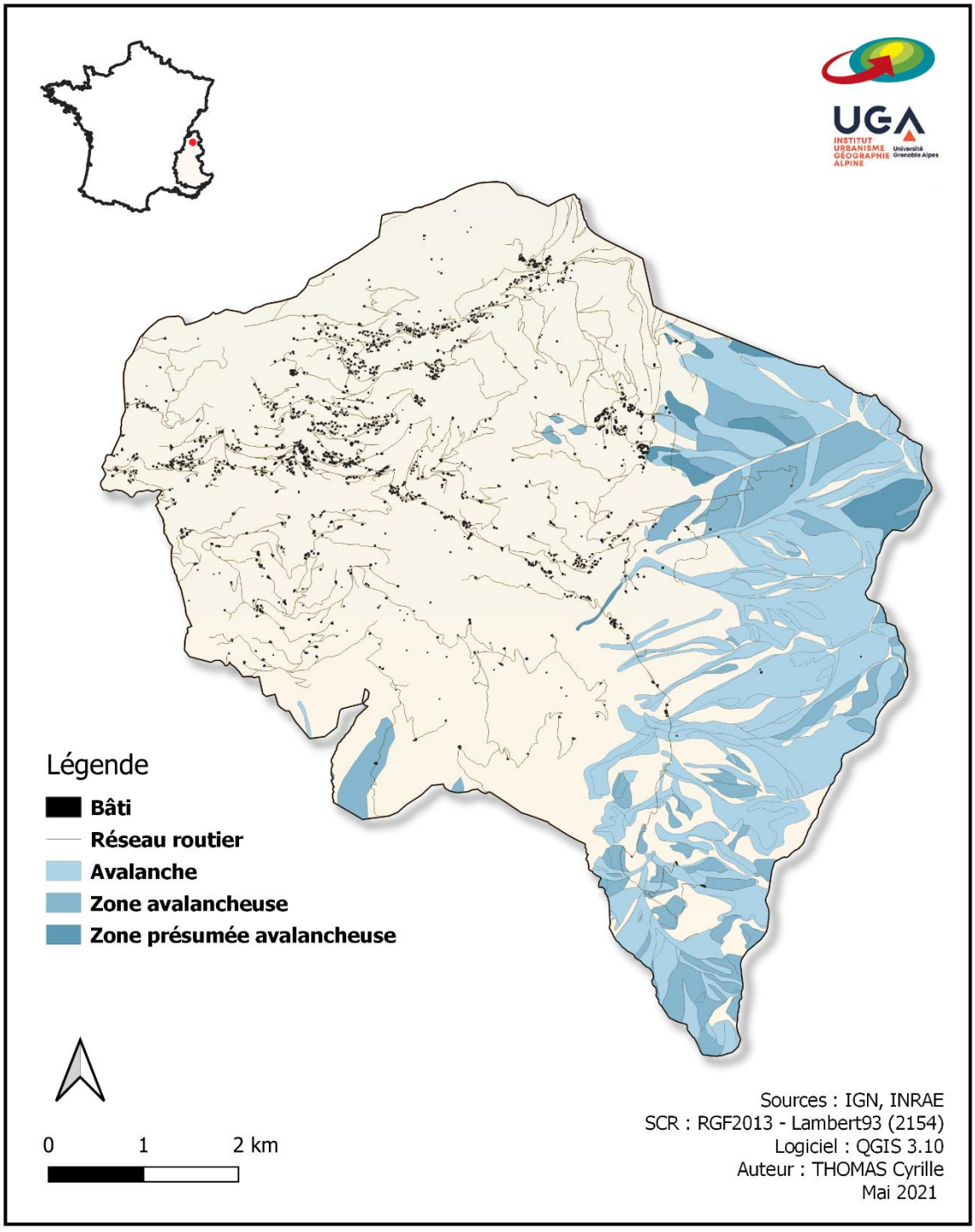
https://www.haute-savoie.gouv.fr

http://www.irma-grenoble.com

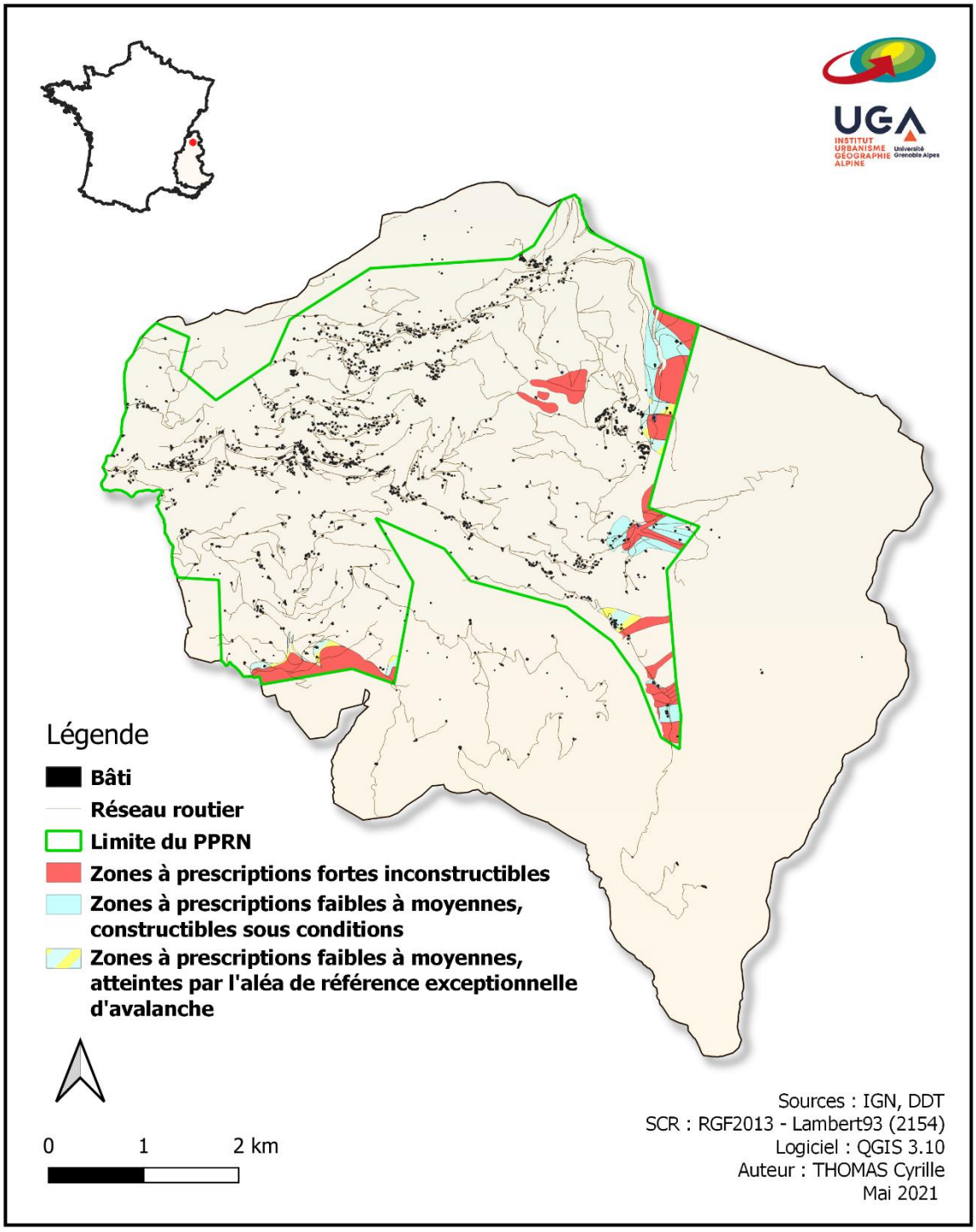
Atlas cartographique

Evacuation des populations face au risque avalanche
Exemple de Manigod et Chamonix

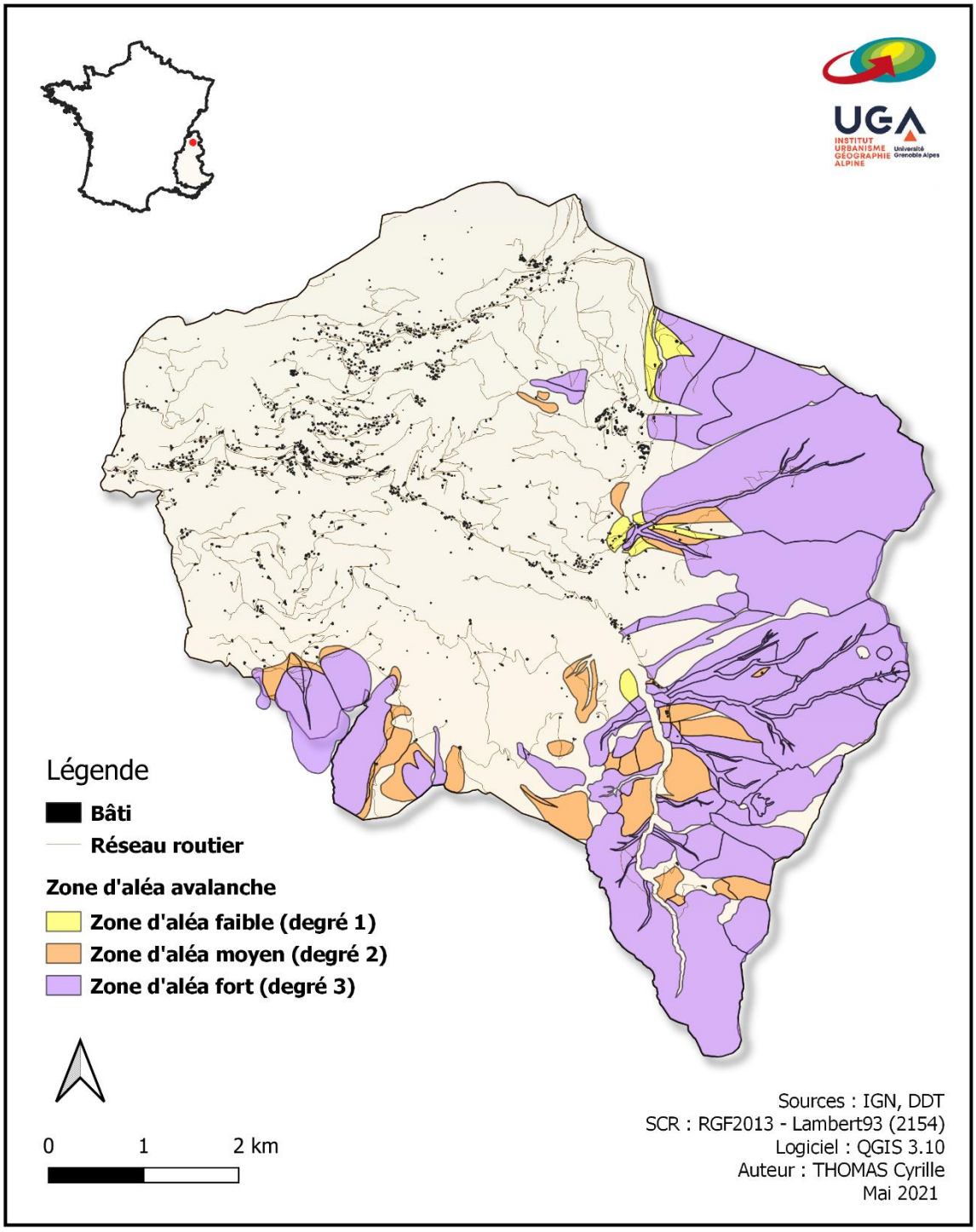
Carte 1 : Zones avalancheuses à Manigod



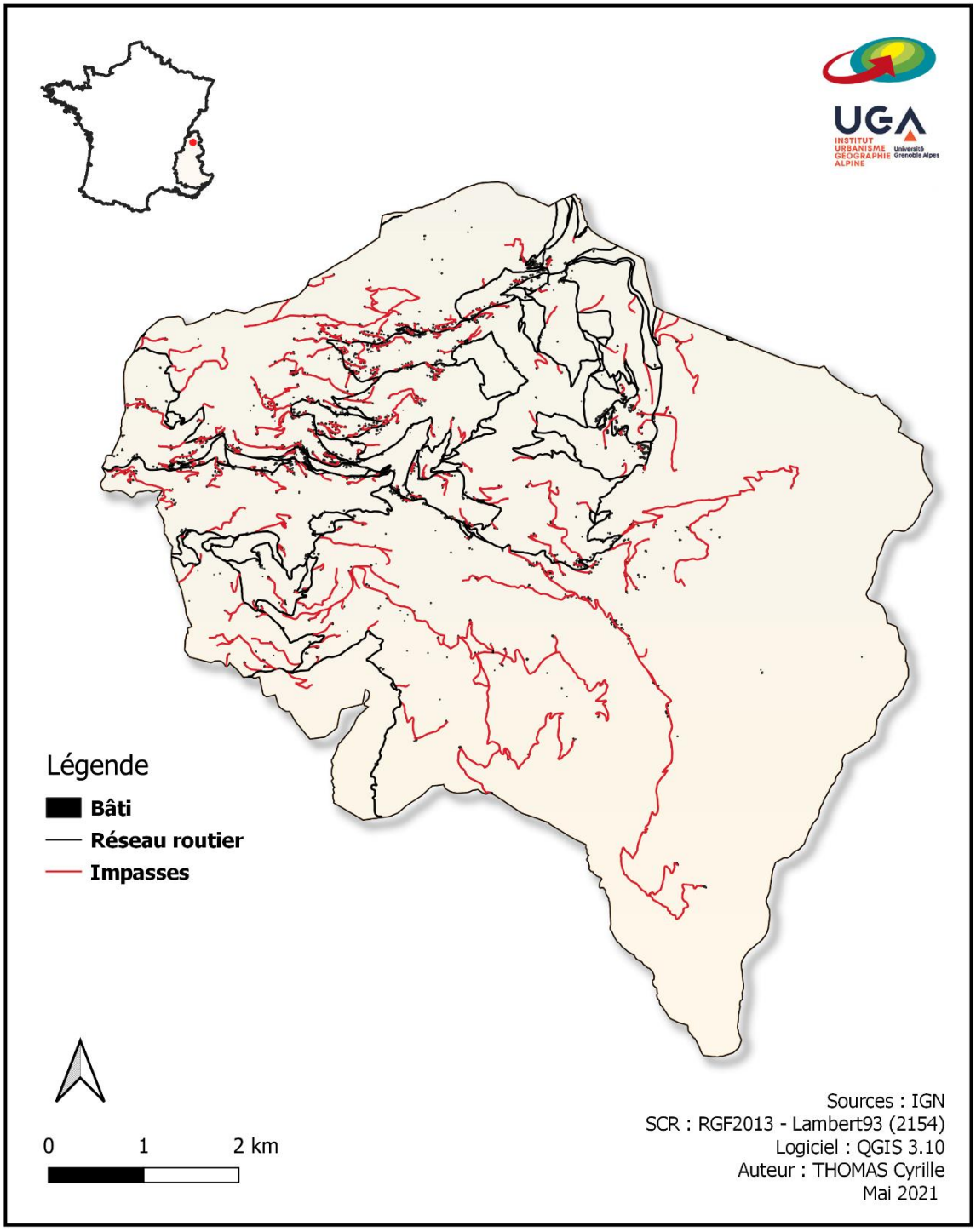
Carte 2 : Zones règlementaires concernant l'aléa avalanche à Manigod



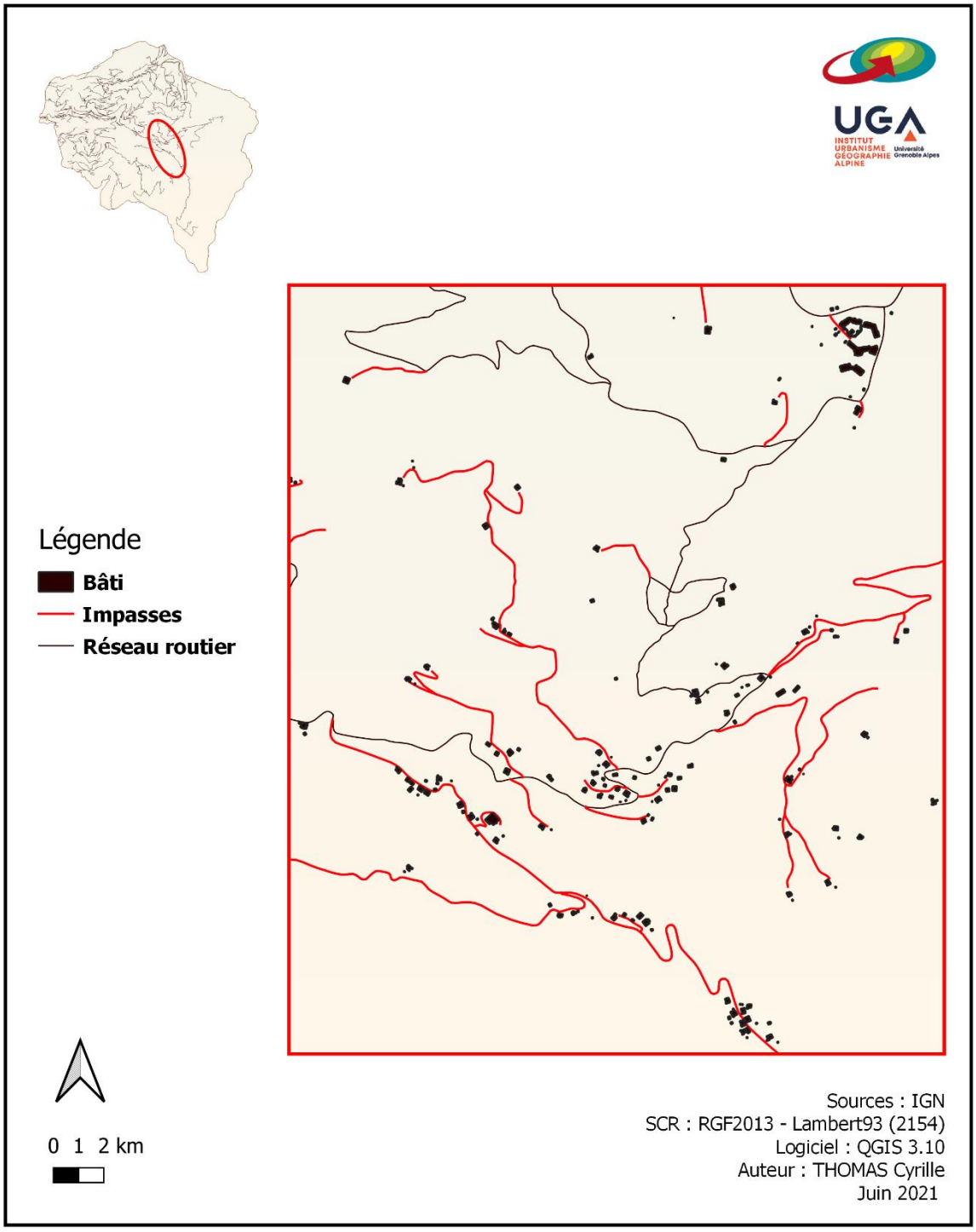
Carte 3 : Aléa avalanche à Manigod



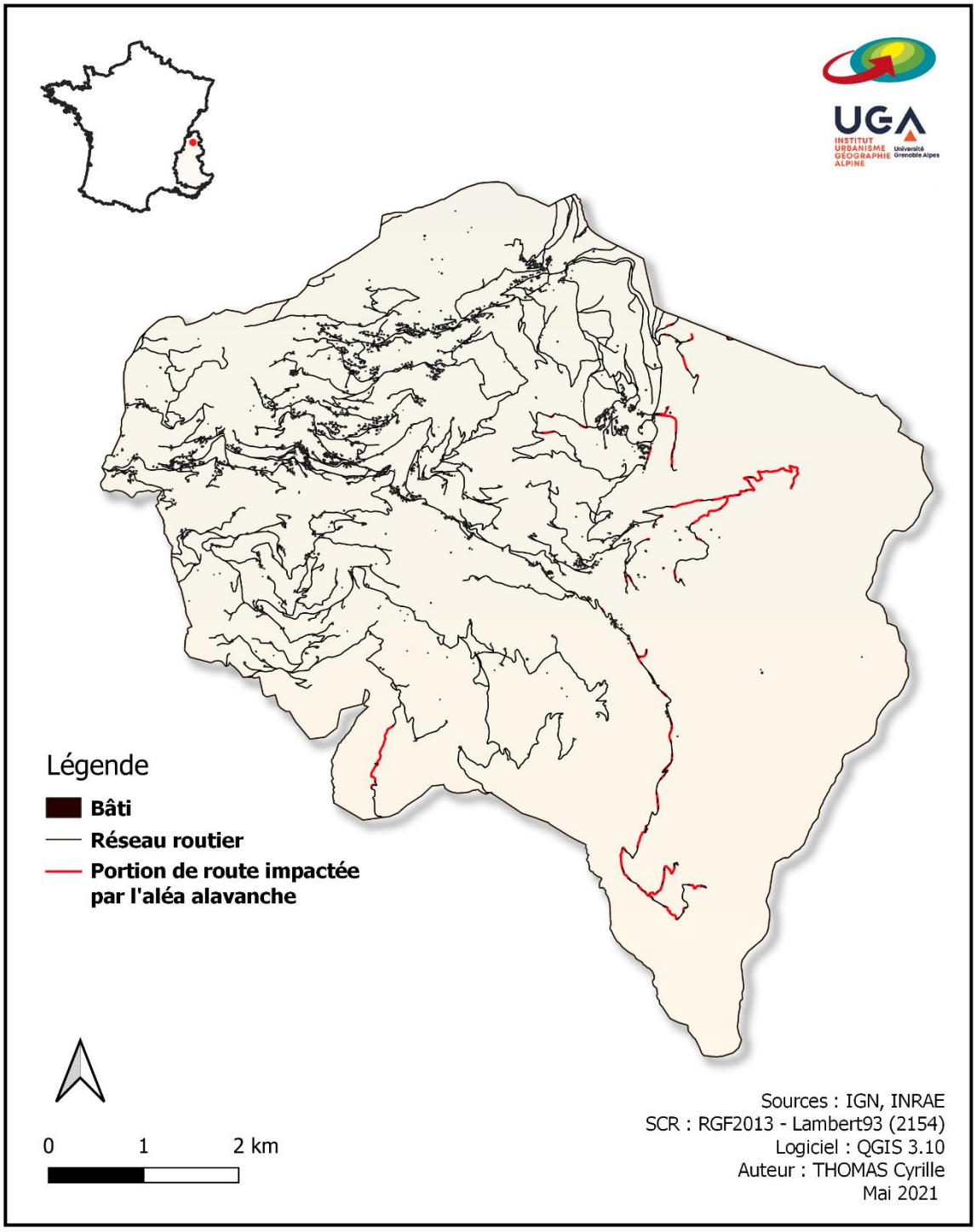
Carte 4 : Réseau routier et impasses à Manigod



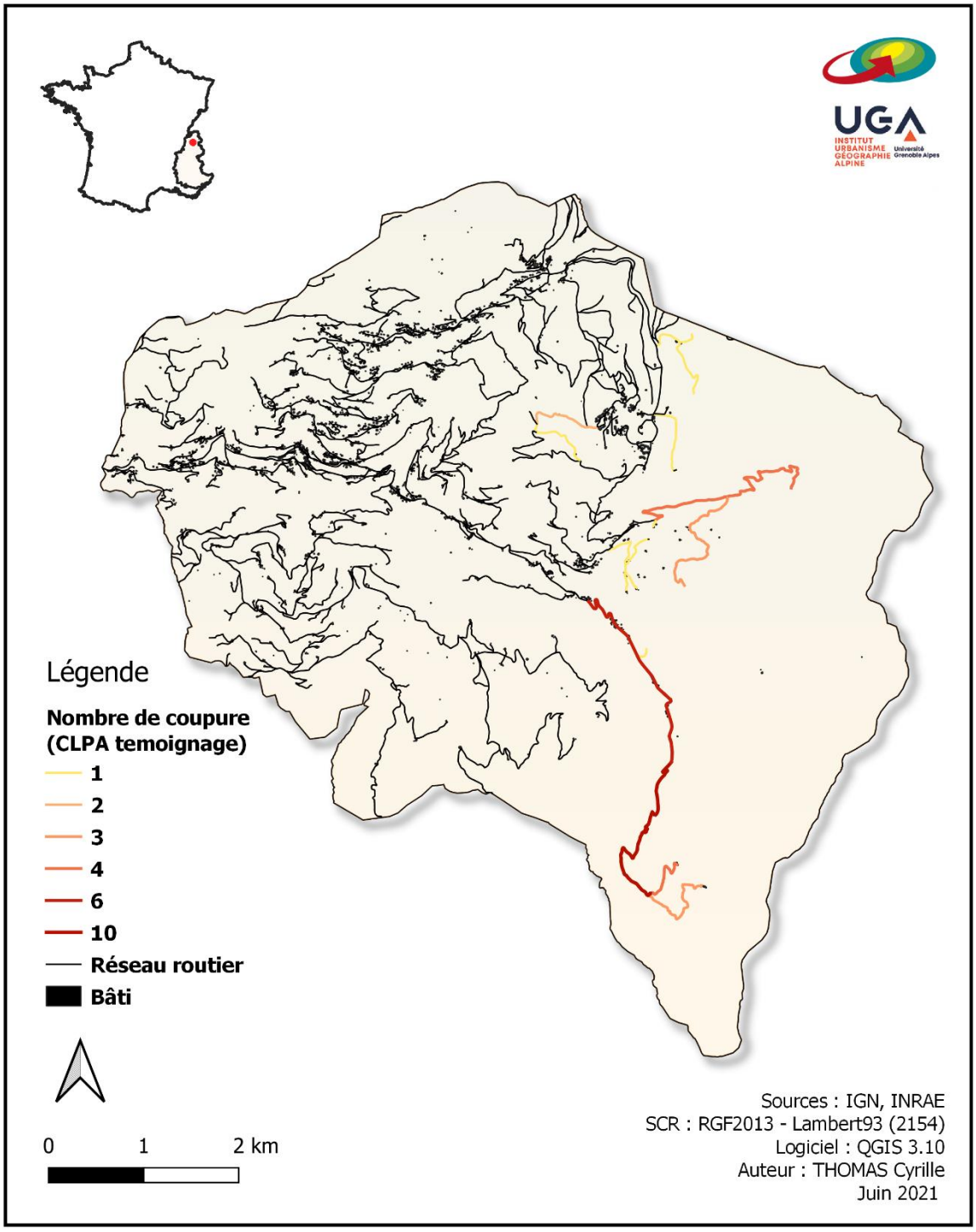
Carte 5 : Exemple des hameaux sujets à l'enclavement à Manigod



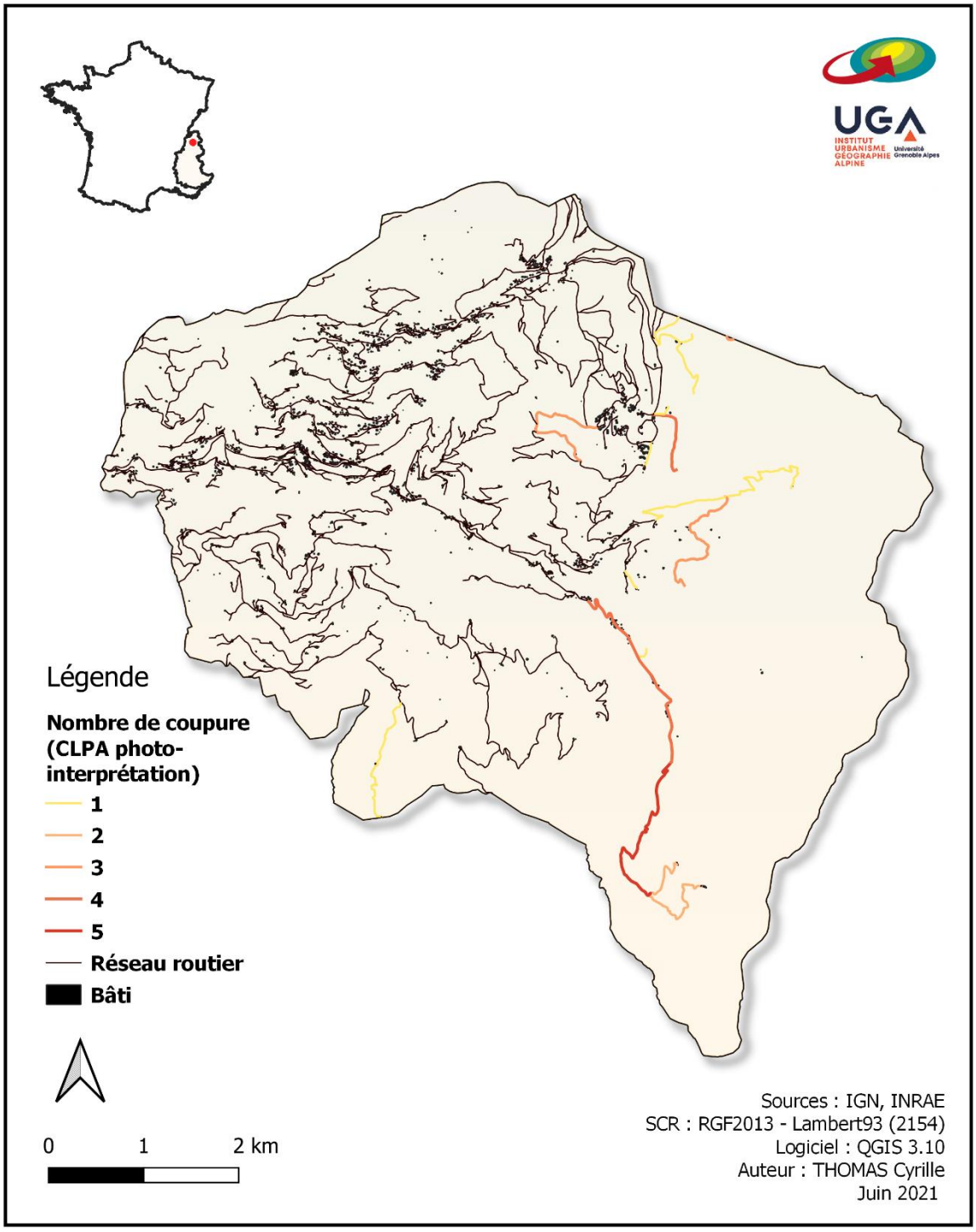
Carte 6 : Réseau routier impacté par l'aléa avalanche à Manigod



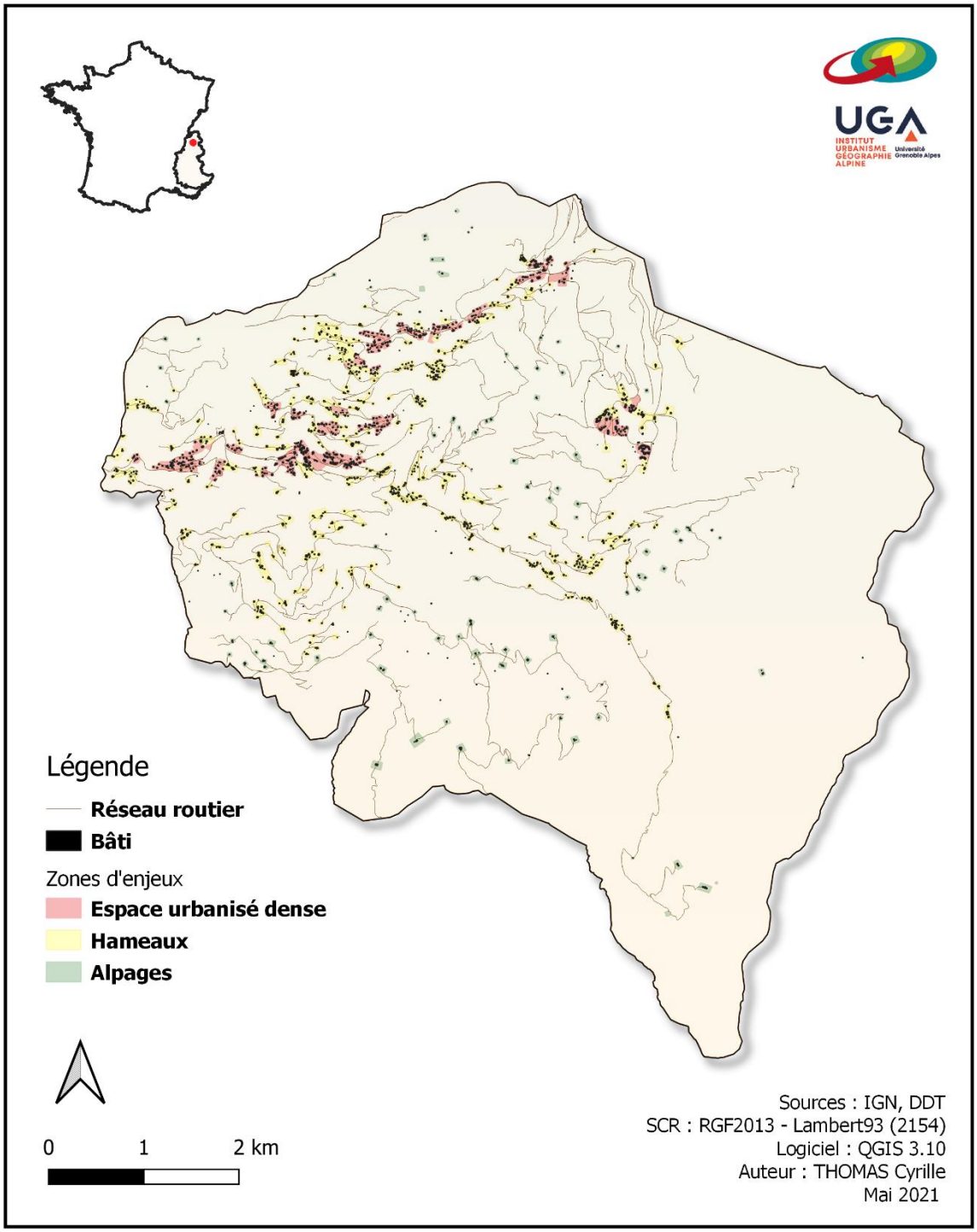
Carte 7 : Exposition du réseau routier aux avalanches à Manigod



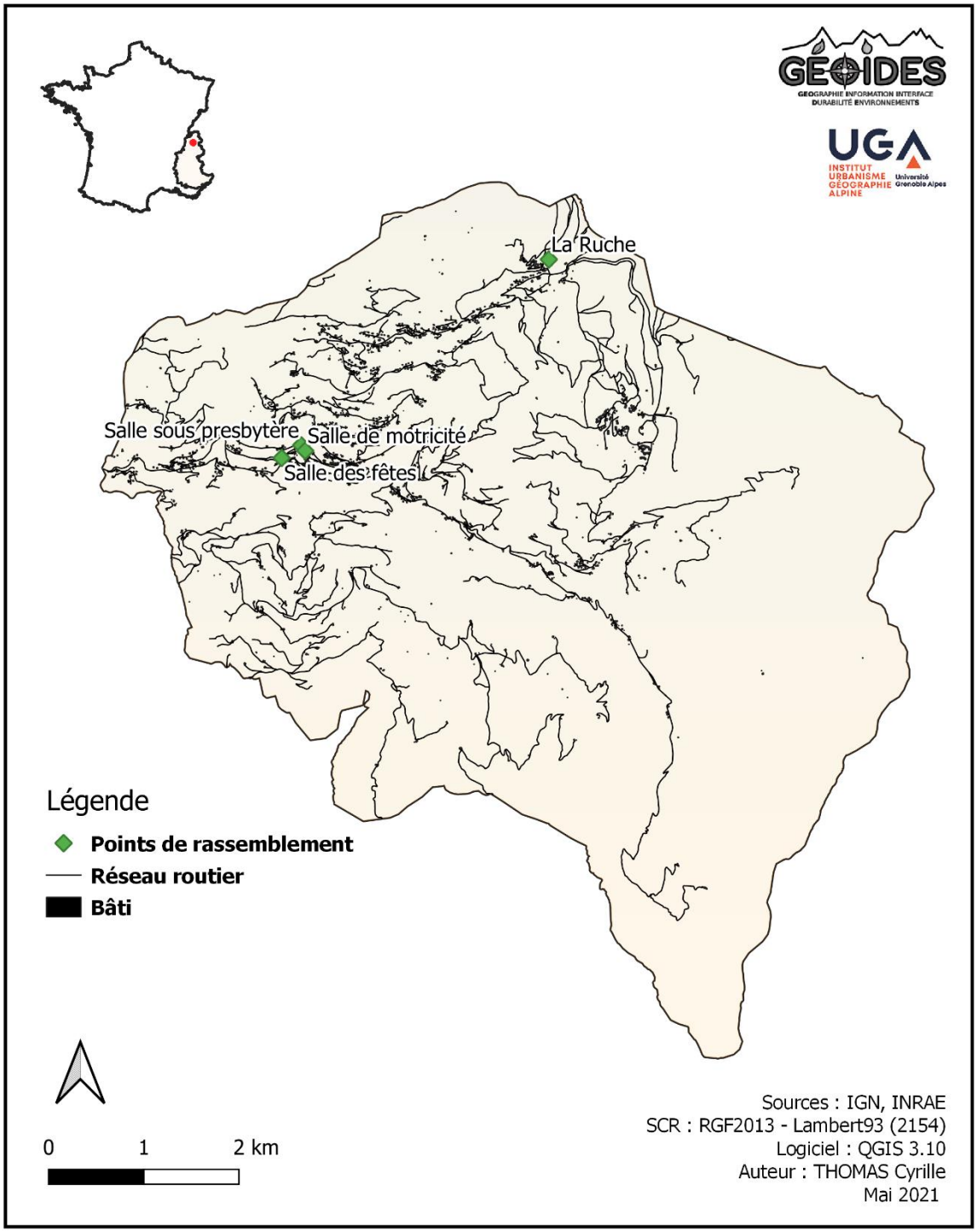
Carte 8 : Exposition du réseau routier aux avalanches à Manigod



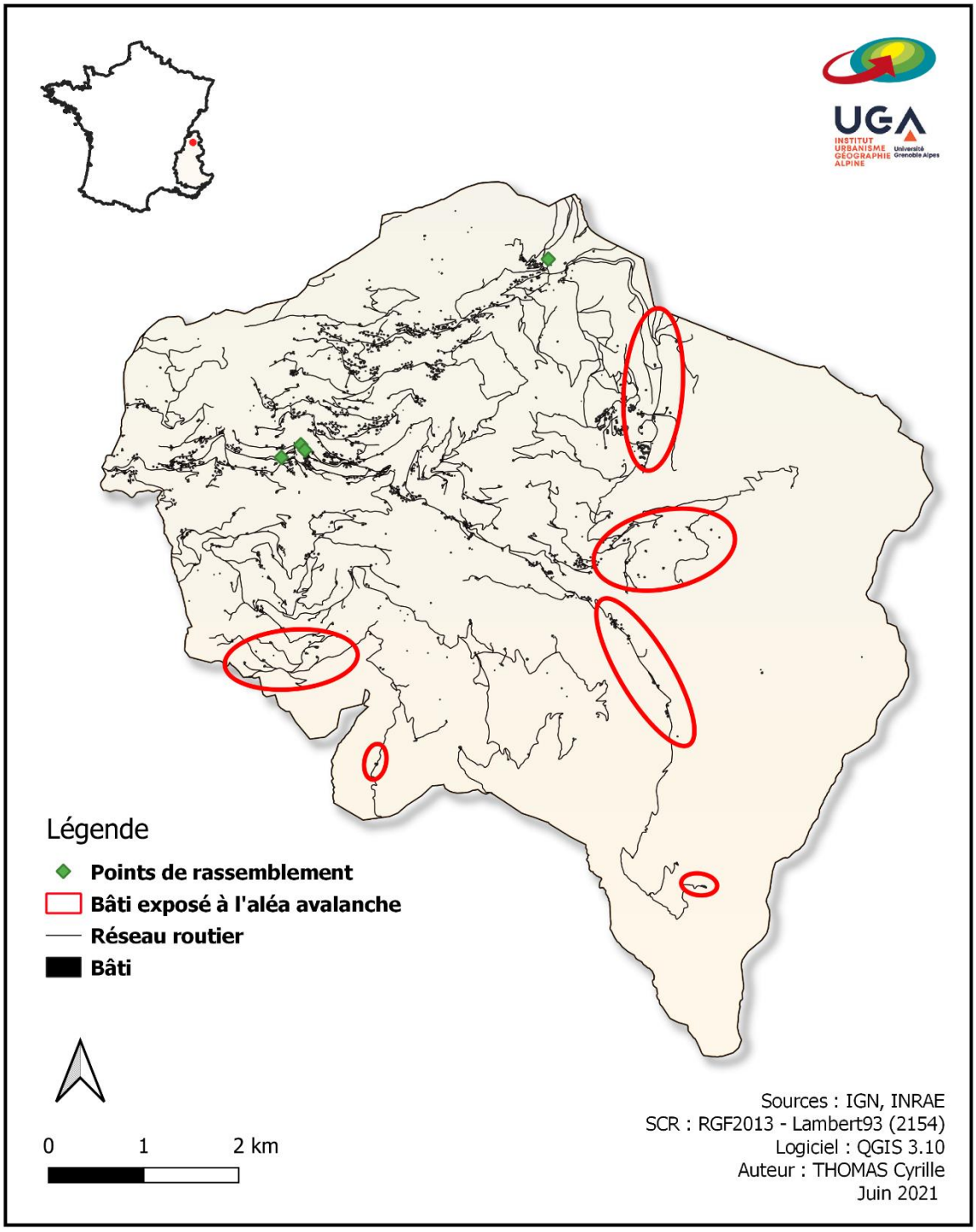
Carte 9 : Enjeux à Manigod



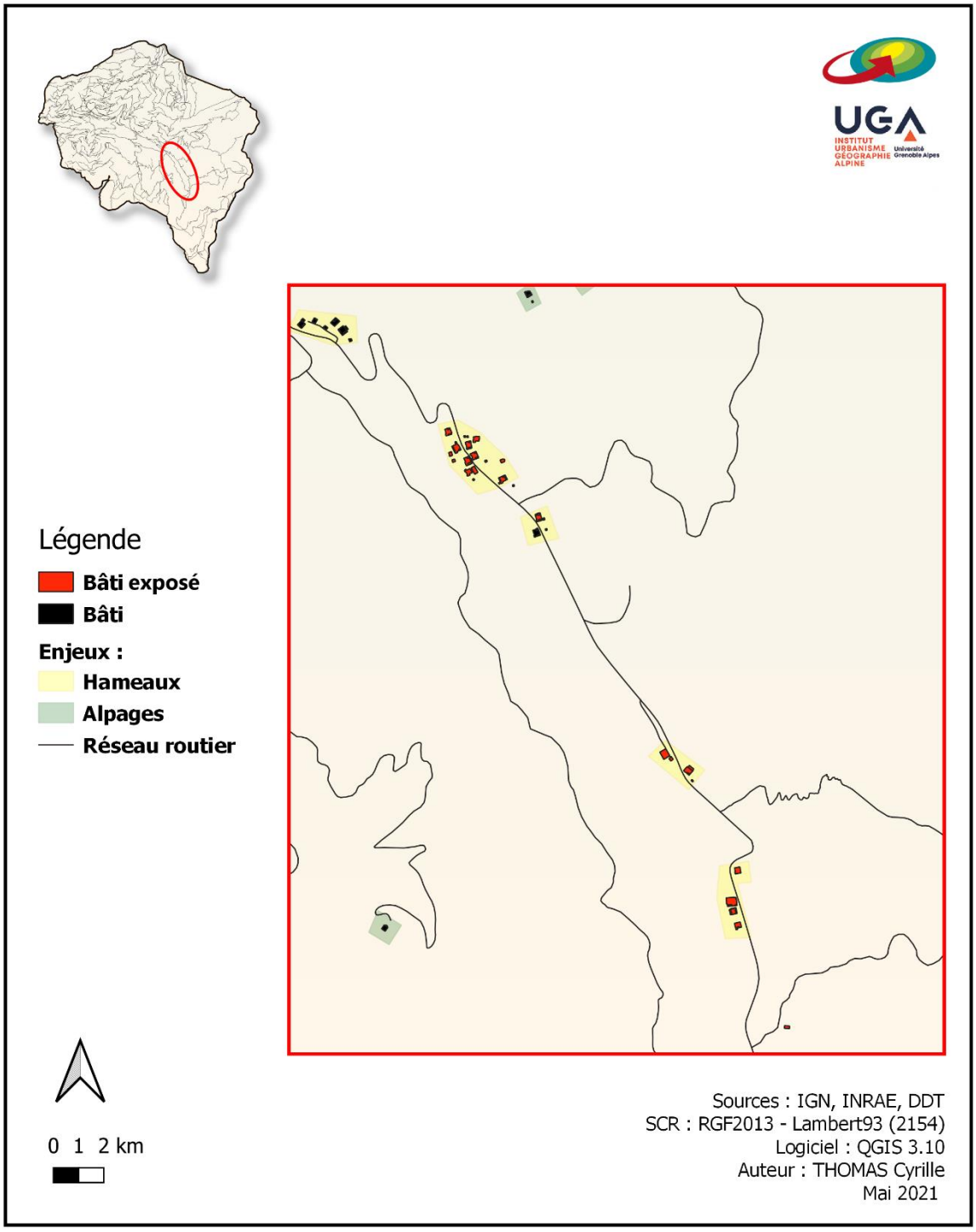
Carte 10 : Points de rassemblement à Manigod



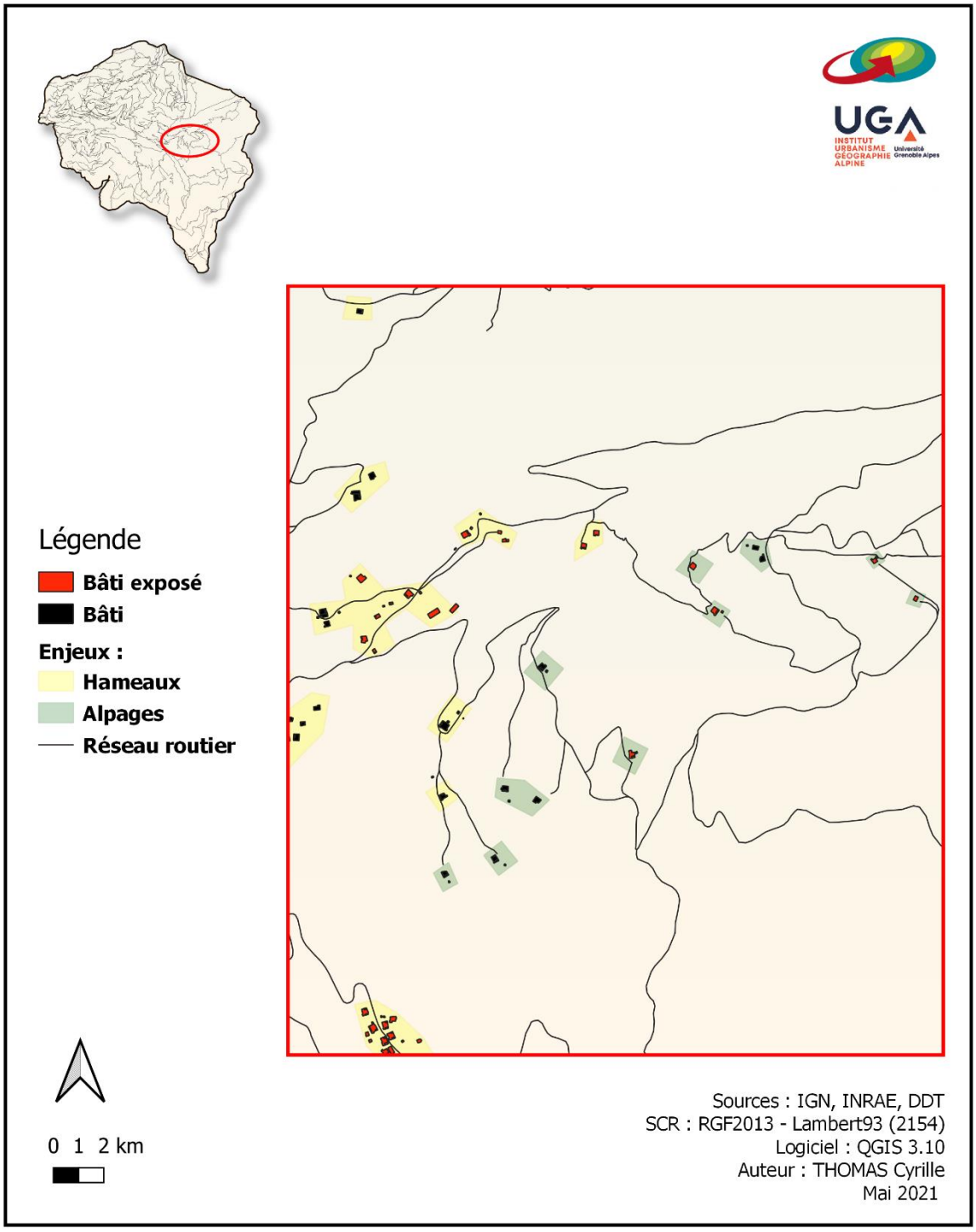
Carte 11 : Bâtiments exposés à l'aléa avalanche à Manigod



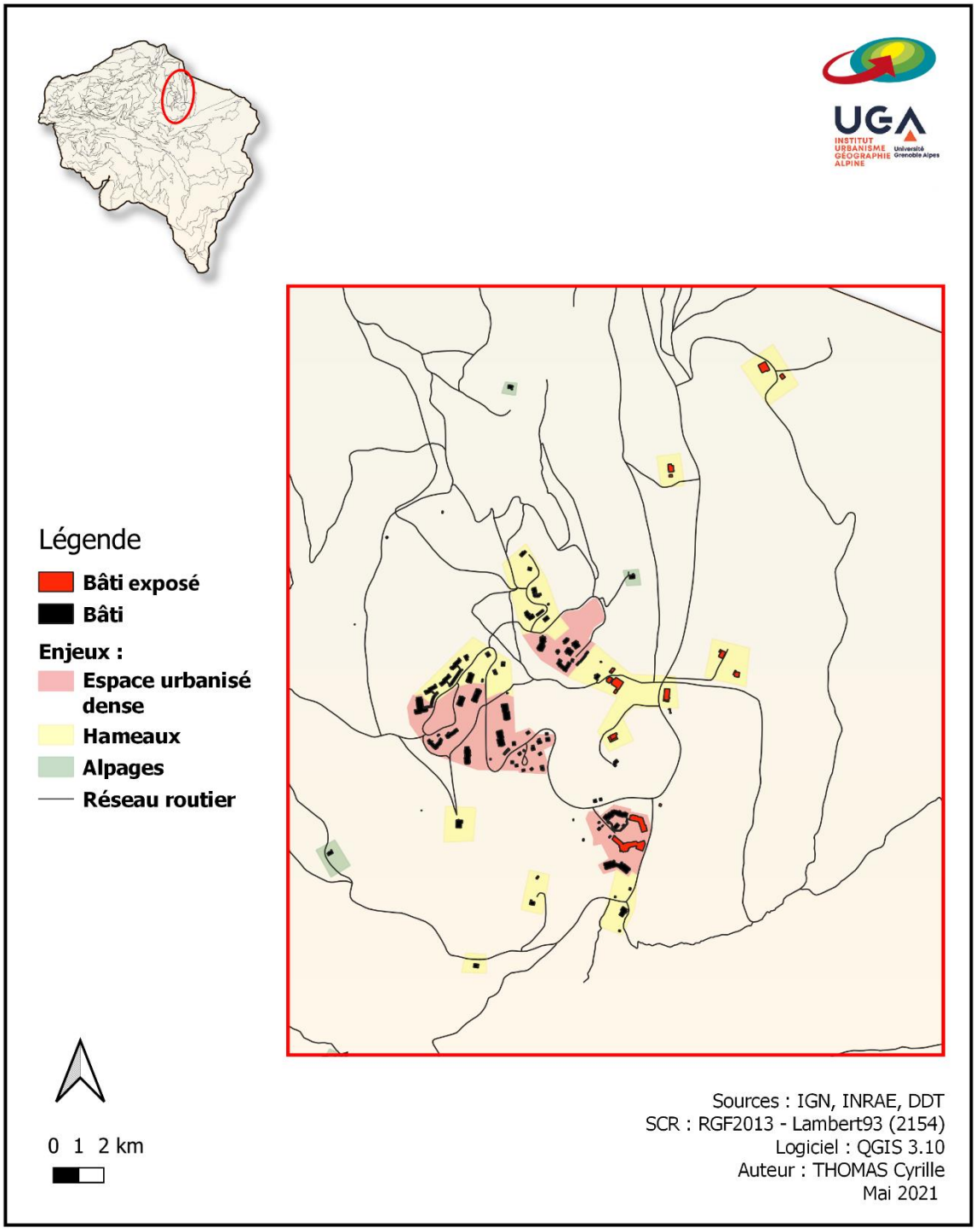
Carte 12 : Zones d'enjeux exposées aux aléas avalanches à Manigod



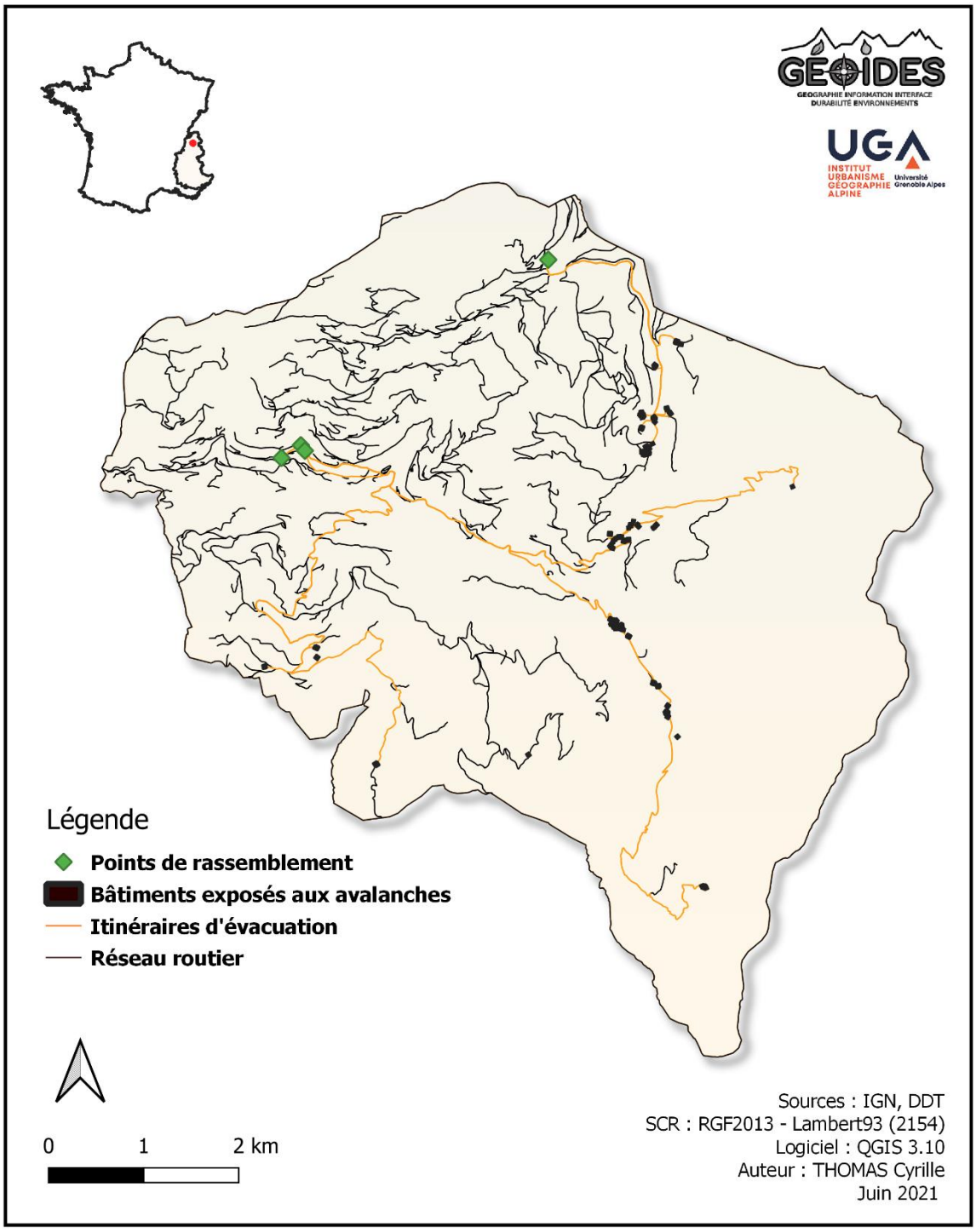
Carte 13 : Zones d'enjeux exposées aux aléas avalanches à Manigod



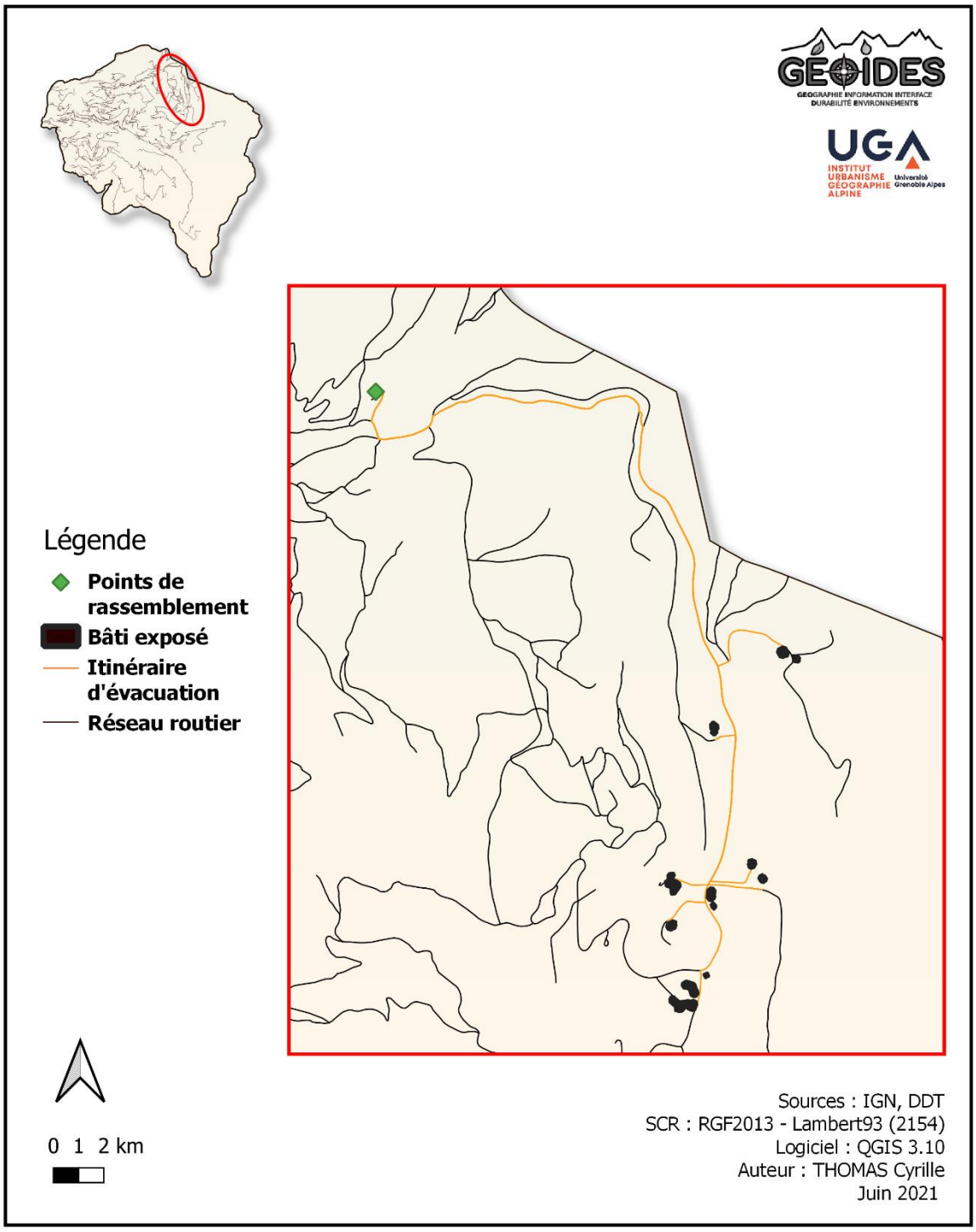
Carte 14 : Zones d'enjeux exposées aux aléas avalanches à Manigod



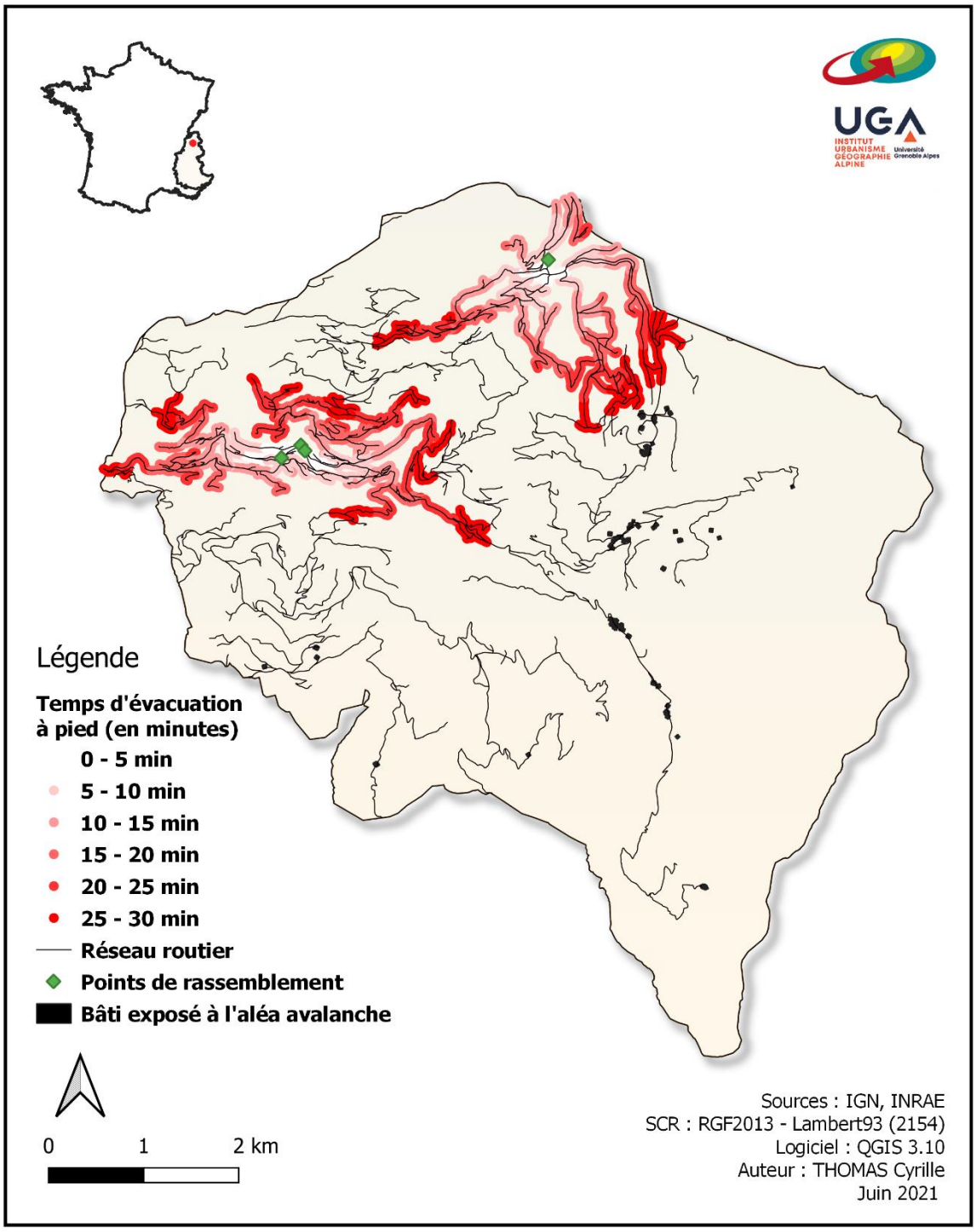
Carte 15 : Itinéraires d'évacuation entre les zones exposées à l'aléa avalanche et les points de rassemblement à Manigod



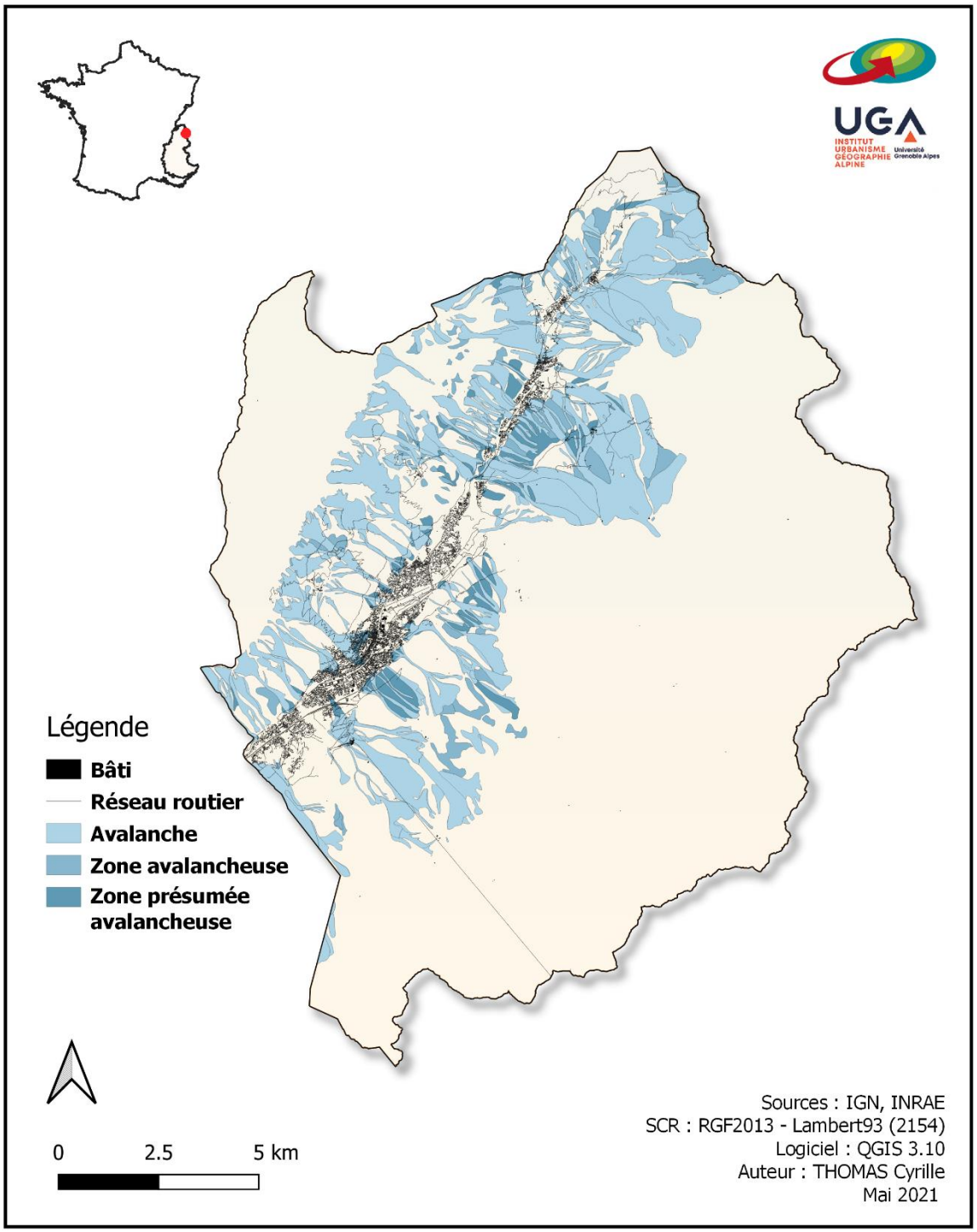
Carte 16 : Itinéraires d'évacuation entre les zones exposées à l'aléa avalanche et le point de rassemblement « La Ruche » à Manigod



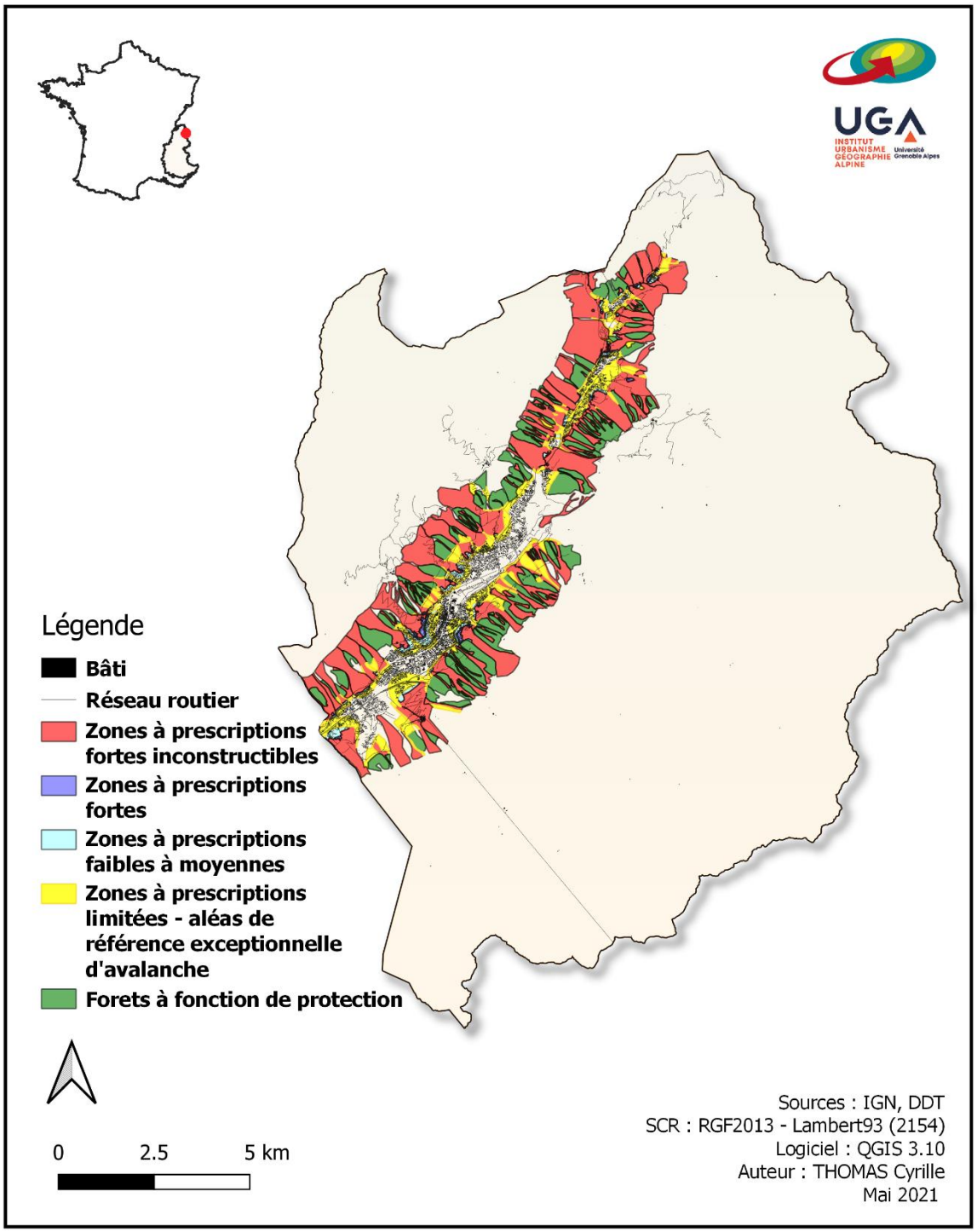
Carte 17 : Zones accessibles à pied en moins de trente minutes à partir des quatre points de rassemblement de Manigod



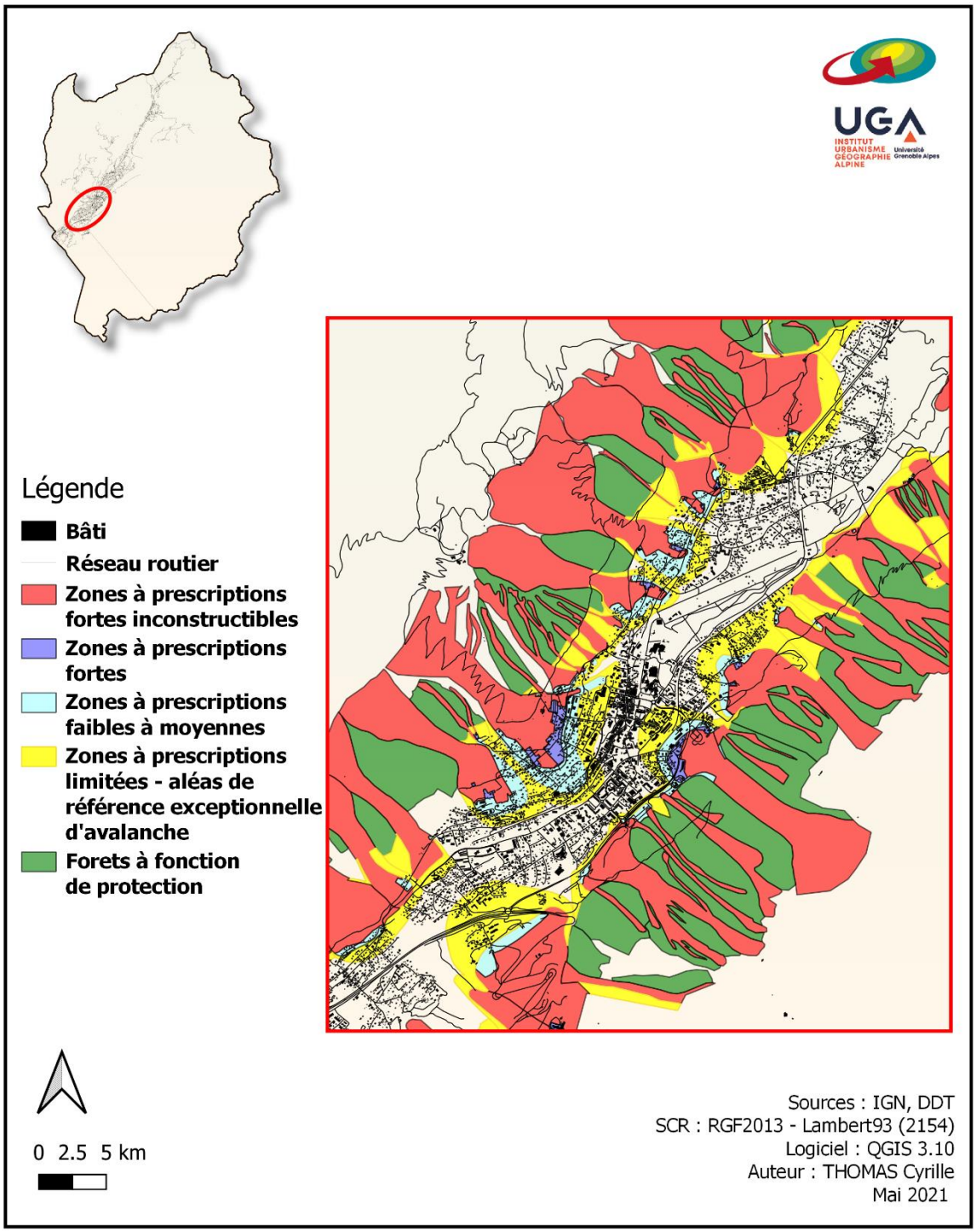
Carte 18 : Zones d'avalanches à Chamonix



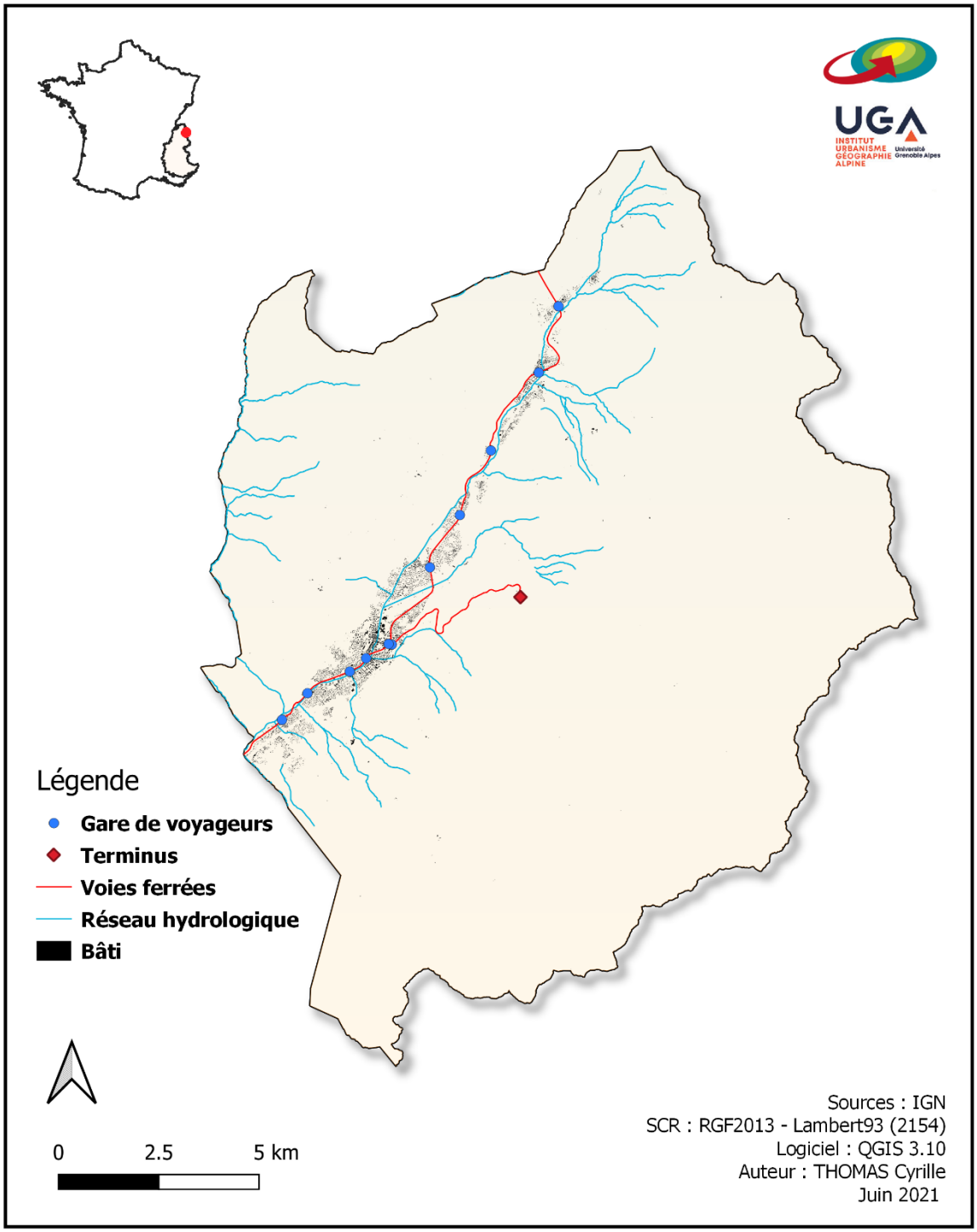
Carte 19 : Plan de prévention risque avalanche à Chamonix



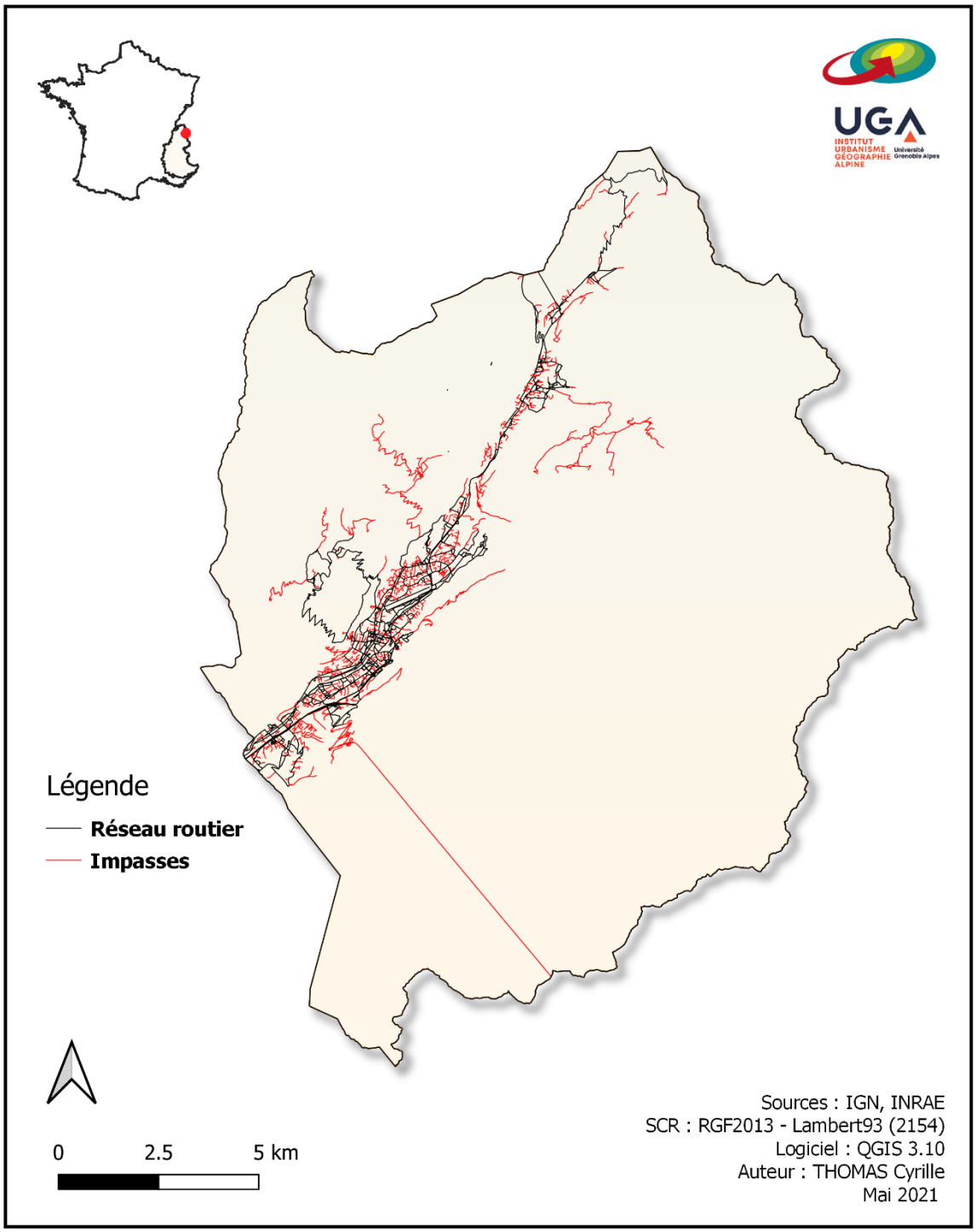
Carte 20 : Plan de prévention risque avalanche à Chamonix



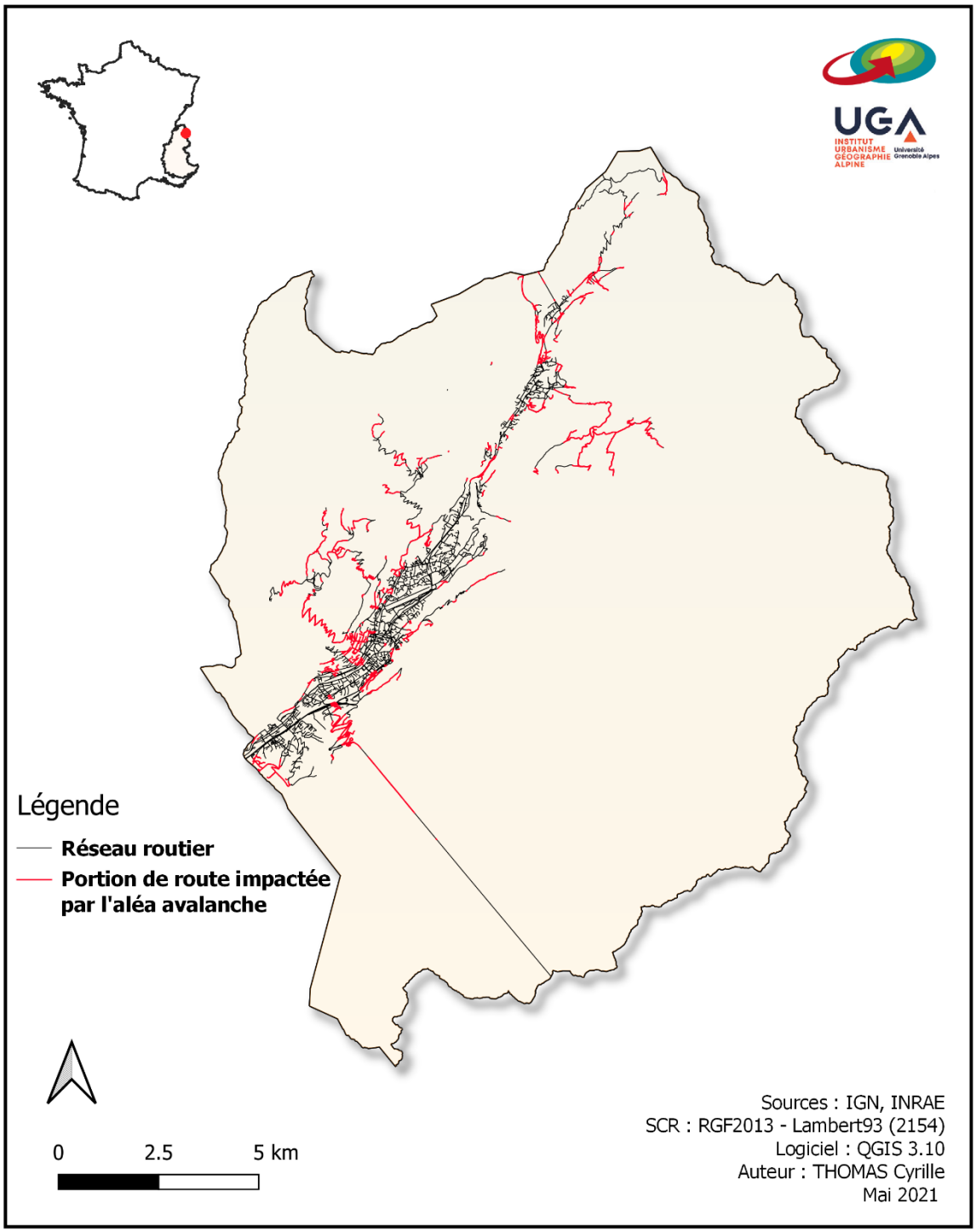
Carte 21 : Réseau ferré à Chamonix



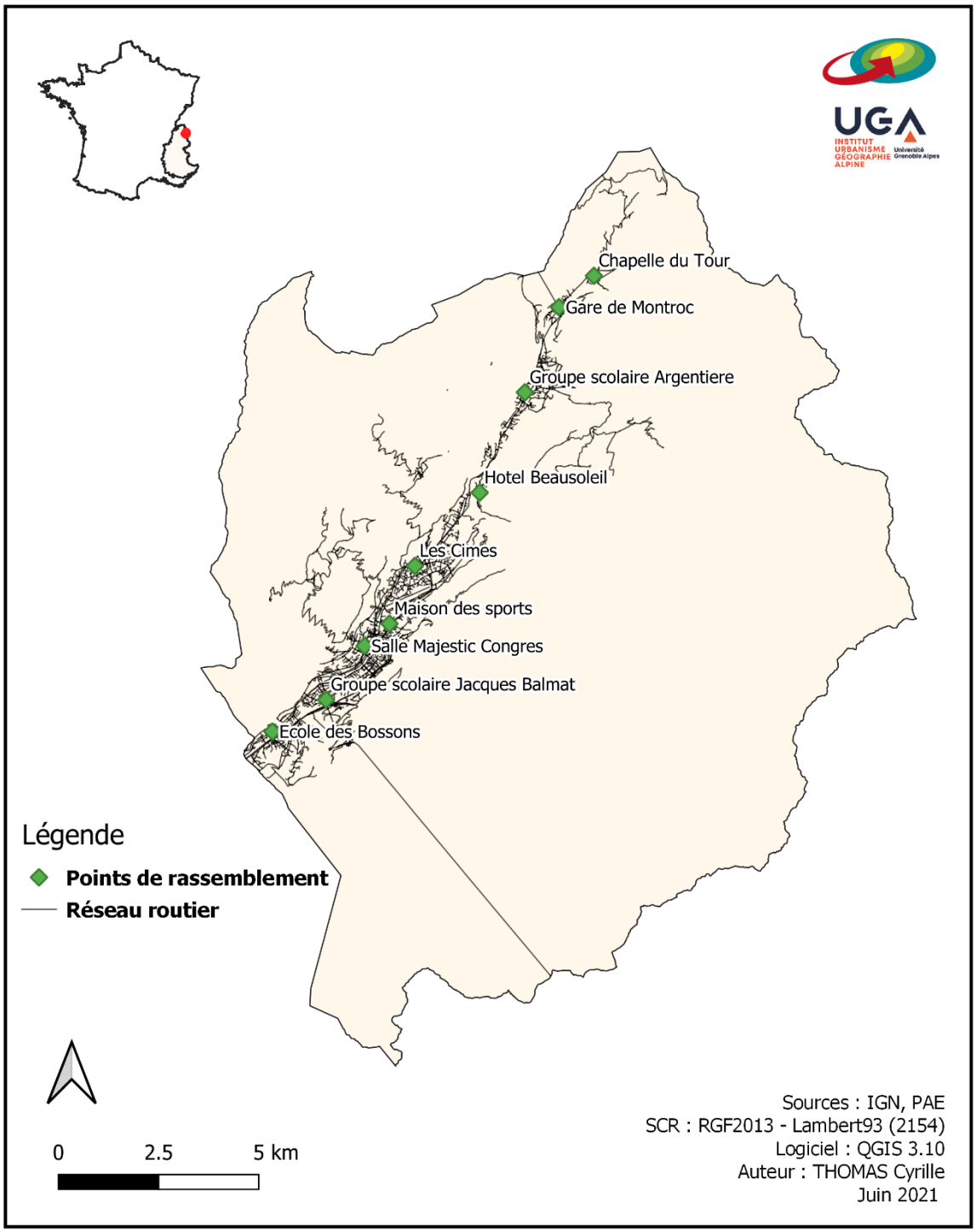
Carte 22 : Réseau routier et impasses à Chamonix



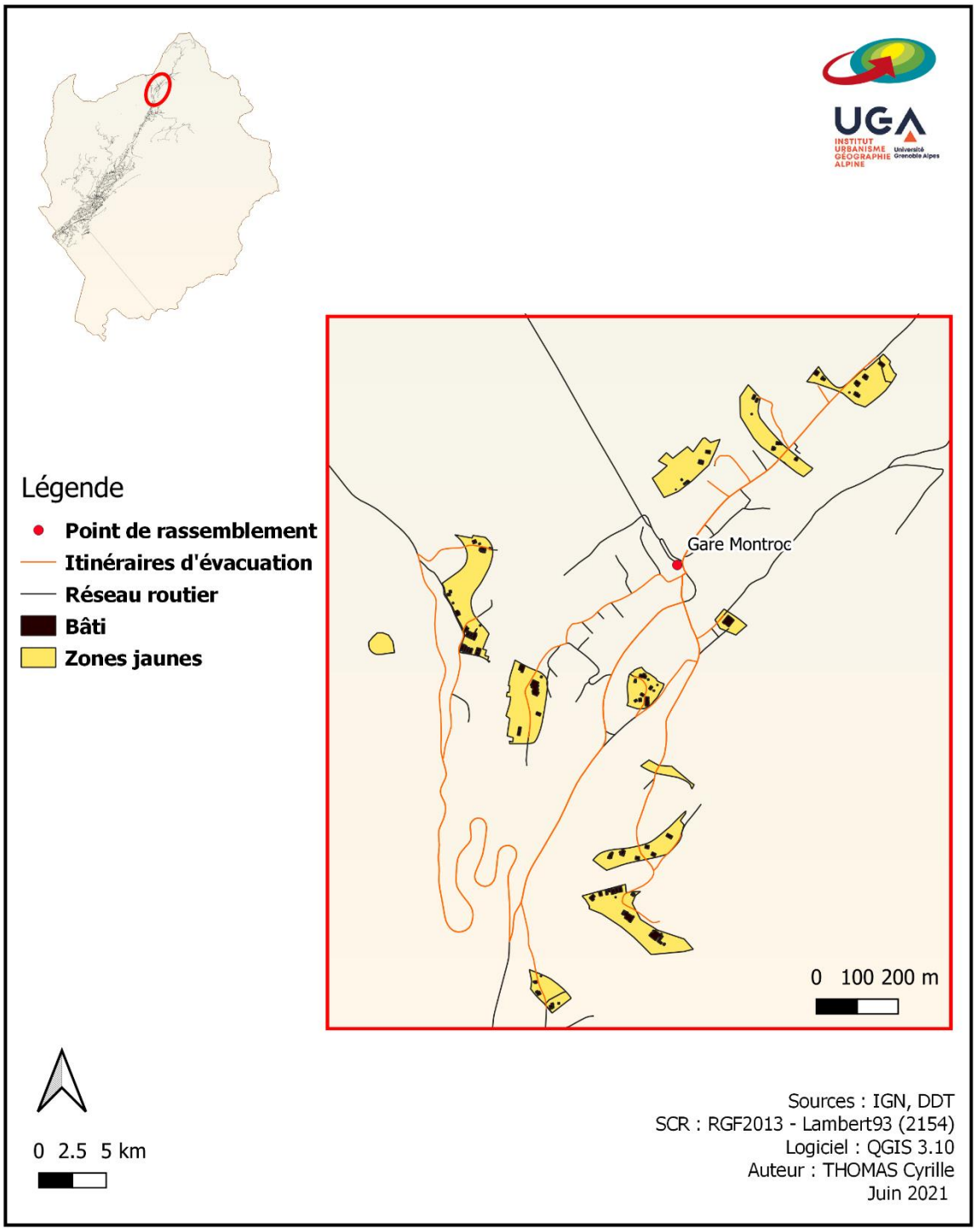
Carte 23 : Réseau routier exposé à l'aléa avalanche à Chamonix



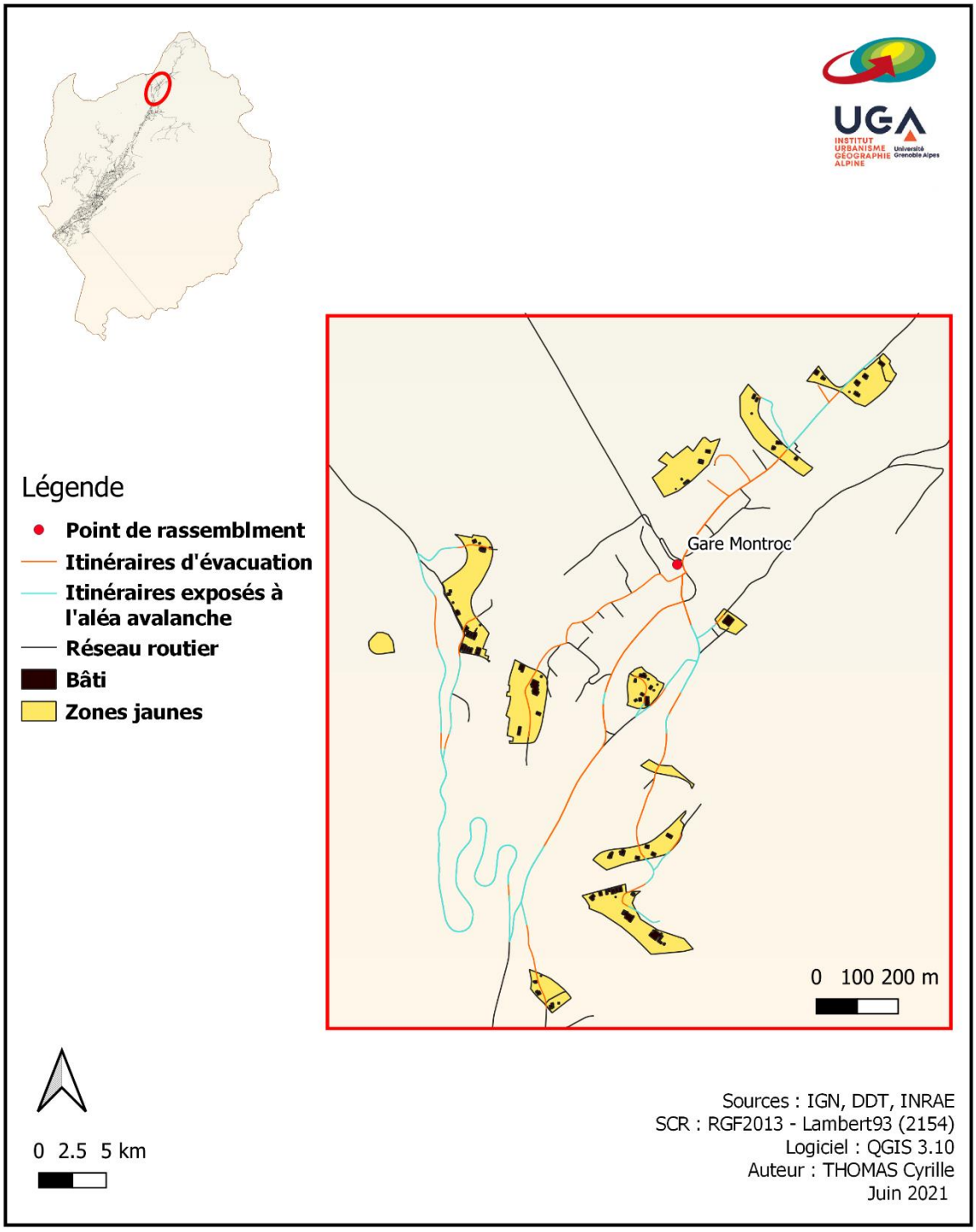
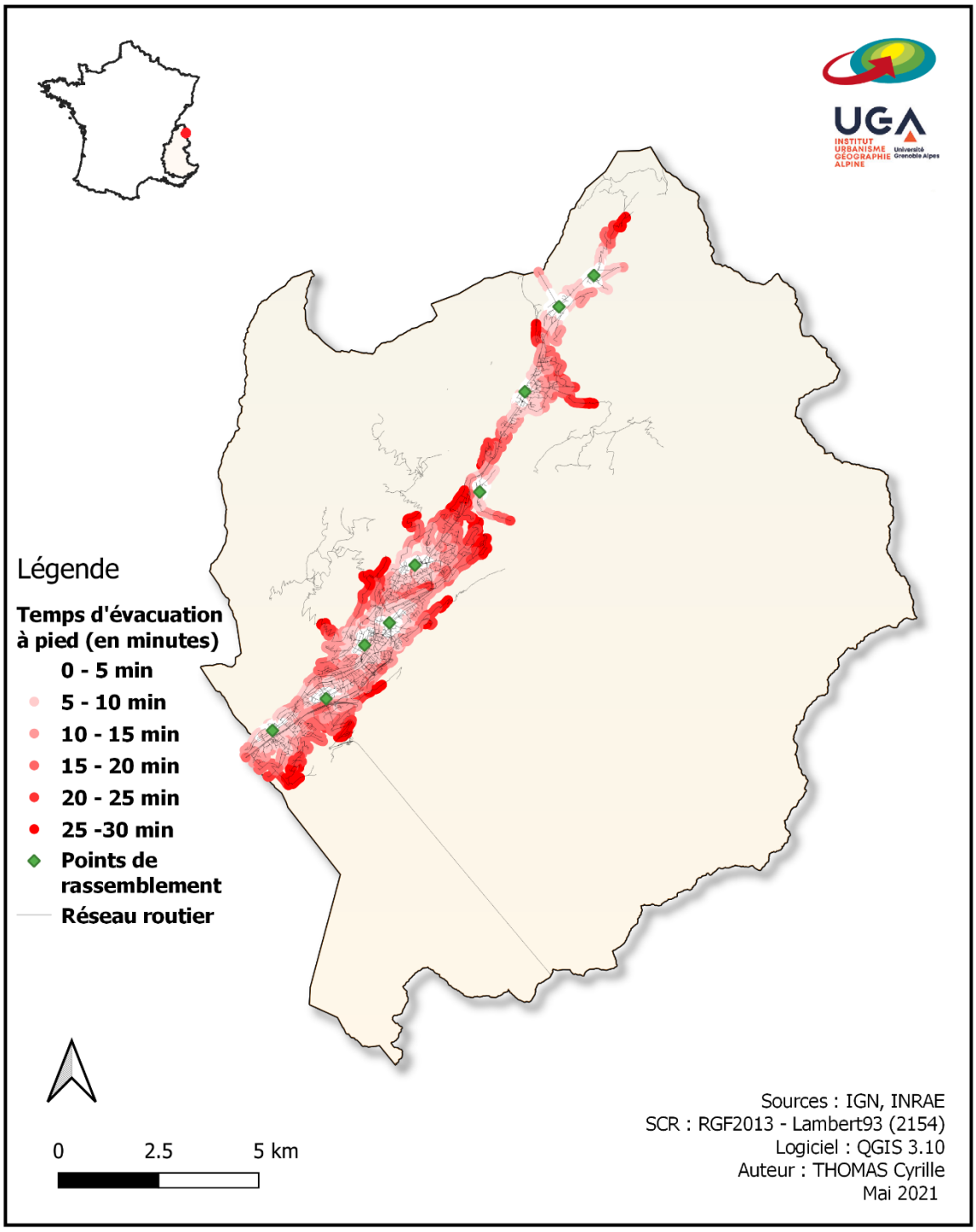
Carte 24 : Points de rassemblement à Chamonix



Carte 25 : Itinéraires d'évacuation entre une zone exposée à l'aléa avalanche et le point de rassemblement « gare de Montroc » à Chamonix



Carte 26 : Itinéraires d'évacuation exposés à l'aléa avalanche à Chamonix



Carte 27 : Zones accessibles à pied en moins de trente minutes à partir des différents points de rassemblement de Chamonix