

MASTER Domaines : **SHS/STSI**  
Mention : **GAED** (Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)  
Parcours **GÉOÏDES** (Géographie, Information, Interface, Durabilité, Environnements)

**Évolution de la gestion des risques naturels sur le massif  
alpin au travers de deux exemples : tempête Alex et  
risques d'origine glaciaire et périglaciaire**

Réalisé dans le cadre de l'UE : Atelier Professionnalisant  
Par la promotion M2 GAED-GÉOÏDES 2022 – 2023

Encadrement :

Equipe enseignante :

BECK Elise

BIGOT Sylvain

DUSSEUX Pauline

ROME Sandra

Commanditaire :

Pôle Alpin des Risques Naturels  
(PARN), représenté par :

EINHORN Benjamin

GERARD Simon

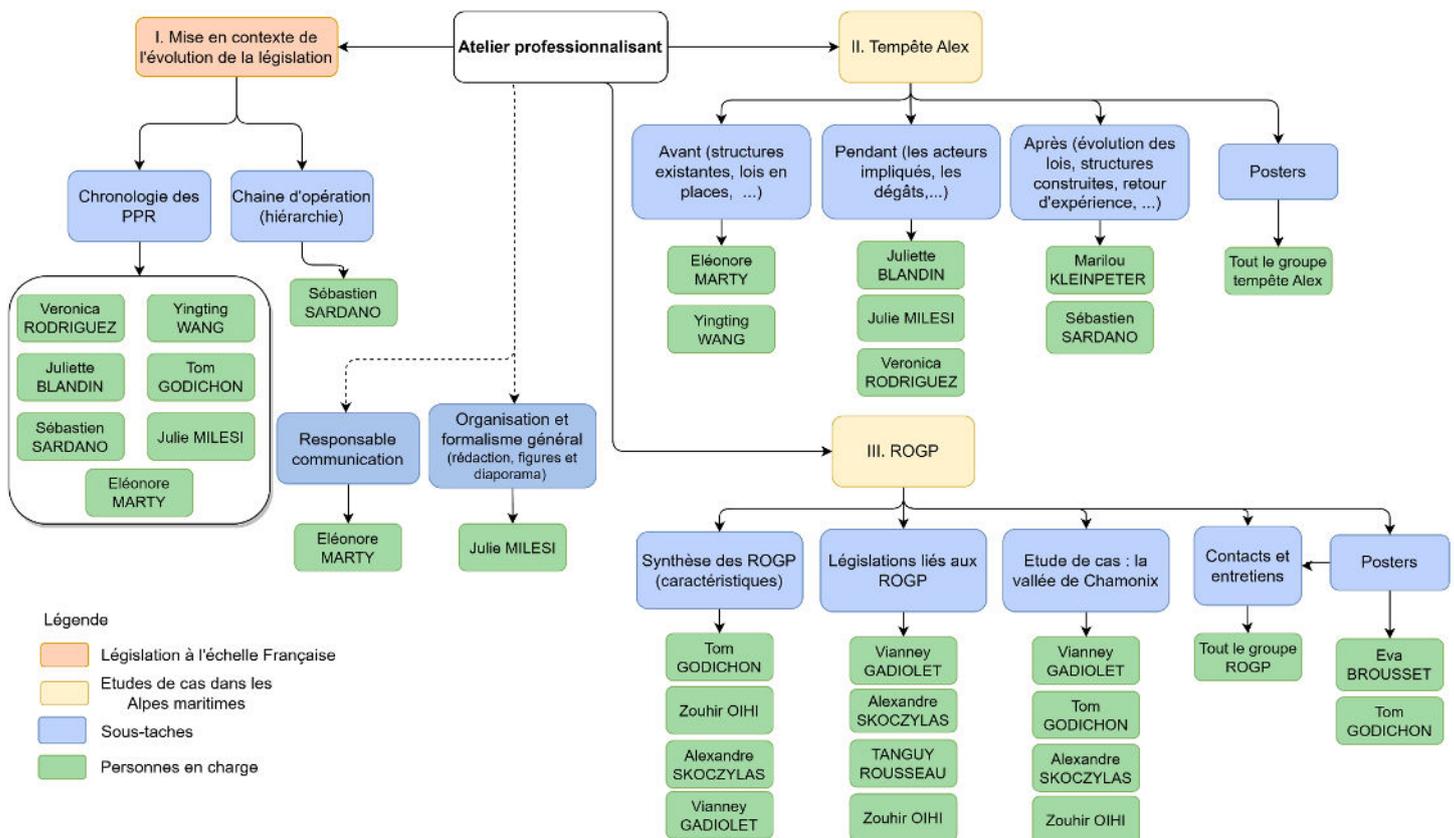


## Etudiants / promotion M2 GAED-GÉOÏDES :

BLANDIN Juliette  
 BROUSSET Eva  
 GADIOLET Vianney  
 GODICHON Tom  
 KLEINPETER Marilou  
 MARTY Eléonore  
 MILESI Julie

OIHI Zouhir  
 RODRIGUEZ Verónica  
 ROUSSEAU Tanguy  
 SARDANO Sébastien  
 SKOCZYLAS Alexandre  
 WANG Yingting

Organigramme des phases de travail et d'analyse :



## Sommaire

Introduction générale .....	5
1. Mise en contexte de l'évolution de la législation.....	5
1.1. Chronologie des lois relatives aux risques naturels .....	5
1.2. Schéma de l'organisation face à la situation d'urgence en France selon les différentes échelles d'action .....	7
2. Le cas d'étude de la tempête Alex.....	10
2.1. AVANT : état des lieux et contexte à Saint-Martin-Vésubie avant la tempête Alex .....	11
2.2. PENDANT : gestion de crise pendant la tempête Alex.....	18
2.3. APRES : conséquences de la tempête et adaptations du territoire.....	24
2.4. Conclusion sur l'évolution de la législation suite à la tempête Alex.....	35
3. Risques d'origine glaciaires et périglaciaires (ROGP).....	37
3.1. Synthèse des ROGP .....	37
3.2. La gestion et le suivi des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire .....	46
3.3. La vallée de Chamonix : gestion du risque en quatre études de cas.....	52
3.4. Conclusion sur les ROGP .....	62
Conclusion générale .....	63
Bibliographie - Evolution de la législation .....	65
Bibliographie - Tempête Alex.....	66
Bibliographie – ROGP.....	68
Table des figures .....	70
Table des photos .....	72
Table des tableaux .....	73
Table des matières .....	73

## Sigles et Acronymes

BV	Bassin Versant
COD	Centre Opérationnel Départemental
COGIC	Centre Opérationnel de Gestion Interministérielle des Crises
DDRM	Dossier Départemental sur les Risques Majeurs
DGSCGC	Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise
DICRIM	Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs
DOS	Directeur des Opérations de Secours
MIC	Centre d'information et de monitoring
ORSEC	Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
PAPI	Programme d'Actions de Prévention des Inondations
PCC	Poste de Commandement Communal
PCO	Poste de Commandement Opérationnel
PCS	Plan Communal de Sauvegarde
PICS	Plan InterCommunal de Sauvegarde
PER	Plan d'Exposition aux Risques
PFMS	Plan Familial de Mise en Sûreté
PNC	Plan National Canicule
POI	Plan d'Opération Interne
POMSE	Plan d'Organisation de Mise en Sûreté d'un Établissement
PPMS	Plan Particulier de Mise en Sûreté
PPRI	Plan de Prévention des Risques d'Inondation
PPRN	Plans de Prévention de Risques Naturels Prévisibles
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
PSS	Plan de Surface Submersible
ROGP	Risque d'origine glaciaire et périglaciaire
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

## Introduction générale

Ce rapport est le résultat d'un projet réalisé par la promotion 2022-2023 du Master 2 GÉOÏDES de l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine de Grenoble (IUGA) dans le cadre de l'UE Atelier professionnalisant. L'objectif est de répondre à la commande du Pôle Alpin des Risques Naturels (PARN), laquelle porte sur l'analyse de l'évolution de la gestion des risques dans les Alpes. Pour réaliser cette analyse, une introduction sur la législation de la gestion des risques naturels à l'échelle nationale ([Partie 1](#)) précède deux études de cas : la première sur la [tempête Alex](#) et la deuxième sur les Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP) dans la vallée de Chamonix ([Partie 3](#)). Ces deux cas d'études ont été choisis afin d'aborder des risques de nature différente (météorologiques et liés aux glaciers).

## 1. Mise en contexte de l'évolution de la législation

### 1.1. *Chronologie des lois relatives aux risques naturels*

L'article 2 du décret-loi du 30 octobre 1935 prévoit le Plan de Surface Submersible (PSS) qui est le premier document en France traitant de la question des risques naturels et réglementant l'utilisation des sols situés en zones inondables. L'objectif est de garantir le libre écoulement des eaux et la conservation des champs d'inondation ([Terranota, 2021](#)).

Après une importante crue de la Seine en janvier 1982, la [loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles](#) a institué le Plan d'Exposition aux Risques (PER) pour inciter, notamment, les assurés à la prévention ([Légifrance, 1982](#)). Ces plans impliquent déjà des servitudes d'utilité publique et sont annexés au Plan d'Occupation des Sols (aujourd'hui PLU) ; ils délimitent les zones de risques d'inondation, mouvement de terrain, avalanches et séismes.

Suite aux incendies touchant la Côte d'Azur en 1986 et aux inondations du Grand Bornand en 1987, la [loi n°87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs](#) renouvelle les PER dans son article 42 ([Légifrance, 1987](#)). Les PER listent les mesures de prévention, protection et sauvegarde des personnes et des biens à mettre en œuvre, pour supprimer ou limiter les impacts négatifs des événements exceptionnels. Le Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) a été aussi institué par cette loi.

En suivant l'article L562-1 du Code de l'Environnement, l'État est obligé d'élaborer et de mettre en application des Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles (PPRN) tels que les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones. Cette obligation est apparue lorsque la [loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement](#), dite Loi Barnier, a modifié la loi du 22 juillet 1987 en créant les articles 40-1 à 40-7 imposant

la création des PPRN, lesquels remplaçaient les Plans d'Expositions aux risques de la loi de 1982 ([Légifrance, 1995](#)).

Les Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) ont été portés par les collectivités territoriales ou leurs groupements en 2002. Il s'agit d'un outil de contractualisation entre les collectivités territoriales ou leurs groupements et l'État pour promouvoir une gestion intégrée des risques d'inondation sur un bassin de risque cohérent.

Suite à la canicule d'août 2003 faisant 15 000 morts surnuméraires, le Plan National Canicule (PNC), a été établi pour anticiper l'arrivée d'une canicule et adapter au mieux les mesures de prévention. De plus, le PPRN a été consolidé après les incendies de forêt de la même année.

L'apparition de situations inédites découlant de risques terroristes (attaque du 11 septembre 2001 aux États-Unis), technologiques (catastrophe de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001), et sanitaires climatiques (canicule exceptionnelle de 2003) ont appelé à une totale remise en question du cadre législatif français. En 2003, la [loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages](#), dite loi Bachelot, consolide le PPR en instituant le Plan de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) ([Légifrance, 2003](#)). La [loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile](#) a également vu le jour. Cette loi a pour objectif de mobiliser l'ensemble des compétences impliquées dans la prévention et l'organisation des secours concernant les risques technologiques, naturels ou de nature terroriste ([Légifrance, 2004](#)).

De plus, pour compléter au mieux l'action et les mesures issues de la loi de 1987, un outil dit Plan Communal de Sauvegarde (PCS) a été établi par la loi de 2004. C'est un document permettant, avec un diagnostic des risques et un recensement des moyens à disposition, d'assurer une gestion de crise et de protéger la population à l'échelle communale. Ainsi, au vu de l'article 13 de cette nouvelle loi et du décret d'application N°2005-1156 du 13 septembre 2005, le PCS devient un document obligatoire pour de nombreuses communes françaises notamment dotées d'un plan de prévention des risques naturels (PPRN) approuvé ([Lavole, 2022](#)).

Tirant les leçons du grave incident technique qui a perturbé les numéros d'urgence le 2 juin 2021, la [loi n° 2021-1520 du 25 novembre 2021 visant à consolider notre modèle de sécurité civile et valoriser le volontariat des sapeurs-pompiers et les sapeurs-pompiers professionnels](#), dite Loi Matras, vise à consolider le modèle français de sécurité civile et à valoriser le volontariat des sapeurs-pompiers ([Légifrance, 2021](#)).

La [Figure 1](#) résume cette chronologie d'événements qui ont impulsé une telle évolution dans

la réglementation relative à la gestion des risques naturels et la création de nouveaux outils.

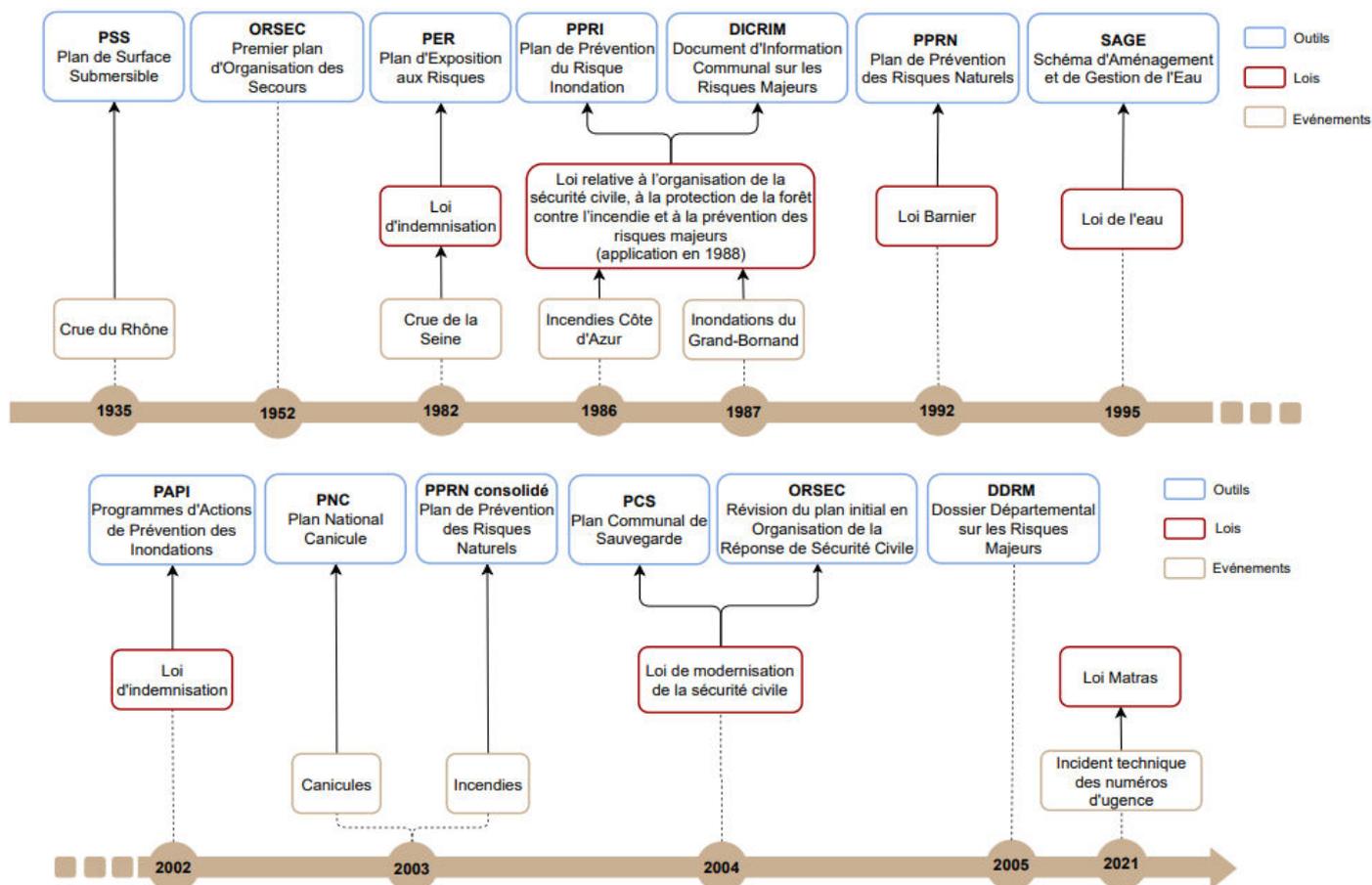


Figure 1 : Chronologie des événements ayant fait évoluer les lois et les outils relatifs aux risques naturels en France depuis 1935 (M2 Géoïdes, 2022, d'après les sources suivantes : Bellurot et al., 2013 ; Challot, 1986 ; DDT-SUR, 2013 ; Deville, 2009 ; Douvinet et al., 2013 ; Kowalski, 2009 ; Lavole, 2022 ; Légifrance, 1982, 1987, 1992, 1995, 2003, 2004, 2021 ; Mauerhan, 2022 ; Nahon et Michaloux, 2016 ; Olei, 2018 ; Préfet du Doubs, 2022 ; Préfecture de la Haute-Savoie et al., s.d. ; Terranota, 2021 ; Toulemon, 1992 ; UNALCI, s.d.).

## 1.2. Schéma de l'organisation face à la situation d'urgence en France selon les différentes échelles d'action

En fonction de la situation d'urgence, chaque niveau territorial (commune, département, zone ou pays) dispose de sa propre structure de commandement qui permet aux autorités d'être informées et d'exercer les fonctions qui leur ont été déléguées afin de gérer une crise (Figure 2).

Le code de la sécurité intérieure confie aux maires les prérogatives en matière de protection civile et la base juridique de la répartition des responsabilités entre les maires et les préfets en termes de direction opérationnelle (DO) (Blanc, 2022). En général, le maire est responsable

de la protection civile dans sa commune jusqu'à ce qu'une situation d'urgence dépasse ses capacités, le préfet assumant alors cette responsabilité. Dans ce cas, au niveau communal, le maire peut établir un poste de commandement communal (PCC), déclenché en réponse aux situations d'urgence en tant que structure d'appui à la décision du maire, d'échange et de synthèse de l'information. Afin de répondre aux crises au niveau local, le code de la sécurité intérieure prévoit l'élaboration des plans communaux ou intercommunaux de sauvegarde (PCS / PICS). Le Plan Familial de Mise en Sûreté (PFMS) est un outil pédagogique proposé par le ministère de l'Intérieur et sa direction générale de la sécurité civile et de la gestion de crise (DGSCGC) aux citoyens pour les sensibiliser aux risques et améliorer leurs compétences en matière de gestion de crise au niveau familial ([Episeine, 2021](#)). Au niveau de l'école, le Plan Particulier de Mise en Sûreté (PPMS) permet aux écoles de se préparer à des situations majeures et de les gérer pour limiter les conséquences si elles se produisent. Les décideurs locaux assurent également la promotion et la diffusion du Plan d'Organisation de Mise en Sûreté d'un Établissement (POMSE) auprès des entreprises et des institutions. Ce guide expérimental a pour but de faciliter la mise en œuvre par le responsable d'entreprise d'une procédure interne et spécifique à l'entreprise pour garantir la sécurité immédiate du public et des salariés dans le cas d'un événement majeur ([Rousselon, 2013](#)). En outre, pour les sites industriels, il existe le Plan d'Opération Interne (POI) permettant de prévenir et de prendre des décisions pour répondre aux situations d'urgence lorsque les effets sont conscris à l'intérieur du site ([Retailleau, 2022](#)).

A l'échelon départemental, le dispositif opérationnel de l'autorité préfectorale est fondé sur deux types de structures de commandement. L'un est le centre opérationnel départemental (COD) à la préfecture et l'autre est le poste de commandement opérationnel (PCO) qui est chargé de coordonner les différents acteurs sur le terrain. Si l'événement dépasse les limites ou les capacités d'un département, la zone de défense fournit des ressources de renfort et coordonne les opérations par l'intermédiaire du centre opérationnel de zone (COZ). De plus, le préfet de département coordonne les actions de tous les acteurs concernés (services de l'Etat, collectivités territoriales, établissements publics, opérateurs, etc.) en s'appuyant sur le dispositif d'organisation de la réponse de sécurité civile (ORSEC) pour gérer la crise de manière cohérente.

Le cas échéant, le niveau national soutient les systèmes déjà en place par l'intermédiaire du Centre Opérationnel de Gestion Interministériel de Crise (COGIC). En tant que chef du gouvernement, le Premier ministre prépare et coordonne l'action des pouvoirs publics en cas de crise majeure ([Blanc, 2022](#)).

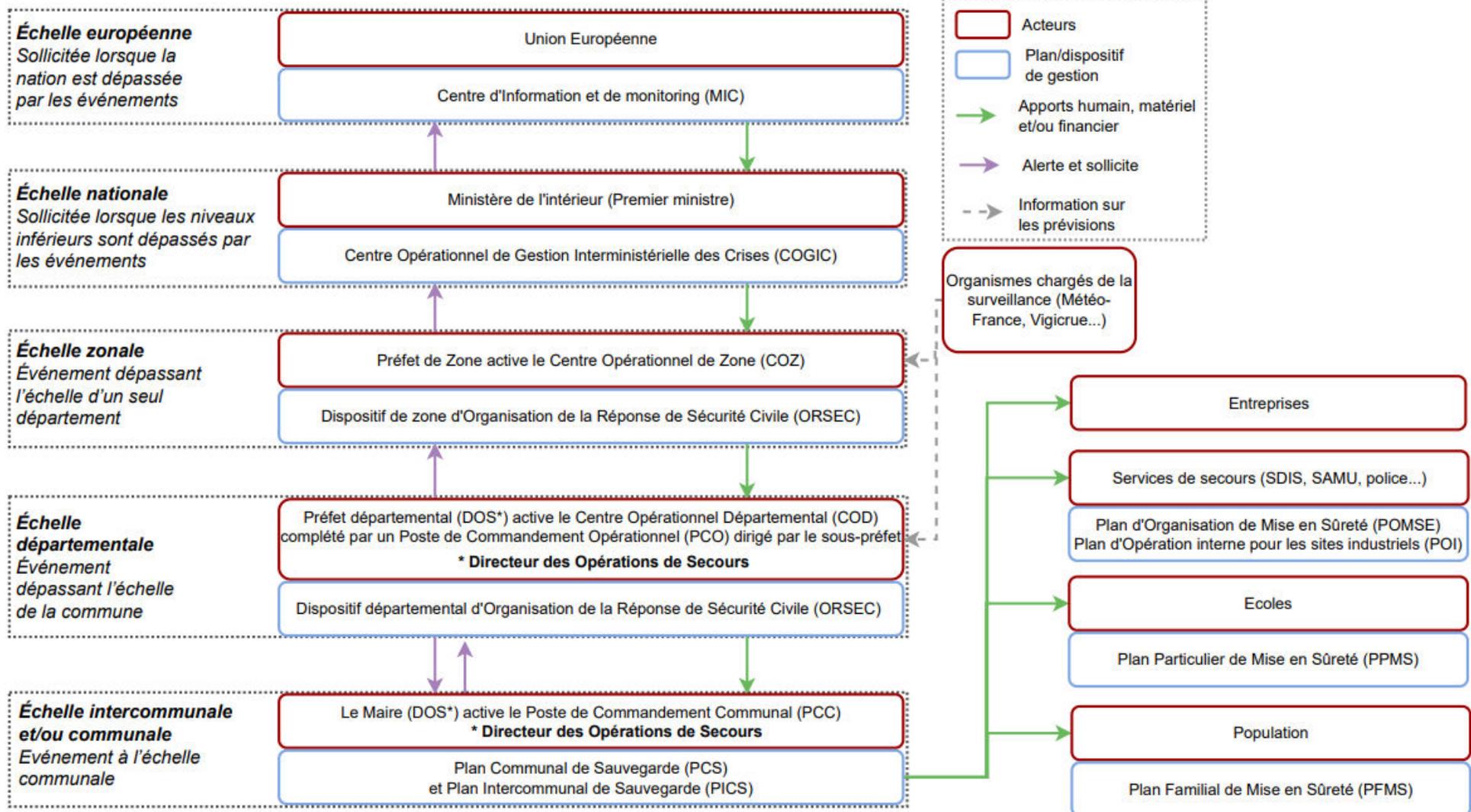


Figure 2 : Organisation face aux situations d'urgence en France selon différents niveaux et échelles d'actions (M2 Géoïdes, 2022, d'après les sources suivantes : interieur.gouv.fr ; Rousselon, 2013 ; Episeine, 2021 ; Blanc, 2022 ; Retailleau, 2022).

## 2. Le cas d'étude de la tempête Alex

Après avoir vu comment la gestion du risque a évolué en France et comment elle s'organise, un premier exemple est étudié. Le but est ici, en se basant sur un aléa précis, de comparer la gestion de crise mise en place sur le terrain à l'échelle communale avec la gestion de crise attendue. Un inventaire des documents en lien avec les risques naturels avant et après la tempête est réalisé dans le but de mettre en avant l'impact d'un aléa sur l'évolution de la gestion de crise.

L'étude de cas se concentre sur la commune de Saint-Martin-Vésubie (Figure 3). Elle est située dans le département des Alpes-Maritimes, à la confluence entre le Boréon (bassin versant = 65 km<sup>2</sup>) à l'ouest de la commune et la Madone de Fenestre (bassin versant = 37 km<sup>2</sup>) à l'est. La commune se situe au sein du bassin versant de la Vésubie d'une superficie d'environ 395 km<sup>2</sup>. Sur une longueur de 45 km, la Vésubie transporte des sédiments essentiellement composés de gneiss, de granites, de schistes et de micaschistes dans ces haut-bassins. Le débit moyen décennal au sein de cette commune est de 107 m<sup>3</sup>/s et celui centennal est de 258 m<sup>3</sup>/s (SMIAGE, 2021). La Vésubie et ses affluents sont peu instrumentés. Cependant, il existe une station en aval estimant le débit de l'ensemble du bassin versant, localisée à Utelle au Pont du Cros, avant la confluence avec le Var et influencée par les prélèvements du canal de la Vésubie (SMIAGE, 2021). De plus, plusieurs équipements hydrauliques destinés à la production agricole, l'alimentation d'eau potable et la production d'hydroélectricité ont été installés sur la Vésubie.

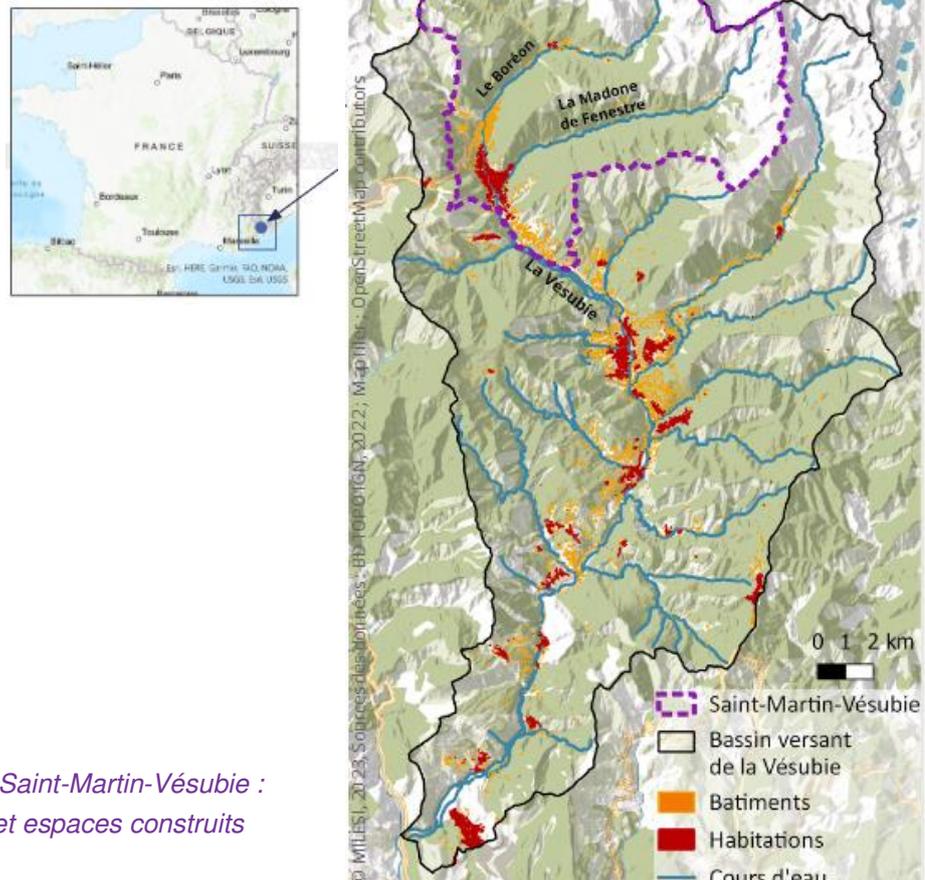


Figure 3 : Commune de Saint-Martin-Vésubie : réseau hydrographique et espaces construits (M2 Géoïdes, 2022).

La tempête Alex est associée à une dépression atmosphérique qui s'est formée dans l'Atlantique Nord le 30 septembre 2020. Elle a touché les côtes de la Bretagne le 1er octobre avant de former un flux de sud rapide et massif sur la Méditerranée. L'air chaud et humide a touché les Alpes, provoquant de fortes pluies dans les Alpes-Maritimes. Le vendredi 2 octobre, le département des Alpes-Maritimes est placé en vigilance rouge « Pluie-Inondation » et vigilance orange « Vagues-Submersion » pour le littoral. La **Figure 4** montre les cumuls de pluie mesurés dans le département, ceux-ci étant exceptionnels sur le bassin versant de la Vésubie avec 300 à 400 mm tombés en 24 heures et jusqu'à 500 mm à Saint-Martin-Vésubie, représentant 1 à 2 mois de pluies ([Météo-France, 2020a](#)). Cette commune enregistrant le cumul de précipitations le plus élevé, battant tous les records tous mois confondus en 24, 48 ou 72 heures à l'échelle départementale, est apparue intéressante à étudier afin de comprendre la gestion de crise communale.

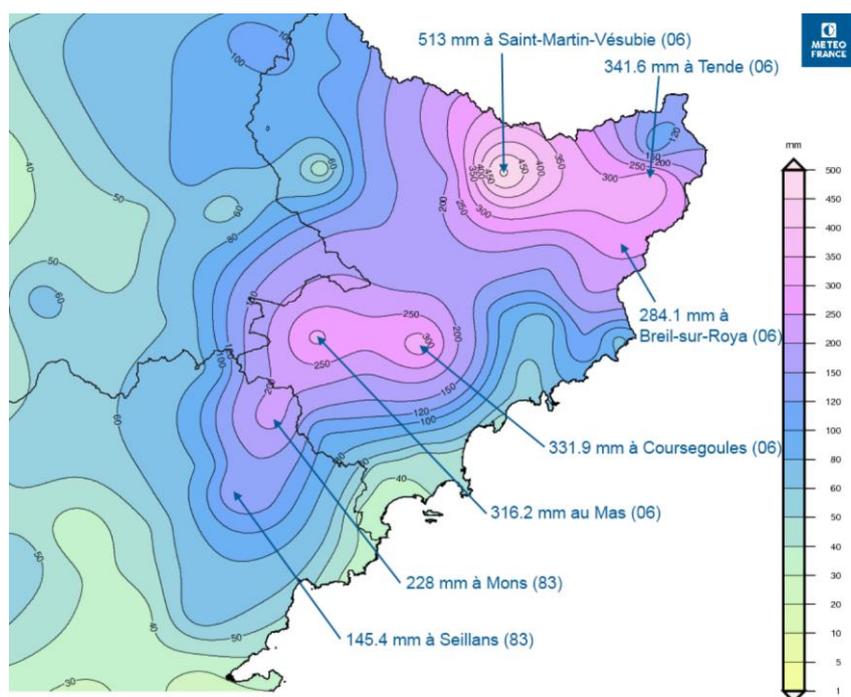


Figure 4 : Cumul des précipitations en 24 heures du 02/10/2020 à 06h UTC au 03/10/2020 à 06h UTC ([Météo-France, 2020b](#)).

## 2.1. AVANT : état des lieux et contexte à Saint-Martin-Vésubie avant la tempête Alex

### 2.1.1. Retour d'expérience de grands événements dans le département des Alpes-Maritimes

La période d'étude considérée ici comme « avant la tempête Alex » commence au début des années 2000. Dans un premier temps, les retours d'expérience des événements passés sont toujours pris en compte dans la gestion des risques. Les inondations de 2015 et 2019 dans le département des Alpes-Maritimes constituent le point de départ de l'analyse de l'évolution de la gestion des risques dans la commune de Saint-Martin-Vésubie.

Les inondations à Cannes et Mandelieu du 3 octobre 2015 ont fait 20 morts et des dégâts à hauteur de 600 millions d'euros (Cerema, 2021). Suite à cette crise, des grands axes de gestion ont été définis afin d'améliorer certains aspects clés dans la gestion de crise tels que les systèmes d'alerte et de communication, la direction des opérations de secours ou encore les réseaux (Cerema, 2021). De ces axes d'amélioration ont découlé des actions concrètes ayant pour objectifs d'anticiper et de limiter les futures crises. Tout d'abord, un règlement de vigilance est rédigé. En fonction des différentes alertes météorologiques émises par Météo France, le préfet communique les différentes mesures d'alerte à la population après avoir pris contact avec les services de Météo France. Suite aux inondations du 03 octobre 2015, la Journée Départementale des Risques Majeurs (JDRM) est créée et a pour objectif de développer la culture du risque dans les Alpes-Maritimes (Cerema, 2021). Chaque année, le 3 octobre, la préfecture des Alpes-Maritimes organise des actions de formation et de sensibilisation sur les risques majeurs. La JDRM associe l'ensemble des acteurs de la gestion de crise tels que les sapeurs-pompiers, les services de l'État et les collectivités, afin de préparer la population aux comportements à adopter en cas d'événements impliquant des risques majeurs. D'autres actions telles que l'accompagnement des collectivités dans la rédaction de leurs plans de sauvegarde ou encore le renforcement du lien entre le maire et le préfet vise à améliorer l'anticipation de futures crises ainsi que l'efficacité des échanges d'informations en temps de gestion de crise (Cerema, 2021).

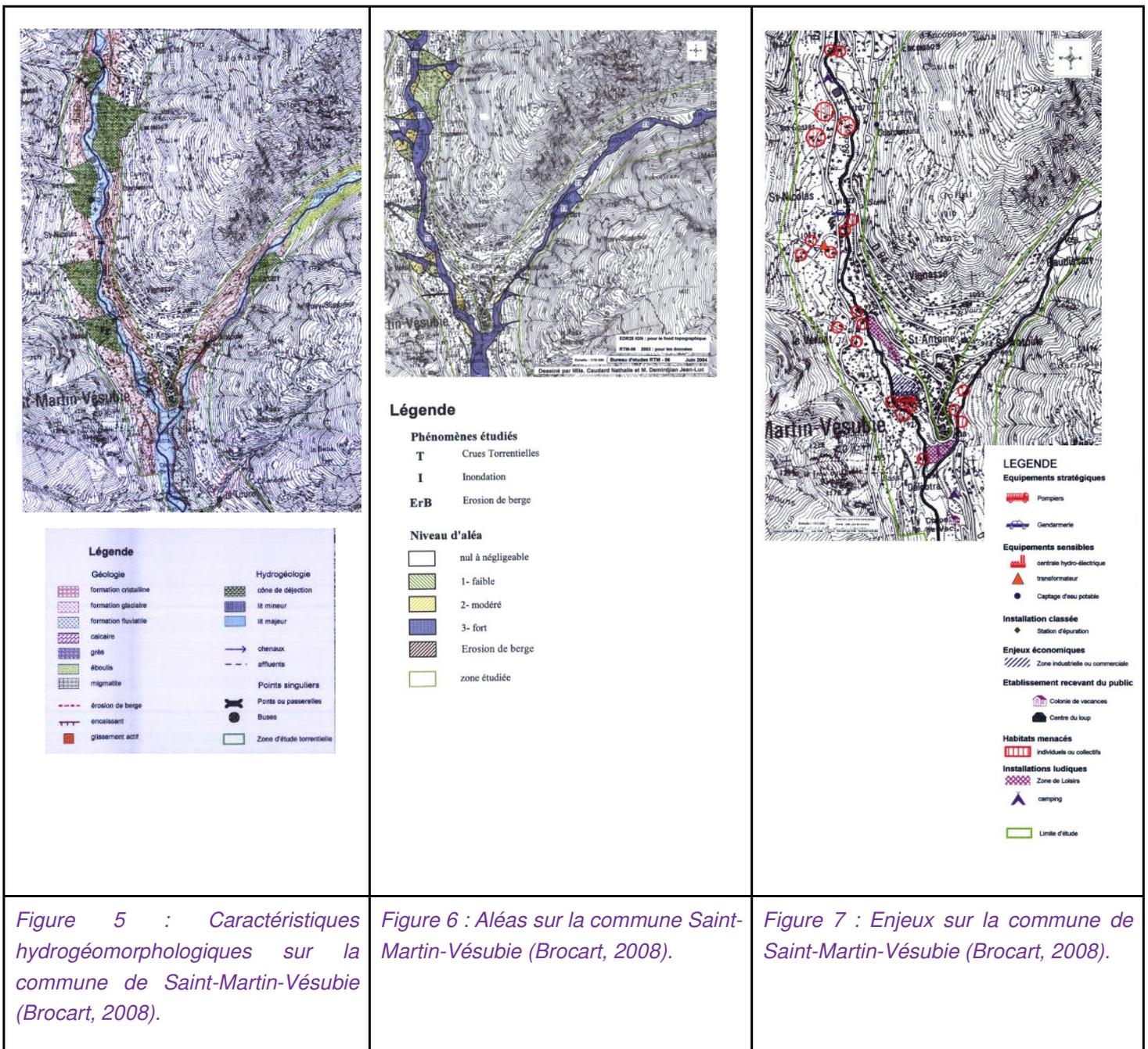
Les intempéries du 22 au 24 novembre 2019 sont les premiers événements majeurs survenus après les inondations de 2015 dans les Alpes-Maritimes (Cerema, 2021). Les retours d'expériences (RETEX) de 2015 ont permis d'améliorer la mise en vigilance et la communication auprès de la population ainsi qu'entre acteurs de la gestion des risques. D'autre part, les sirènes du Système d'Alerte et d'Information des Populations (SAIP) ont été activées pour la première fois dans les Alpes-Maritimes lors de ces événements. Le RETEX a, par ailleurs, rendu possible l'élaboration de nouveaux outils et dispositifs tels que le dispositif spécifique « inondations » (2019) ou encore l'appui et la contribution du Syndicat Mixte pour les Inondations, l'Aménagement et la Gestion de l'Eau (SMIAGE) (2017) (Cerema, 2021). Le SMIAGE contribue à la sensibilisation de la population et apporte un soutien technique et humain dans l'instrumentation des cours d'eau sur les territoires qui le souhaitent. Tous ces retours d'expérience contribuent à améliorer la gestion des risques au sein du département des Alpes-Maritimes ainsi qu'à Saint-Martin-Vésubie.

### **2.1.2. Outils de prévention mis à disposition de la population à Saint-Martin-Vésubie**

Dans un deuxième temps, il est important de s'intéresser aux outils de prévention qui accompagnent la population pour les préparer à faire face à une crise.

Depuis 2010, la commune de Saint-Martin-Vésubie met à disposition sur son site internet des cartes permettant à la population de se renseigner sur les phénomènes, les risques et les aléas présents sur le territoire. La carte hydrogéomorphologique (Figure 5) permet d'informer sur la géologie des sols mais aussi sur les caractéristiques hydrogéologiques des torrents

telles que les cônes de déjection et les lits majeurs. Les aléas possibles sur la commune sont présentés dans la carte des aléas (Figure 6). Cette dernière permet de visualiser les phénomènes étudiés à Saint-Martin-Vésubie (crues torrentielles, inondations et érosions de berges) en fonction du niveau d'aléa (nul à négligeable, faible, modéré ou fort). Enfin, la carte des enjeux (Figure 7) renseigne sur la localisation des équipements stratégiques (caserne de pompiers et gendarmerie), des équipements sensibles (centrale hydro-électrique, transformateur et captage d'eau) et des installations classées, ici la station d'épuration. Cette carte indique aussi l'emplacement de la zone industrielle ou commerciale, des établissements recevant du public, des habitats menacés et enfin renseigne sur les installations ludiques.



Concernant la prise en compte des risques dans l'aménagement et l'urbanisme, la commune possède un PPR. Ce document, prescrit en 2002, contient le plan de zonage présentant, au regard du risque inondation et de l'urbanisation, les zones de danger, de précautions et non exposées. Le PPRI (Figure 8), élaboré en 2008, présente aussi les zones d'aléas torrentiels et celles où l'aléa est nul à négligeable.

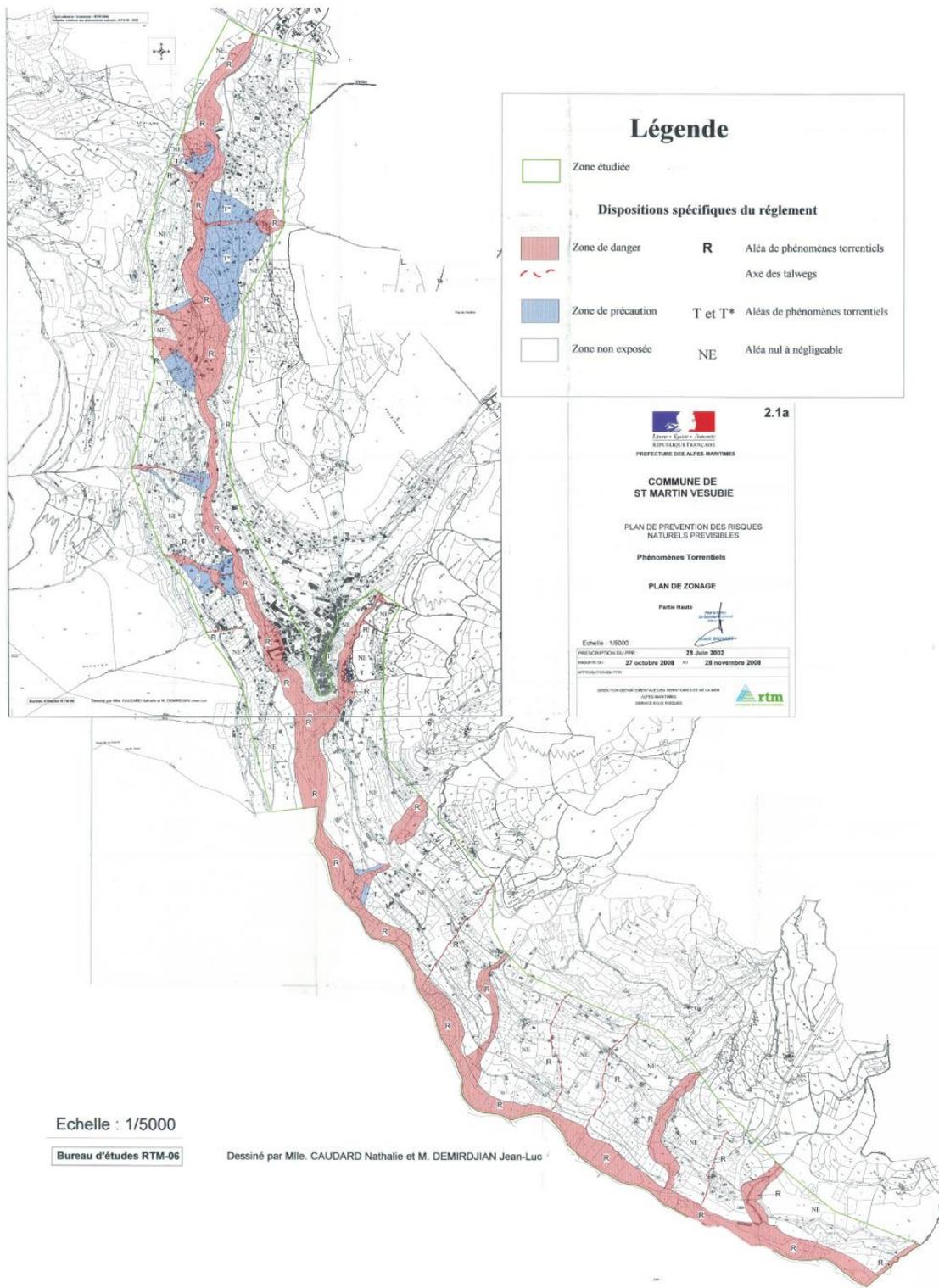


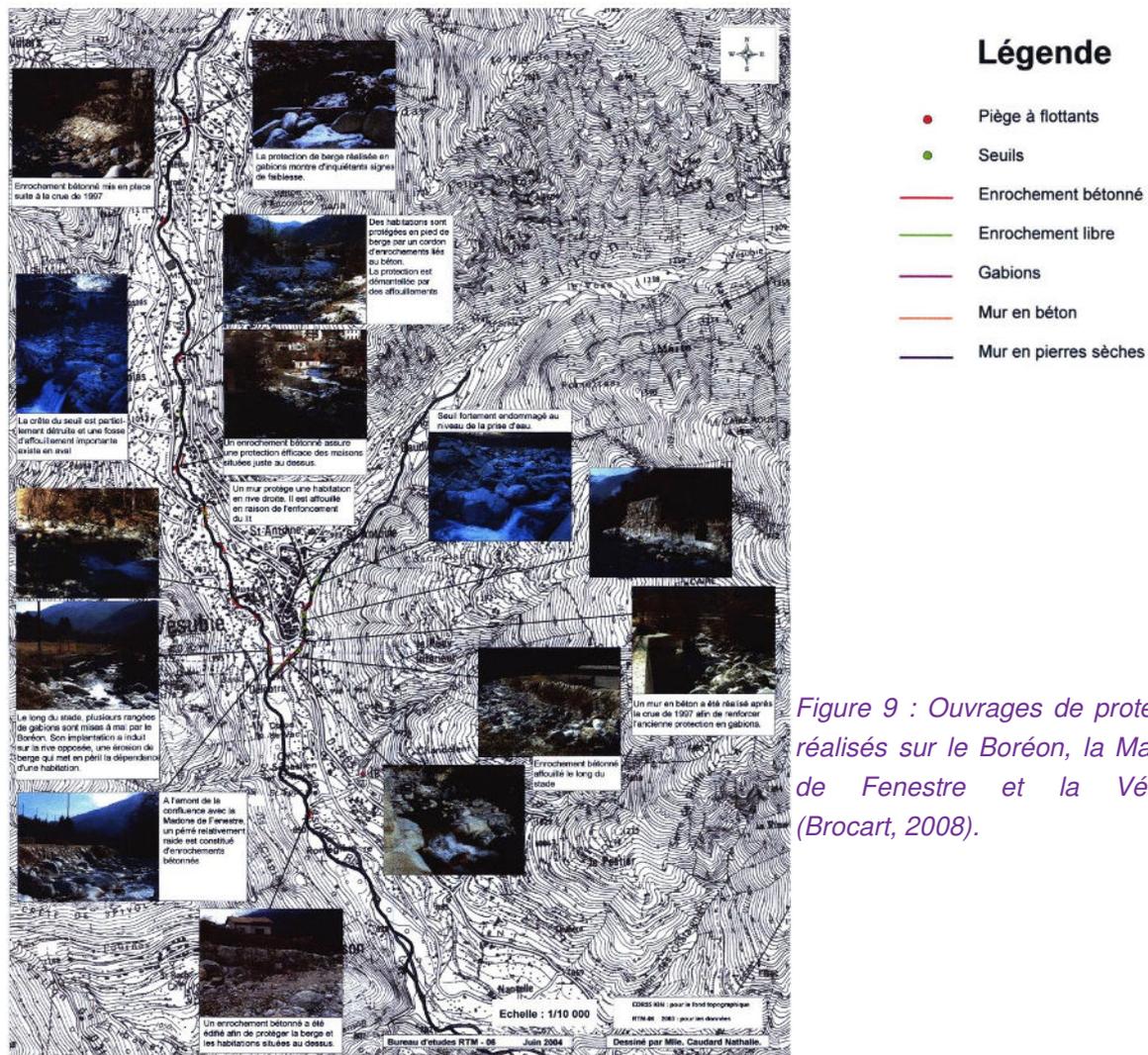
Figure 8 : Plan de Prévention du Risque Inondation de la commune de Saint-Martin-Vésubie (Brocart, 2010).

### 2.1.3. Préparation et anticipation de futures crises

Avant la tempête Alex, en termes de préparation de la population, la commune de Saint-Martin-Vésubie disposait seulement d'un Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM) élaboré en 2016. Ce document, accessible à tous, [DICRIM\\_scan.pdf \(saintmartinvesubie.fr\)](#) a pour objectif de renseigner la population sur les risques naturels et technologiques présents sur un territoire donné.

D'après une interview réalisée avec Alain Jardinet, adjoint au maire de la commune de Saint-Martin-Vésubie, le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) a été élaboré en 2016. Cependant, le nouveau conseil municipal n'a pas eu le temps de diffuser les informations qui le composaient aux acteurs concernés, il était « seulement couché sur le papier » (A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).

La commune a aussi élaboré une carte des ouvrages (Figure 9), disponible dans le PPR, qui localise et donne des informations sur les ouvrages réalisés à titre de protection ou à la suite d'événements ayant eu un impact significatif sur la commune. La carte expose les ouvrages réalisés sur la Vésubie, la Madone de Fenestre et le Boréon.



D'un autre côté, la sirène permettant d'avertir l'ensemble de la population de manière efficace et simultanée a été supprimée 15 ans plus tôt (A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022). Par ailleurs, les applications de prévention installables sur mobile (notamment MyPredict) n'avaient pas encore été développées sur la commune. Il en est de même pour les exercices et la sensibilisation de la population (A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).

#### **2.1.4. Moyens de surveillance à Saint-Martin-Vésubie**

L'anticipation des crues peut être facilitée par l'utilisation d'outils tels que le service Vigicrues. Mis en place en 2006 par le ministère chargé de l'écologie, ce service a pour objectif d'informer sur le risque de crues des principaux cours d'eau en France (Figure 10) (Géorisques, 2022). La station d'Utelle [Pont du Cros], située à l'aval de la commune de Saint-Martin-Vésubie, surveille les hauteurs de l'eau et les débits sur la Vésubie (Vigicrues, 2022).

De plus, Météo-France utilise les modèles AROME et ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) permettant d'acquérir et d'intégrer des données fiables afin de réaliser des prévisions correctes à court terme (plusieurs prévisions par jour). Le modèle AROME, développé en 2008, a une visée opérationnelle permettant une amélioration des prévisions à court terme (maximum 48h) des phénomènes dangereux (CNRM, s.d.-a). Le modèle ARPEGE, utilisé depuis plus de 30 ans, est un modèle de prévision à l'échelle planétaire prenant en compte de nombreuses et diverses données (stations terrestres, radiosondages, mesures avion, bateaux, bouées...) (CNRM, s.d.-b).



Figure 10 : Organisation du service vigicrues (Ministère de la transition écologique, 2022).

## **2.2. PENDANT : gestion de crise pendant la tempête Alex**

### **2.2.1. Gestion de la crise**

En résumé, avant la tempête Alex, peu de documents liés aux risques naturels étaient présents sur la commune et les systèmes d'alertes de la population étaient inexistantes. Il est donc intéressant de voir comment la commune a réussi à gérer la crise malgré des élus jeunes et un manque d'outils de gestion disponibles. L'entretien avec Alain Jardinot permet de mieux comprendre l'enchaînement des événements de la tempête Alex dans la commune de Saint-Martin-Vésubie.

Grâce aux modèles météorologiques, l'intensité et la localisation des événements liés à la tempête ont pu être anticipés à partir du 30 septembre 2020. Les informations relatives ont été diffusées sur les réseaux sociaux et sur les plateformes météorologiques ([Zugasti & Merad, 2022](#)).

Le 2 octobre 2020 à 12h le département des Alpes-Maritimes est placé en vigilance rouge pour « Pluies-Inondations ». La Vésubie et le Boréon connaissent une crue majeure ([SMIAGE, 2021](#)). En effet, les pluies se sont intensifiées sur la commune de Saint-Martin-Vésubie le 2 octobre entre 12h et 14h ; c'est à ce moment que la mairie a décidé de se mobiliser pour venir en aide à la population. Dans un premier temps le personnel de la mairie, grâce à un fichier informatique répertoriant les personnes à risques (proches des cours d'eau), a donné des consignes simples (tel que de ne pas sortir et de monter aux étages supérieurs). Toutes les personnes à risques ont pu être contactées et un appel aux pompiers a été passé afin d'effectuer les premières évacuations.

A partir de 15h30, toutes les lignes téléphoniques et les radios ont été coupées. Saint-Martin-Vésubie est donc restée sans aides extérieures jusqu'au lendemain matin, où les premiers hélicoptères sont intervenus.

La première nuit, (du 2 au 3 octobre) ce sont environ 80 personnes qui ont été dans le besoin d'être relogées. Dans un premier temps, elles ont pu trouver refuge dans la mairie. En effet, celle-ci étant au centre du village et éloignée du lit de la rivière, a été épargnée. Grâce à l'aide des deux agences immobilières, les 80 personnes ont pu être relogées dans la même nuit. Pendant près de trois à quatre nuits, ces 80 personnes ont pu être relogées à chaque fois.

C'est seulement à partir du 3 octobre au matin que des aides extérieures ont commencé à se mettre en place en lien avec les pompiers et les gendarmes sur place. Ils ont pu commencer à intervenir pour évacuer les personnes dans le besoin par hélicoptère ou par voie routière (celles qui étaient praticables) ([Ministère de l'Intérieur et des Outre-mer, 2020](#) ; [Sirpa Gendarmerie, 2020](#)). Les gendarmes étaient cependant très occupés par la caserne qui fut détruite.

Pour Alain Jardinet, « l'ampleur des dégâts n'était pas prévisible ». Comme il l'explique, les limites du PPRI ont été dépassées : un chalet construit en zone blanche/bleu a totalement été détruit. Cette imprévisibilité a impacté la gestion de la crise en la rendant plus difficile, car « personne ne prévoyait un tel événement ». De plus, il serait nécessaire, selon son point de vue, de revoir les modalités en cas d'inondations et les moyens de sensibilisation (A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).

Les photographies et images aériennes (Figure 11 et 12) illustrent l'emprise de la crue lors du passage de la tempête dans le village et à la confluence de la Vésubie et du Boréon. Il peut être constaté que la rivière est sortie de son lit, détruisant un grand nombre de bâtiments en très peu de temps.



Figure 11 : Zones touchées par la crue et emprise de ce qu'il y avait avant la crue (Infoclimat, 2020).



Figure 12 : La situation avant/après la tempête Alex dans la commune de Saint-Martin-Vésubie. © images pré-catastrophe (esri world imagery - 2016), images post-catastrophe (pléiades, cnes 2020, distribution airbus ds) (Rémy Decourt pour Futura Sciences, 2020).

Les actions menées durant la tempête Alex à l'échelle départementale ont été présentées lors d'un webinaire organisé par le CEREMA en décembre 2021. Ce webinaire portait sur les leçons qui ont pu être tirées lors de cet événement naturel. La figure 13 permet d'apporter des informations complémentaires aux propos d'Alain Jardin.

A partir de la figure 13, une comparaison entre les actions menées par les autorités durant la tempête et la chaîne de gestion de crise proposée dans la première partie de cette étude (Figure 2) peut être effectuée. Les actions encadrées en bleu dans la figure 13 représentent cette comparaison et les actions qui peuvent rejoindre l'organisation de la gestion de crise à l'échelle nationale.

Premièrement, malgré toutes les actions mises en place à partir de l'après-midi du 1er octobre, aux alentours de 15h, et la publication des bulletins de Météo-France, il n'y a pas eu d'alerte vers les populations à l'échelle de la commune. Deuxièmement, le poste de commandement communal n'a pas pu être mis en place compte tenu de la rapidité de l'événement, mais un centre opérationnel départemental a été activé dès le 2 octobre à 7h. De cette façon, la gestion de la crise a été directement déclenchée par le préfet. Quelques heures plus tard, à 17h, l'activation du plan ORSEC suit bien la démarche opérationnelle prévue pour une crise. Le lendemain de la crise, le 3 octobre, à 7h30 une cellule 3e dimension et le niveau 3 du plan ORSEC, à 17h, ont été activés et les acteurs réseaux ont été mobilisés. La cellule 3D (intervention des corps aériens) n'apparaît pas dans le modèle de gestion de crise mais elles ont apporté une aide supplémentaire à la population.

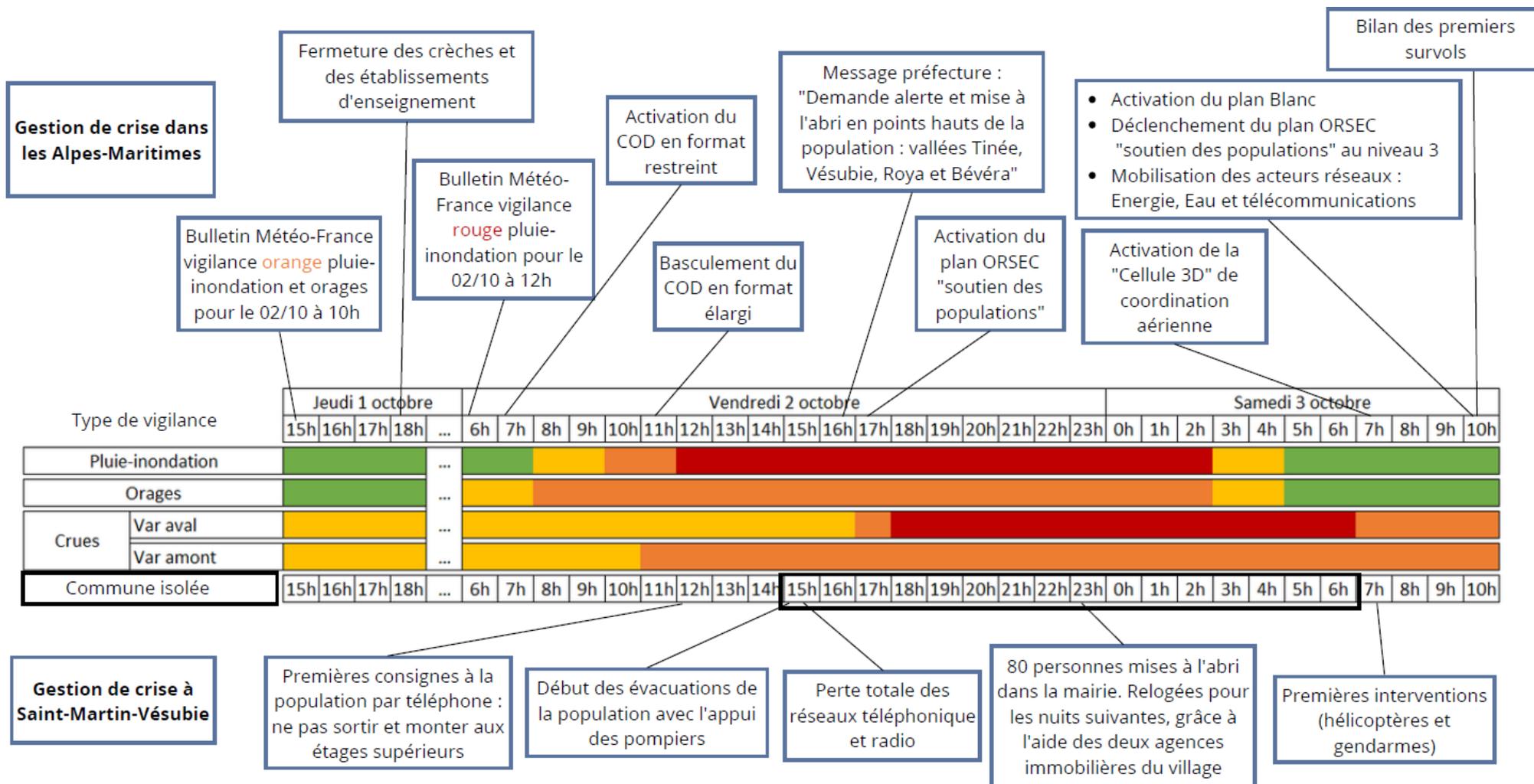
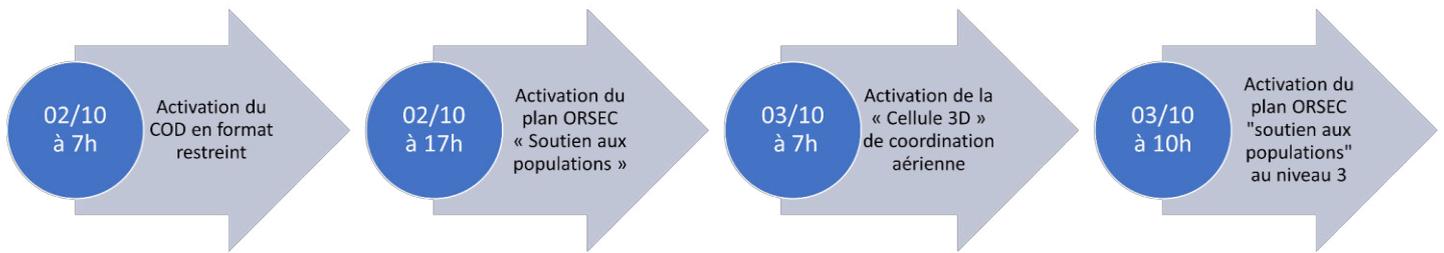


Figure 13 : Chronologie de la gestion de crise dans le département des Alpes-Maritimes du 1er au 3 octobre 2020 (M2 Géoïdes, 2023, adapté d'après Branchereau, 2021, avec source supplémentaire : A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).

La [figure 14](#) synthétise les actions menées par les autorités lors de la tempête Alex, à l'échelle départementale.



*Figure 14 : Principales actions d'une gestion de crise mises en œuvre lors de la crise de la tempête Alex (M2 Géoïdes, 2022, d'après Branchereau 2021).*

### 2.2.2. Bilan des dégâts humains et matériels

Au total, le bilan humain de cette crue est de 10 morts et 8 disparus ([Département des Alpes Maritimes, 2021](#) ; [Geufroi, 2021](#)).

La commune de Saint-Martin-Vésubie a également subi de nombreux dégâts matériels ([Figure 15](#)) tout comme d'autres communes du département des Alpes-Maritimes. Les dégâts les plus remarquables se résument à :

- 59 maisons totalement détruites dont 39 à Saint-Martin-Vésubie,
- entre 50 et 100 maisons très endommagées et fragilisées,
- 12 ouvrages d'art majeur détruits dont 2 ponts détruits à Saint-Martin-Vésubie,
- 32 routes coupées représentant 85 km de routes,
- 13 entreprises détruites,
- 2 cimetières détruits (363 sépultures emportées),
- en 2021, les estimations des dégâts varient de 850 millions d'euros ([Branchereau, 2021](#)) à 3 milliards d'euros ([SMIAGE, 2021](#)).

(Sources : [Fredj & Teobaldi, 2020](#) ; [Branchereau, 2021](#) ; [SMIAGE, 2021](#))

La [figure 15](#) localise l'ensemble des dégâts sur la commune de Saint-Martin-Vésubie selon trois catégories : détruits, endommagés, possiblement endommagés.

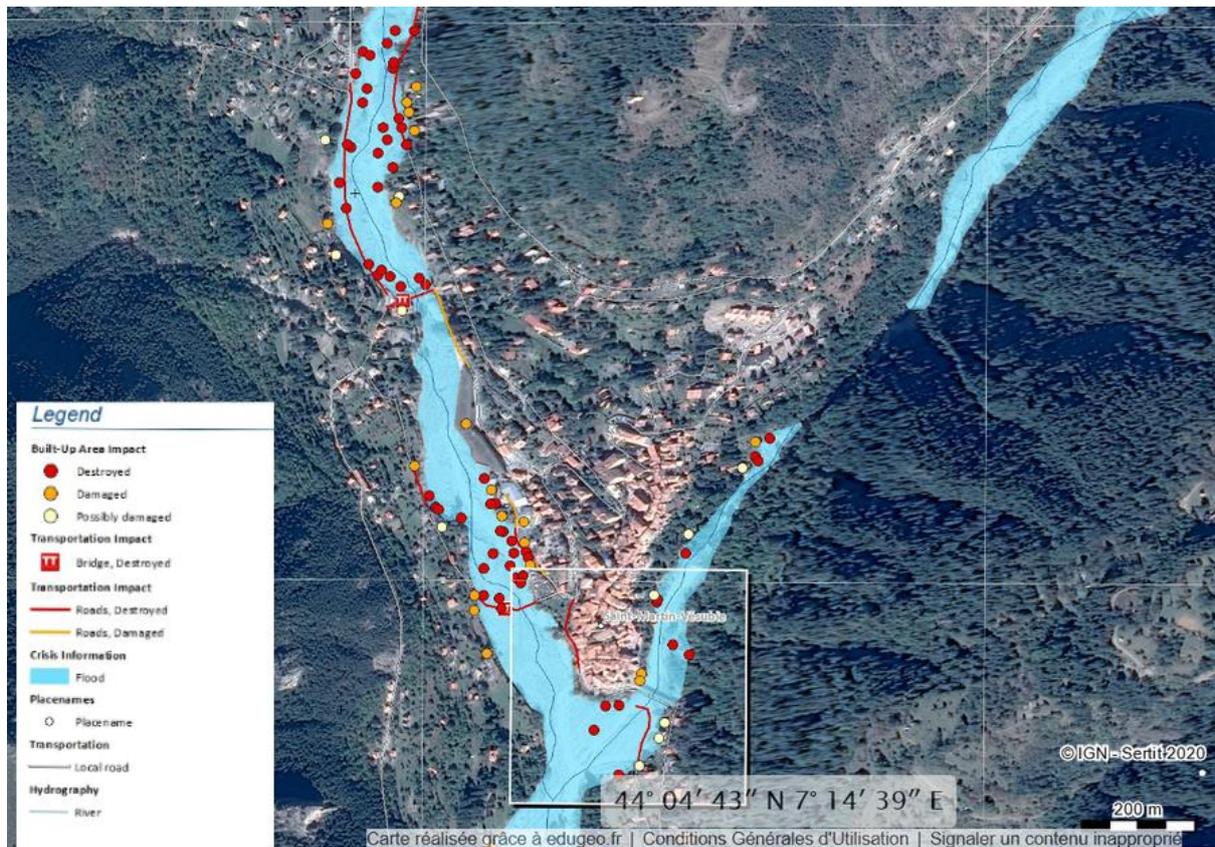


Figure 15 : Localisation des dégâts à Saint-Martin-Vésubie (IGN - Sertit, 2020) (Rémy Decourt pour Futura Sciences, 2020).

### 2.2.3. Bilan des moyens humains mis en place

À plus petite échelle, cet événement a nécessité d'importants moyens humains qui ont été engagés par le département (à noter que les chiffres peuvent varier selon les sources) :

- 492 agents départementaux dont 350 agents d'exploitation des routes, 100 agents Force 06, 12 agents des Parcs naturels et 30 agents manutentionnaires,
- entre 384 et 500 gendarmes départementaux, mobiles et réservistes du département renforcés par des aides extérieures,
- 45 agents du Syndicat Mixte pour les Inondations, l'Aménagement et la Gestion de l'Eau maralpin (SMIAGE),
- entre 725 et 777 sapeurs-pompiers déployés sur le terrain dont près de 400 extérieurs au département,
- 133 militaires.

(Sources : Département des Alpes-Maritimes, 2020 ; Sirpa Gendarmerie, 2020 ; Département des Alpes-Maritimes, 2021)

D'un point de vue technique, ce sont 1230 missions aériennes qui ont été réalisées sur le département des Alpes-Maritimes et 610 interventions de secours (Fredj & Teobaldi, 2020) avec au total 5229 personnes transportées (Branchereau, 2021).

## **2.3. APRES : conséquences de la tempête et adaptations du territoire**

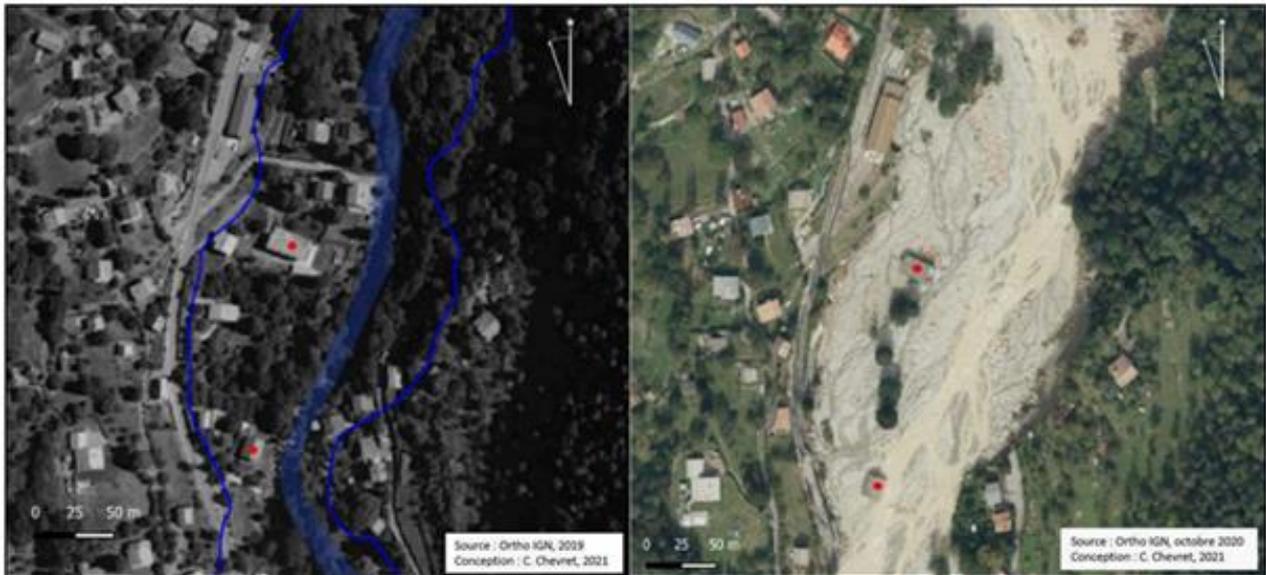
Après le passage dévastateur de la crue, les conséquences qui en découlent sont considérables. Cette partie sert d'appui pour analyser les conséquences à la fois sur l'environnement et sur les infrastructures de la commune, après le passage de la tempête Alex. Ces conséquences entraînent à la fois des questions de mobilisation d'acteurs, d'aménagement et de financement. Cependant, dans un territoire touristique dynamique, des problèmes d'adaptations, après le passage de la crue, se posent. Cette sous-partie consiste alors à identifier les trajectoires d'adaptations en termes de gestion des risques.

### **2.3.1. Conséquences environnementales de la tempête Alex sur la commune : modifications du fond de vallée**

Après son passage sur la commune de Saint-Martin-Vésubie, la tempête Alex a laissé un paysage complètement transformé. Pour cartographier ces changements, l'IGN a établi trois jours après la crue une campagne de photographies aériennes à la demande de la direction départementale des territoires et de la mer et de l'office national des forêts (IGN, 2021). Ces images sont mises à disposition de tous, sur le site Géoportail de l'IGN, et sont en particulier destinées aux acteurs concernés par la gestion de l'après-crise (services de l'État, collectivités locales, assurances, bureaux d'études...). Elles sont de réels atouts permettant une prise de décision plus rapide pour la réhabilitation de la vallée.

Ainsi, ces ortho-photos diachroniques aident à mesurer l'impact des intempéries. Il est notamment important pour les scientifiques de cartographier la zone inondée. Celle-ci sera prise en considération lors de l'élaboration du Porter à Connaissance (PAC) (Gonzales, 2021) et du Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN). La méthode a donc été de comparer ces images aériennes aux photographies et images satellitaires qui datent d'avant la crue.

La [figure 16](#) témoigne du changement majeur de la morphologie du lit de la Vésubie sur le territoire de la commune. Le tracé rectiligne (photo de gauche) a laissé place à une morphologie en tresse (photo de droite), en lien avec le dépôt considérable de sédiments et donc l'élargissement de la bande active. La largeur de la bande active de la Vésubie a été multipliée par cinq, voire par dix, dans certaines portions de la vallée. Les matériaux ont exhaussé le plancher alluvial de plusieurs mètres, comme on peut le voir sur la photo de droite (Rey *et al.*, 2022).



*Figure 16 : Impacts géomorphologiques et paysagers de la crue de la Vésubie à Saint-Martin-Vésubie. Sources : BD Ortho 2019 et BD Ortho octobre 2020, IGN 2020. Conception Chevret, 2021 (Rey et al., 2022).*

Comme évoqué, ce changement de morphologie provient du nombre considérable de sédiments transportés lors de la crue. La [figure 17](#) présente, sur la commune, les zones d'ablation (décrochage de sédiments) et d'accrétion (accumulation de sédiments). L'emprise de la crue est aussi cartographiée. Il peut être constaté que les matériaux mobilisés lors de la crue proviennent de plusieurs sources, notamment de la charge déjà présente, des versants et des vallons mais surtout des glissements de terrains. En effet, le passage brutal de la crue a eu pour conséquence de déstabiliser les berges ; ces déstabilisations ont entraîné au total 43 mouvements de terrain sur la commune ([Rey et al., 2022](#)). Ainsi de nouveaux cônes de déjection provenant des versants et des berges se sont formés. Sont alors remarquées des différences de recul des berges selon les rives de la vallée (notamment du Boréon). Plus généralement, c'est la rive droite qui a le plus reculé (de 30 à 70 m et jusqu'à 100 m par endroits), alors que la rive gauche, plus résistante et endiguée localement, a mieux résisté au courant, qu'elle a même parfois réfléchi en partie vers la rive opposée ([Rey et al., 2022](#)). Comme l'illustre la zone 3 sur la [figure 17](#), le cône de déjection (rive gauche) a forcé la crue à se rediriger vers l'autre rive, ce qui l'a fait reculer de 100 m environ.

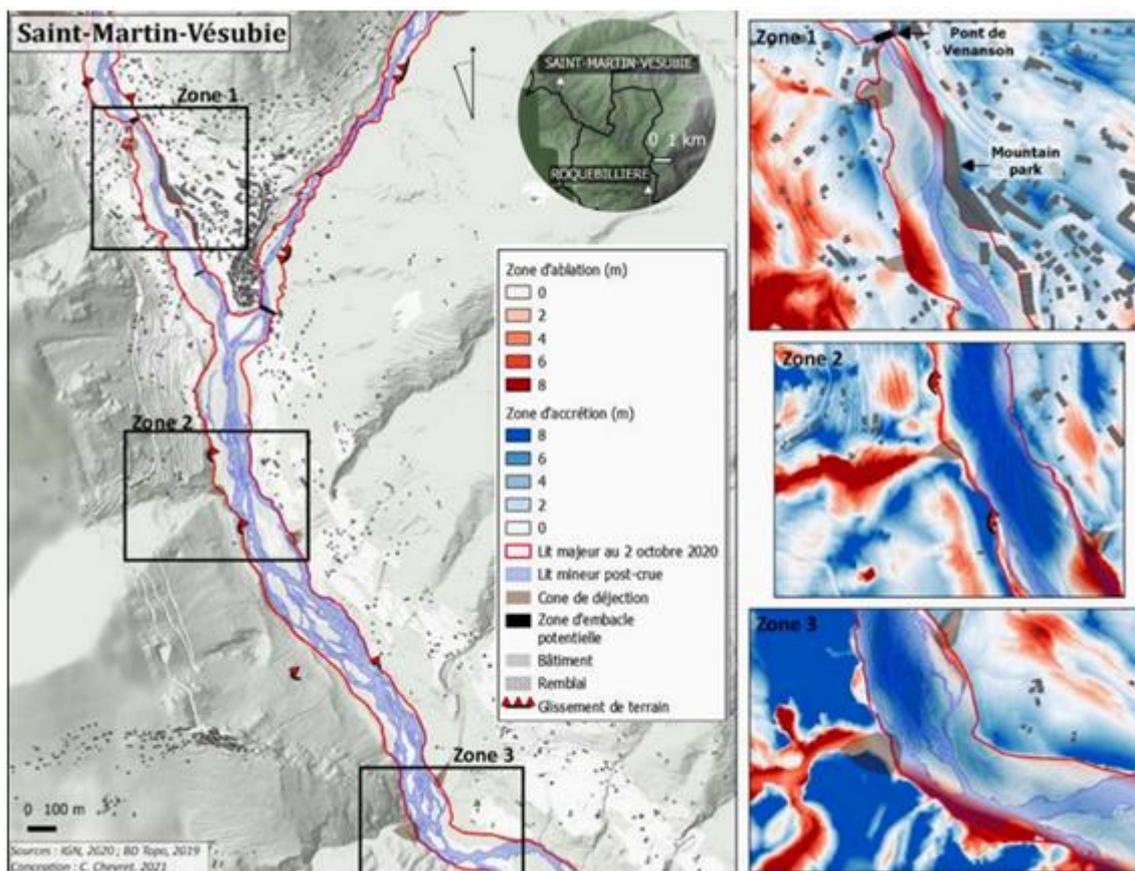


Figure 17 : Impacts morpho-sédimentaires de la crue torrentielle le long de la vallée de la Vésubie. Fond de figure : BD Topo 2019, IGN 2020. Conception Chevret, 2021 (Rey et al., 2022).

Ces reculs des berges ont entraîné de lourdes conséquences à la fois sur la destruction des infrastructures et sur les pertes humaines.

### 2.3.2. Conséquences sur les biens et les infrastructures de la commune

#### 2.3.2.1. Le besoin de réhabiliter les réseaux stratégiques

A partir du retour d'expérience de 2022 sur le volet torrentiel (Queffelec et al., 2022), et des propos de l'adjoint au maire de la commune de Saint-Martin-Vésubie, Alain Jardinot, il a été permis de recenser l'endommagement des réseaux et leurs conséquences, ainsi que leur remise en état. Du fait des conséquences évoquées précédemment, les destructions, les coupures et les dysfonctionnements des réseaux se sont multipliés sur le territoire, dégradant la sécurité des habitants, mais aussi l'économie.

#### **Le réseau routier**

Le réseau le plus impacté a été le réseau routier. Les routes ont été en partie détruites sous l'effet de l'érosion, de la déstabilisation des berges et des glissements de terrain. La crue torrentielle a emporté ou endommagé les ponts (exemple avec la photo 1 ci-dessous), ce qui, dans le même temps, a entraîné la destruction des réseaux d'eau, d'assainissement et d'électricité empruntant ces ponts. La commune s'est retrouvée isolée du reste de la vallée.



*Photo 1 : Vue amont du pont de Venanson sur la commune de Saint-Martin-Vésubie (Queffelec et al., 2022). Le pont endommagé ne permet plus de relier le centre de la commune aux quartiers périphériques. Celui-ci sera démantelé le 22 octobre 2021.*

Sans aucune voie de communication, il était impossible de transférer des ressources à la commune. C'est pourquoi les premiers travaux se sont tournés sur la reconstruction des routes. Ainsi, la mobilisation des acteurs locaux a permis de rouvrir rapidement, le jour même ou le lendemain de l'événement, plusieurs portions de route (A. Jardin, entretien du 16 décembre 2022). Les travaux de reconstruction ou de consolidation ont alors commencé dès octobre 2020 avec notamment la création d'infrastructures stratégiques (rond-point, passerelles et ponts) pour assurer la connectivité entre les routes coupées (Rey et al., 2022).

Cependant, la construction rapide de routes a posé un frein aux scientifiques pour établir l'emprise de la zone inondable, étant données les réparations rapides qui peuvent fausser les interprétations sur le terrain (Queffelec et al., 2022).

### ***Le réseau d'eau et d'assainissement***

Le second réseau primordial impacté a été celui de l'eau et de l'assainissement. Le réseau d'eau a été détruit sur environ 13 km entre le site du Boréon et le village de Saint-Martin-Vésubie. Dans le même temps, la commune a vu sa station d'épuration détruite après le passage de la crue. Les eaux usées se sont alors déversées dans la Vésubie. Ajouté à cela les routes et ponts détruits comportant les réseaux d'eau. De fait, pendant une semaine, le territoire communal n'avait plus d'eau courante. En attendant les canalisations permanentes, pour rendre l'eau potable accessible, le réseau d'eau détruit a donc été remplacé de façon provisoire par des installations tirées dans les rues, le temps de la finalisation des travaux.

Grâce à ces actions, quinze jours après la crue, 90% du territoire communal avait de nouveau de l'eau courante ([A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022](#)).

### ***Le réseau électrique***

Toujours à cause de la destruction et des équipements (routes, ponts...), le réseau électrique a rapidement été mis hors service, dès les premières heures de l'évènement : aux alentours de 12h le 2 octobre. Les dégâts estimés sont d'environ 15 millions d'euros ([Rey et al., 2022](#)). Sur la commune, le réseau électrique est géré par ENEDIS. Selon l'adjoint au maire de la commune de Saint-Martin-Vésubie, l'électricité est revenue au bout de 4 jours d'abord dans la mairie et pour 2 boulangeries. Le reste de la commune a retrouvé l'électricité au bout d'une semaine. Il s'avère qu'ENEDIS a mis en place trente-sept groupes électrogènes pour apporter de l'électricité. Une importante intervention donc qui a mobilisé une centaine de techniciens d'ENEDIS et des prestataires. En attendant la construction définitive des routes, les installations électriques sont toujours provisoires.

### ***Le réseau téléphonique***

Enfin les derniers réseaux essentiels touchés lors de la crue sont les lignes téléphoniques. A partir du lendemain soir, certains réseaux mobiles ont été remis en place. En effet, les réseaux Bouygues Telecom et SFR étaient disponibles en hertzien le lendemain de la crue alors que les réseaux de l'opérateur Orange ne l'étaient plus et la restauration des réseaux téléphoniques est encore aujourd'hui en cours ([A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022](#)).

#### **2.3.2.2. Les problèmes posés par les bâtiments détruits ou endommagés**

Le recensement des dégâts sur le bâti est introduit dans la partie précédente (cf [Partie 2.2. Pendant](#)). Suite à ces destructions, des questions de reconstruction, réhabilitation ou démolition se sont posées en attendant les financements et la mise à jour des documents d'urbanisme et se posent encore aujourd'hui ([Fredj & Teobaldi, 2020](#)). C'est en effet le cas avec l'exemple de la gendarmerie endommagée par la crue. Celle-ci a été démolie le 22 octobre 2020, au même titre que le pont de Venanson le même jour. Démolition convenue donc suite à une prise de décision rapide. Cependant tous les bâtiments endommagés ne seront pas tous détruits ou reconstruits, et ce, dans le même temps. Le choix dépend du zonage du Porter à Connaissance réalisé quelques mois après la catastrophe.

Or pendant ce temps d'attente, les bâtiments pas encore détruits et ayant subi des dégâts rappellent aux habitants la catastrophe. Un rappel donc d'angoisses que les habitants veulent oublier au plus vite ([Vitiello, 2021](#)). De plus, la commune connaît une peur du squattage. Les bâtiments peuvent s'effondrer à tout moment et engendrer des pertes malencontreuses.

### 2.3.2.3. L'enjeu financier

La reconstruction de la commune nécessite un déblocage de fonds au vu des dégâts laissés par la tempête Alex. En effet, en 2021, les estimations des dégâts varient de 850 millions d'euros (Branchereau, 2021) à 3 milliards d'euros (SMIAGE, 2021) sur l'ensemble de la vallée. D'après l'adjoint au maire de Saint-Martin-Vésubie, l'arrêté reconnaissant l'état de « Catastrophe Naturelle » a été prononcé dès le 7 octobre 2020, soit 4 jours après l'occurrence de la crue sur la commune. De fait, l'ensemble de la vallée a pu bénéficier des aides financières des assurances et de l'Etat. Ainsi l'Etat a pu collecter via différents fonds 572 millions d'euros (Figure 18). L'enveloppe comprend les crédits de la dotation de solidarité pour la reconstruction des infrastructures publiques gérées par les collectivités locales (143 M€), le fonds de solidarité de l'Union européenne (59 M€), le fonds Barnier (120 M€) et le fonds de compensation de la TVA (100 M€) mais aussi une enveloppe exceptionnelle de 150 millions d'euros distribuée par l'Etat pour mener à bien les projets futurs d'aménagement résilients (TPBM, 2022).

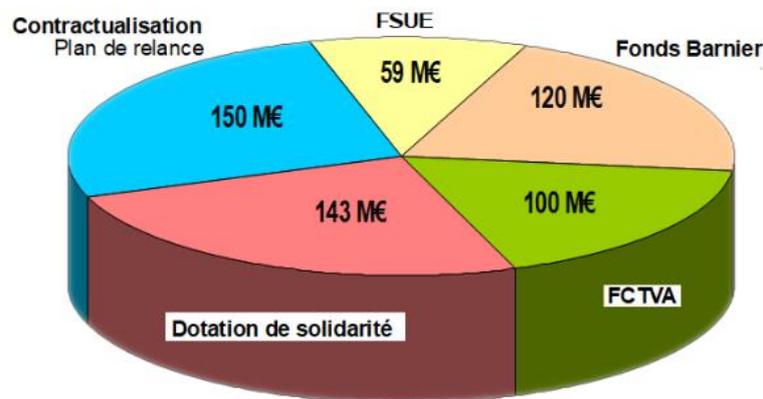


Figure 18 : Montant et sources de financement pour restaurer la vallée de la Vésubie (CEREMA, 2021).

Dès décembre 2020, 25 M€ ont été utilisés par la vallée de la Vésubie. Un déblocage de fonds finalement rapide pour relancer au plus vite la vallée. Ceci est aussi justifié par le déblocage du fonds Barnier, perçu au mois d'août 2021. En effet, l'adjoint au maire de la commune de Saint-Martin-Vésubie souligne la rapidité de la mise à disposition de ce fonds, où le même fonds a été déblocqué 7 ans après pour les biens impactés lors de la crue de 2015.

Cependant certains propriétaires ont contesté les montants proposés par le fonds Barnier (Queffelec *et al.*, 2022), contestations qui relancent les calculs des montants et qui de fait ralentissent les reconstructions.

Finalement, ce déblocage de fonds démontre un accompagnement des collectivités locales par l'Etat mais aussi par l'Union Européenne dans la reconstruction résiliente de la vallée.

### **2.3.3. Réduction de la vulnérabilité de la commune en adaptant les documents techniques et l'aménagement du territoire**

Après le passage de la tempête Alex, les enjeux à court terme se concentrent sur la réhabilitation des réseaux stratégiques et la mise en sûreté des populations. A moyen et long terme, les enjeux s'orientent autour de l'aménagement du territoire conciliant la résilience des nouvelles constructions. Pour cela, les documents techniques doivent prendre en compte tous les aléas auxquels est soumise la commune tout en intégrant une approche intercommunale.

#### **2.3.3.1. Adaptation de la législation indispensable à la reconstruction de la commune**

##### ***Modification des documents techniques***

La commune de Saint-Martin-Vésubie, habituée aux crues, possède lors de la tempête Alex deux documents réglementant l'urbanisme aux abords des cours d'eau. Le PPRI a été approuvé en 2002 et en 2006 un Atlas des Zones Inondables (AZI) vient préciser les zones susceptibles de subir des aléas. Le PPRI fait suite aux inondations survenues de manière récurrentes durant les années 90 et début 2000. En 2015, la commune connaît également un épisode de crue n'entraînant aucune modification du zonage dans les documents.

Cependant, la réglementation et les délimitations établies par les documents en vigueur se retrouvent dépassés face à l'intensité de la tempête Alex et l'ampleur spatiale de l'aléa. C'est ainsi ce que la [figure 19](#) démontre : les bâtiments en zone à risque majeur du PPRI sont tous détruits sans exception (160 bâtiments). D'autres bâtiments situés hors du zonage sont détruits ou touchés (56 bâtiments), ce qui montre l'inadaptation des documents face à l'emprise spatiale du lit majeur en octobre 2022. De plus, des bâtiments indispensables à la gestion de crise et à la vie dans la commune ont été détruits ou fortement endommagés comme la gendarmerie, le pont de Venanson ou encore la station d'assainissement ([Rey et al, 2022](#)).

Les limitations du PPRI sont fondées sur une crue centennale avec une emprise spatiale du lit majeur largement sous dimensionnée. Cependant, la délimitation de zone à risque par l'AZI se trouve être meilleure que celle du PPRI, « seuls 6 % des habitations détruites se situaient hors zone AZI » ([Rey et al, 2022](#)). En tout, 62 % des zones couvertes par le PPRI ont été impactées ([Rey et al, 2022](#)).

Enfin, en dehors du zonage inadéquat face à la crue, aucun document ne prend en compte d'autres risques à Saint-Martin-Vésubie. Néanmoins, la commune a subi 43 mouvements de terrain postérieurs/associés à la tempête, ce qui a entraîné de nombreux dégâts supplémentaires dus à la crue ([Rey et al, 2022](#)).

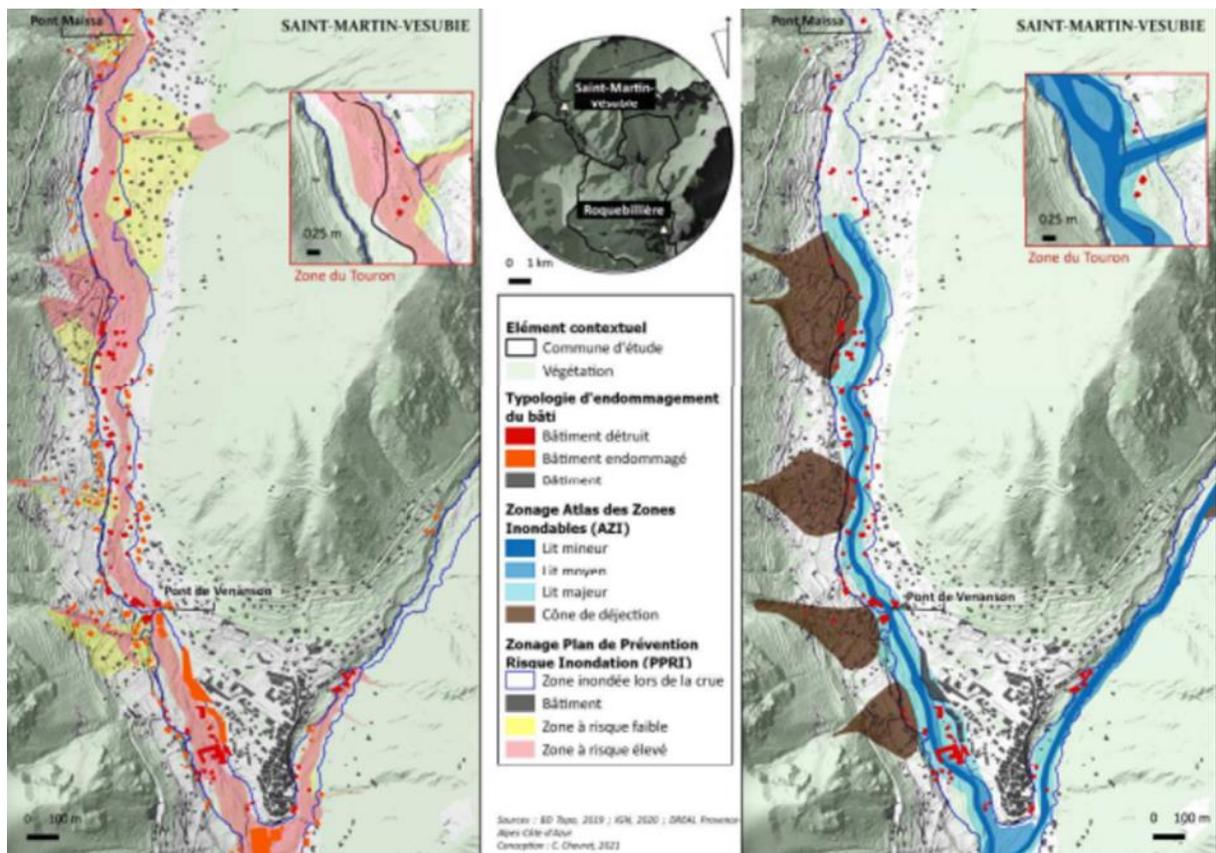


Figure 19 : Localisation des bâtiments endommagés ou détruits et comparaison de l'enveloppe de crue délimitée au 2 octobre 2020 avec les zonages PPRI (à gauche) et AZI (à droite) à Saint-Martin-Vesubie (Rey et al., 2022).

En 2021 un Porter à Connaissance (PAC) est élaboré, délimitant les nouveaux zonages grâce aux images préalablement recueillies. Ce document se superpose alors au PPRI et dicte les directives à suivre en termes d'urbanisme.

Ainsi, la tempête Alex devient la norme en termes de délimitation pour les documents afin de réduire la vulnérabilité du territoire face aux aléas.

### **Développement et amélioration des outils disponibles à échelle communale**

La commune s'est retrouvée dépassée par les événements et a eu du mal à gérer la crise. Pour y remédier quelques outils ont été développés notamment concernant l'alerte des habitants. En effet, l'alarme n'a pas sonné et la gendarmerie n'a pas eu le temps de sillonner toutes les rues. De plus, avec la coupure des réseaux stratégiques et la destruction de la gendarmerie, la commune est restée un jour sans aide extérieure. Afin d'éviter de revivre une catastrophe comme celle-ci, les élus mettent en place désormais des exercices d'inondation en temps réel afin d'être mieux préparés en cas de crue (A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).

De plus, les systèmes d'alerte des habitants sont renforcés avec l'augmentation sonore de l'alarme et la mise en place de l'application « MyPredict » (A. Jardinet, entretien du 16

décembre 2022). En parallèle, toujours selon l'adjoint au maire de Saint-Martin-Vésubie, la sensibilisation des habitants et des touristes est renforcée à travers un travail de mémoire.

L'évolution de la prise en compte des risques au sein de la commune a été nécessaire afin de mener à bien les projets de reconstruction. Le laps de temps nécessaire à la rédaction de prérogatives en termes d'urbanisme se confronte à l'urgence de la reconstruction des services indispensables au retour à la vie de la commune. Ainsi, l'enjeu réside dans les choix de localisation et de conception des nouvelles infrastructures résilientes au risque face aux besoins urgents de reconstruction (CEREMA, 2021).

### **2.3.3.2. Adaptation du territoire : un aménagement plus résilient face au risque**

#### ***Adaptation de la commune dictée par de nouveaux zonages et documents***

L'emprise spatiale du lit majeur provoquée par l'intensité de la crue de 2020 devient une nouvelle référence pour les documents, notamment au travers du PAC, s'imposant au PPRI. Les nouvelles zones délimitées dictent les règles de l'urbanisme et contraignent la reconstruction. Elles sont retranscrites par la [figure 20](#). Ces zones se déclinent en trois avec chacune une spécificité propre. La première (zone d'exposition directe) est située aux abords des cours d'eau et est soumise au principe d'inconstructibilité. Il est donc impossible d'y reconstruire des bâtiments ayant été détruits lors de la crue ou de nouvelles infrastructures à enjeux considérés comme sensibles. Seules des infrastructures de transport public ou techniques liées à l'utilisation des cours d'eau peuvent y figurer mais en respectant certaines conditions.

Cartographiée en rouge sur la [figure 20](#), ces zones comprennent les paramètres d'instabilité des berges, les bâtiments classés en noir ou en rouge du diagnostic bâtiminaire et les mouvements de terrain (Gonzales, 2021).

Ainsi, les nouveaux zonages prennent en compte plusieurs types d'aléas comme les surfaces inondées et les mouvements de terrain (Branchereau, 2021).

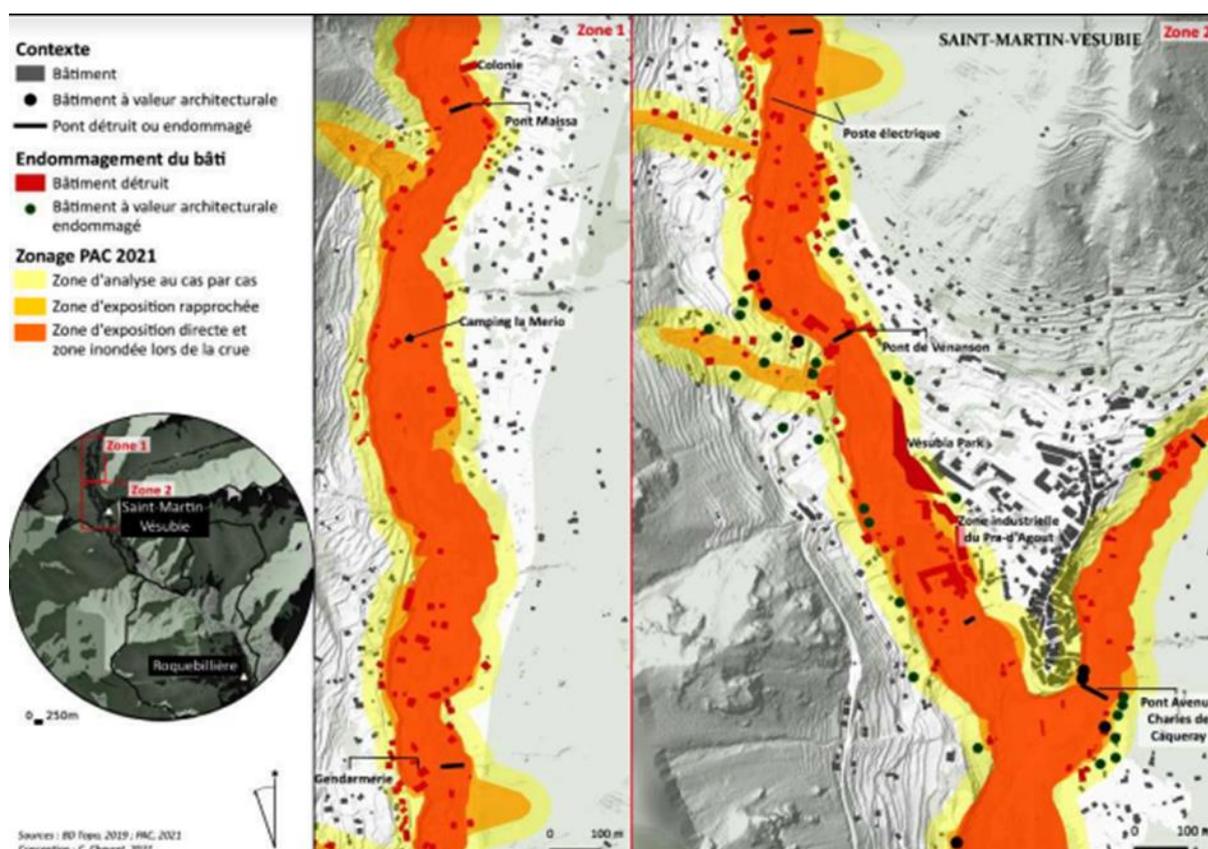


Figure 20 : Aléas crues torrentielles et mouvements de terrain à Saint-Martin-Vésubie, d'après les données du PAC, 2021. Source (Rey et al., 2022).

Les constructions réalisées en zone d'exposition directe et rapprochée (rayon de 10 m de large selon la couverture de la tempête Alex) doivent respecter des normes de résistance aux crues, les installations hydrauliques doivent être situées hors de l'eau. Cependant, ces zones restent inconstructibles pour toute construction résidentielle.

La zone de cas par cas s'étalant 10 m plus loin de la zone rapprochée, se trouve encore considérée comme potentiellement soumise à un risque. Elle se caractérise par la possibilité de construction en respectant plusieurs conditions.

L'élargissement de ces nouvelles zones engendre des problématiques de relocalisation des bâtiments initialement présents. En plus de respecter les normes de prévention et de protection, les bâtiments à enjeux sensibles tels que la gendarmerie et la caserne des pompiers doivent être reconstruits. Cependant, la configuration de la vallée et l'étendue du zonage du PAC laissent peu de choix quant à leur localisation (Queffelec et al., 2022).

Par ailleurs, les ouvrages de protection, fortement impactés par la crue, doivent être réhabilités selon les prérogatives du RTM exposées dans le RETEX. Les experts préconisent une reconstruction des digues limitant la chenalisation du cours d'eau afin de laisser un espace au cours d'eau. Par ailleurs, des zones sont laissées à des endroits stratégiques permettant la régulation du transport solide au niveau de la confluence de la Madone et du Boréon. Ainsi, les aménagements hydrauliques pensés par les experts prennent en compte la reconstruction

des axes routiers, difficilement localisables ailleurs, comme l'illustre la [figure 21](#). En effet, cette esquisse du RTM a pour but de mettre en évidence que le maintien de cette largeur de lit est compatible avec l'impératif de reconstituer les routes emportées par la crue. Cependant, la largeur du lit optimale doit être prise en compte afin de limiter les possibles débordements et faciliter le transport solide ([Queffeleau et al., 2022](#)).



*Figure 21 : Esquisse d'une préconisation de reconstruction des routes à 50-60 m du lit au niveau du Boréon à Saint Martin Vésubie par le RTM ([Queffeleau et al., 2022](#)).*

Le dernier frein à la reconstruction est lié aux montants des assurances avec plusieurs contestations. Cependant, d'après l'adjoint au maire de Saint-Martin-Vésubie, cela s'est plutôt bien déroulé tandis que le RETEX met en avant le manque de précisions du PAC et de communication entre les différents acteurs concernés (élus, citoyens...).

La catastrophe a impulsé la réalisation de nouveaux documents liés à la gestion de l'eau englobant une échelle plus large que Saint-Martin-Vésubie. C'est le cas de l'élaboration du PAPI (Programme d'Actions de Prévention des Inondations) qui propose une gestion du risque inondation à l'échelle du bassin versant du Var.

### ***Prise en compte du potentiel attractif et du développement économique de la commune dans les projets de réhabilitation***

La réhabilitation de la commune s'organise autour de plusieurs projets d'aménagement intégrant le développement et l'attractivité des vallées. L'enjeu principal réside dans la reconstruction des vallées tout en les rendant plus résilientes à travers plusieurs leviers, comme la modification de l'architecture du bâti.

Pour cela plusieurs acteurs entrent en jeu et s'organisent autour de comités, comme le comité d'évocation mis en place en mars 2021, ayant comme but de relocaliser les entreprises. Dans un même temps, le CEREMA organise également un comité d'évocation de la résilience et anime des missions autour de projets résilients. Ces projets intègrent aussi bien les élus que les citoyens dans une logique d'approche participative ([CEREMA, 2021](#)).

De manière concrète, ces projets résilients se retranscrivent dans la réalisation d'un plan dessiné par un architecte spécialisé dans l'adaptation aux risques pour la construction d'un nouveau quartier de 45 logements à Saint-Martin-Vésubie.

De plus, Saint-Martin-Vésubie se trouve dans la « suisse niçoise », territoire touristique proposant de nombreuses activités sportives et de loisirs. En effet, la commune comptait en 2018 plus de 1 401 résidences secondaires, soit 61 % des habitations présentes sur la commune. Afin de retrouver l'attractivité pré-catastrophe, des projets de réhabilitation de sentiers vont être menés pour retrouver l'affluence de touristes avant la tempête. L'année 2021 fut difficile pour les activités touristiques ; néanmoins, avec la reconstruction progressive de la commune, les touristes commencent à revenir en 2022 (Capelli *et al.*, 2022).

De plus, l'activité économique de la commune a été largement impactée avec des entreprises détruites par la tempête comme la brasserie du Comté située initialement au sud du village, aux abords du lit. A l'été 2022, cette brasserie a été reconstruite, ce qui redonne un nouveau souffle à la commune (Capelli *et al.*, 2022). Le préfet Xavier Pelletier estime que 80 % des travaux de reconstruction seront réalisés d'ici fin 2022 à début 2023 sur l'ensemble des vallées (Le Monde, 1 octobre 2022).

Enfin, une nouvelle tendance s'observe à Saint-Martin-Vésubie puisque des nouveaux arrivants s'installent dans la commune. Cette dizaine de nouveaux habitants ne sont pas originaires de la vallée et profitent du prix du foncier pour y construire.

De nouveaux projets d'aménagement voient également le jour dans la commune, avec la construction d'un stade d'eau vive, ce qui participerait au renouvellement de l'attractivité de la commune. Cependant, avec les contraintes urbanistiques de la commune aucun plan ou étude d'impact n'a encore vu le jour (Martin, 2022).

## **2.4. Conclusion sur l'évolution de la législation suite à la tempête Alex**

Bien que les événements hydrométéorologiques soient prévisibles, les dégâts engendrés par la tempête Alex permettent de conclure que les conséquences de ce genre de phénomène sont en revanche imprévisibles.

La tempête Alex a été un marqueur dans la gestion des risques, au moins dans la commune de Saint-Martin-Vésubie. Malgré l'isolation que la commune a connue au cours de la crise, elle a réussi à la gérer et à loger les habitants qui en avaient besoin. À partir de cette catastrophe, la commune a pu réévaluer les documents utiles à la gestion des risques naturels, tels que le PCS et le PPRI, ou en créer d'autres tels que le PAPI. De la même manière, le système d'alarme a été réactivé et la commune s'est inscrite au programme de l'application « MyPredict », afin que la population reçoive des notifications en cas d'une dégradation importante des conditions atmosphériques. Les outils de gestion des risques disponibles sur

la commune avant et après la tempête Alex ont donc évolué et ils sont résumés dans la figure 22.

Type de prévention	Outils	Préexistant à la tempête Alex	Elaboré/mis à jour suite à la tempête
Prévention : connaissance des phénomènes, des aléas et des risques	Carte hydro géomorphologique	Oui	Non
	Carte aléas	Oui	En cours d'élaboration
	Carte enjeux	Oui	En cours d'élaboration
Prévention : prise en compte des risques dans l'aménagement	PPRI	Oui	En cours d'élaboration
	PAPI	Non	Oui
	SAGE	Non	Non
Préparation et anticipation : information préventive et sensibilisation de la population	DICRIM	Oui	Oui
	Applications mobiles	Non	Oui
	Système d'alerte	Non	Oui
	Exercices/sensibilisation	Non	Oui
Préparation et anticipation : réduction de la vulnérabilité	Carte des ouvrages préexistants	Oui	Non
Surveillance : anticipation de la crise	PCS	Non	Oui

■ Oui

■ Non

■ En cours d'élaboration

Figure 22 : Évolution des outils de gestion des risques disponibles à Saint-Martin-Vésubie avant et après la tempête Alex (M2 Géoïdes, 2022).

En parallèle, un nouveau poste de préfet dédié entièrement à la reconstruction des vallées impactées a été établi et demeure encore aujourd'hui. En outre, la gestion préfectorale a été repensée après la crise. Cependant, il est possible de se demander si, pour atteindre une efficacité décuplée, il serait envisageable de repenser l'organisation suivie pour faire face aux situations d'urgence en France (Figure 2). Serait-il envisageable de créer des « cellules de crise » qui rassembleraient l'ensemble des acteurs concernés afin de limiter le nombre d'interlocuteurs et donc un gain de temps ? Des personnes en mesure de prendre des décisions directes lors de gros événements en faisant foi des différents niveaux et échelles d'actions pourraient-elles être définies ?

Ce premier cas d'étude a permis de démontrer l'efficacité d'une gestion de crise en France, sur un aléa connu et documenté d'un point de vue structurel mais également au niveau de sa gestion. Malgré l'ampleur de l'événement, une multitude de moyens (financiers, humaines, techniques) ont été mis en place pour lutter contre et le gérer le plus efficacement possible.

## 3. Risques d'origine glaciaires et périglaciaires (ROGP)

### 3.1. Synthèse des ROGP

Pour étudier la gestion des risques naturels dans les Alpes, une seconde étude de cas se focalise sur un groupement d'aléas tout autre, bien moins étudiés et ancrés dans la gestion des risques en France : les risques d'origine glaciaire et périglaciaire (ROGP). L'objectif est ici de comparer la connaissance de l'aléa et la gestion de risque encore récent.

Une classification des ROGP a été proposée par le PARN en 2013. La synthèse sur les ROGP du PARN propose de diviser les risques en trois catégories : les phénomènes liés à l'écoulement d'eau liquide, les phénomènes liés aux mouvements gravitaires de masses d'eau solide et les phénomènes périglaciaires. Cette classification est reprise dans cette partie, en l'illustrant d'exemples emblématiques dans les Alpes.

#### 3.1.1. Les phénomènes glaciaires issus d'eau sous forme liquide

L'eau sous forme liquide en milieu glaciaire peut conduire à des phénomènes issus de lacs glaciaires, supra glaciaires et proglaciaires. Dans ces milieux, des lacs peuvent en effet se former par accumulation des eaux de fontes et des précipitations sur les glaciers (lacs supra glaciaires) ou au front d'un glacier après son recul (lacs proglaciaires). Ces grandes masses d'eau ont le potentiel de se vidanger brutalement. Deux causes de rupture ont été identifiées : la fragmentation ou la rupture du barrage naturel qui a formé le lac (glacé, dépôts morainiques) ou la submersion du barrage suite à une chute de matériaux dans le lac (vêlage, éboulement).

Trois enjeux de gestion du risque liés aux lacs glaciaires et périglaciaires restent encore aujourd'hui discutés. Le premier est la détection de ces lacs, certes visibles, mais dont les formations peuvent difficilement être anticipées. De plus, les campagnes de recensement ne peuvent garantir une exhaustivité des résultats, et des lacs peuvent potentiellement ne pas avoir été observés. Le deuxième enjeu est celui de la caractérisation du lac (volume d'eau, stabilité du barrage), dont la grande variabilité dans le temps pose problème. Enfin, les risques en aval sont souvent difficiles à déterminer (modélisation d'écoulements).

Dans les Alpes françaises, deux sites font l'objet de suivis approfondis par les chercheurs et les services de l'Etat : le lac proglaciaire d'Arsine et le lac supraglaciaire de Rochemelon (PARN, 2012).

##### 3.1.1.1. Lac proglaciaire : le lac d'Arsine

Situé au cœur du massif du Pelvoux, dans le département des Hautes-Alpes, le lac est apparu dans les années 50 (première observation lors d'un vol IGN en 1952). Issu du retrait glaciaire, il se forme au creux des moraines laissées par le glacier d'Arsine, et se remplit progressivement.

En 1985, le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE, devenu

l'Institut des Géosciences de l'Environnement -IGE- suite à la fusion avec l'ex Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement -LTHE- en 2017) évalue le volume du lac à 800 000 m<sup>3</sup>, et le niveau du lac est repéré à 2 m du sommet de la moraine. Face au risque d'érosion de la moraine, et à ses potentielles conséquences désastreuses (vidange du lac impactant la vallée de la Guisane jusqu'à Briançon), le LGGE fait part de ses inquiétudes au préfet, qui mobilise le service RTM pour abaisser le niveau du lac. La construction d'un canal (exutoire artificiel) débute en avril 1986, pour s'achever deux mois plus tard. Le 29 juin 1986, la cote du lac est réévaluée : placée à 2 454,9 m, elle se situe environ 2,5 m plus bas que celle obtenue l'année précédente (PARN, 2012).

Dès 1987, des études complémentaires du glacier et du lac d'Arsine sont confiées au CEMAGREF de Grenoble. Les résultats se montrent optimistes quant au risque de débâcle du lac, en écartant les risques de déstabilisation de la moraine par glissement profond et en validant le dimensionnement du canal face au risque de vêlage (Lahousse & Guen, 1988).

### **3.1.1.2. Lac supraglaciaire : le lac de Rochemelon**

Situé à la frontière franco-italienne (Haute-Maurienne, département de la Savoie), le lac supraglaciaire de Rochemelon s'est naturellement formé à la surface du glacier (3 200 m d'altitude). La fonte progressive du glacier a permis au lac de s'étendre entre les années 1980 et 2004 (Boudières & Peissier, 2013). Un exutoire naturel existe au niveau du col de la Novalèse, où l'eau de fonte se déverse jusqu'au village italien de Noalesa (828 m d'altitude).

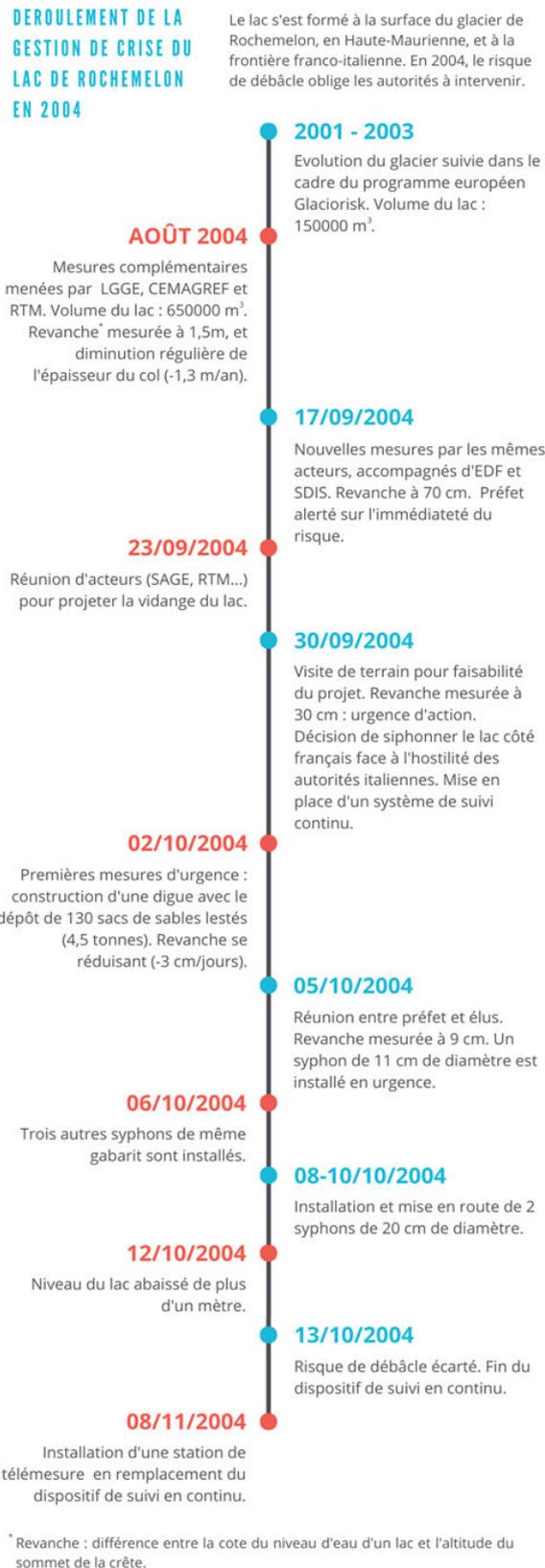
Le risque de vidange brutale a rapidement été identifié par le CEMAGREF de Grenoble (2004), qui alertait sur la croissance rapide du lac. Deux risques sont alors recensés. Côté italien, la crainte de l'obstruction du déversoir par des icebergs pourrait entraîner une rupture de l'embâcle glaciaire. Le déversement brutal de la masse d'eau sur une pente forte, couplé à la friabilité du substrat rocheux sur le versant italien, engendrerait des laves torrentielles dévastatrices pour le village en contrebas. Cependant, ce risque a été jugé peu probable, puisqu'un événement similaire a eu lieu en 2001 sans conséquence. En revanche, le risque côté français est bien plus élevé, compte tenu de la perte de résistance du verrou (diminution de la taille du verrou par rapport aux dimensions du lac).

Deux scénarios sont proposés : la surverse avec débordement du lac donnant une crue très forte en aval ou la rupture soudaine du verrou sous la pression de l'eau donnant une crue catastrophique dans la vallée du Ribon, puis dans la vallée de l'Arc (PARN, 2012).

En aval du versant français, le village de Bessans serait épargné, car situé suffisamment en amont dans la vallée de l'Arc. Trois villages, situés dans la commune de Val Cenis, seraient alors impactés : Lanslevillard, Lanslebourg et Termignon. La modélisation des débits de l'Arc montre que des valeurs de crue décennales pourraient être atteintes à Lanslevillard, premier village touché (Vincent *et al.*, 2010).

En 2004, des séries de mesures sur le glacier font craindre la vidange brutale du lac. Une

stratégie de gestion du risque doit être urgemment décidée. La chronologie de la gestion de la crise de 2004 est résumée dans la [figure 23](#) (Laily, 2005).



D'après la note de synthèse du RTM (LAILY B., 2006)

Figure 23 : Déroulement de la gestion de crise du lac de Rochemelon en 2004 (Laily, 2005).

La crise de 2004 témoigne du manque de prise en compte des ROGP dans la gestion du risque en France. En effet, il aura fallu attendre que la probabilité de débâcle soit à son maximum pour que les autorités s'emparent du sujet, alors que le lac de Rochemelon était identifié et suivi depuis de nombreuses années. Comme le suggère la note de synthèse du RTM de 2012, « il reste à construire un lien plus direct entre les études descriptives et prospectives et la gestion opérationnelle ». Cependant, la coordination d'un très grand nombre d'acteurs s'est montrée assez efficace, malgré le manque d'anticipation et l'urgence de la situation (armée, gendarmerie, PGHM, hélicoptères de Gendarmerie et de Protection Civile, CRS, SDIS, DDE, EDF, CEMAGREF, LGGE, bureaux d'études et RTM) (Laily, 2005).

### **3.1.1.3. Poche d'eau interglaciaire : glacier de Tête Rousse**

Le glacier de Tête Rousse se situe dans le massif du Mont-Blanc, d'une superficie d'environ 1,3 km<sup>2</sup> et une longueur de 2,5 km, le glacier se situe à une altitude comprise entre 3 100 et 3 750 m. La zone d'accumulation (zone où la neige s'accumule et forme le glacier) est située à une altitude d'environ 3 500 m, tandis que la zone d'ablation (zone où la glace fond) se trouve à une altitude d'environ 2 800 m.

Ayant des zones de contact avec des roches plus chaudes que le glacier en surface, des poches d'eau se forment donc à l'intérieur, alimentant les cavités et les sources d'eau glaciaires. Les poches d'eau intraglacières peuvent se vider naturellement par écoulement ou par drainage à travers le fond du glacier, mais elles peuvent aussi se rompre brusquement et causer des inondations dramatiques en aval, notamment en cas de surcharge ou de pression trop importante de la poche d'eau sur le glacier (Schoeneich *et al.*, 2007).

C'est ce qui s'est passé en 1892 où une catastrophe s'est produite sur le glacier de Tête Rousse. Le 11 juillet, une grande partie du glacier s'est détachée et une gigantesque lave torrentielle de plus de 200 000 m<sup>3</sup> d'eau, de glace, de roches et de débris a dévalé la vallée en aval. Cette coulée de débris a détruit le village de Saint-Gervais-les-Bains, faisant plus de 200 morts. Ce détachement d'une partie du glacier est notamment dû à la fragilisation de celui-ci (hausse des températures, baisse de précipitations) en raison de la masse importante de l'eau qui a ensuite dévalé la pente en aval du glacier (Vincent *et al.*, 2012).

C'est pourquoi aujourd'hui, le glacier de Tête Rousse est activement surveillé par les scientifiques ; des travaux ont été réalisés afin de vidanger (2010, 2011, 2012, 2022) ces poches d'eau afin d'éviter que la catastrophe de 1892 à Saint-Gervais se reproduise (Vincent *et al.*, 2012).

## **3.1.2. Les phénomènes glaciaires issus d'eau sous forme solide**

### **3.1.2.1. Les chutes de séracs**

La chute de séracs désigne une chute de blocs de glace instables se détachant du front du

glacier (Figure 24). Cette chute est notamment due à une déstabilisation et à la fracturation de la glace, dues aux variations de températures, de précipitations et autres phénomènes géologiques et géomorphologiques (vibrations, mouvements de terrain...).

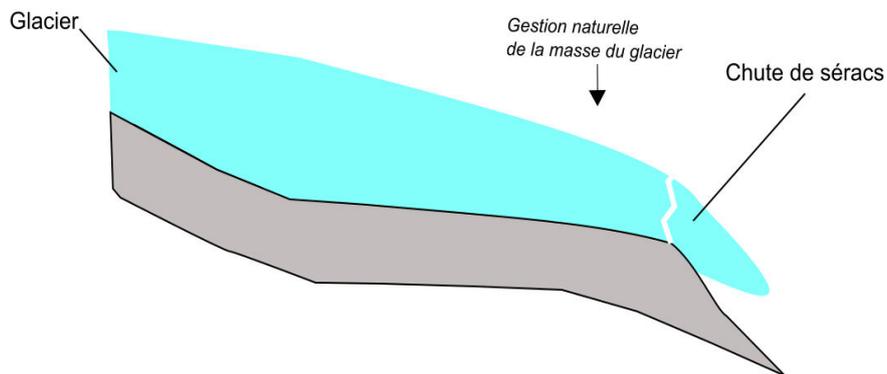


Figure 24 : Chute d'un sérac en aval du glacier (M2 Géoïdes, 2022).

Les chutes de séracs sont des phénomènes récurrents dans le massif des Alpes et souvent imprévisibles. Ils peuvent être très dangereux pour les alpinistes, les randonneurs ou les skieurs de montagne qui se trouvent à proximité d'un glacier instable.

### 3.1.2.2. La rupture partielle ou complète du glacier

À la différence d'une chute de séracs, qui sont des blocs de glace isolés du glacier, la rupture du glacier se produit lorsque le glacier cède complètement ou se fend en deux parties distinctes (Figure 25). Cette rupture est souvent due à une surcharge de neige ou au contraire à une augmentation de la température qui fait fondre la glace et déstabilise le glacier, pouvant entraîner des catastrophes naturelles graves et souvent imprévisibles (laves torrentielles, avalanches glaciaires, glissement de terrain).

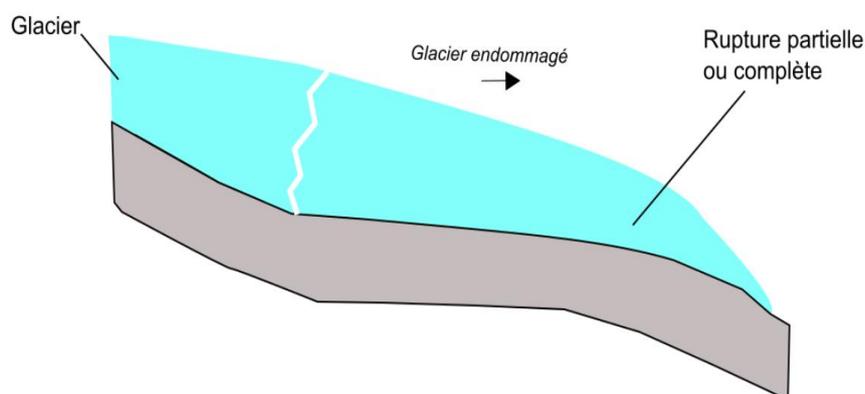


Figure 25 : Rupture d'un glacier fragilisé (M2 Géoïdes, 2022).

Le glacier de la Marmolada se situe dans le massif des Dolomites en Italie ; il s'agit d'un des plus gros glaciers d'Italie, culminant à 3 300 m. En juillet 2022, une partie du glacier s'est rompue et a provoqué une série d'avalanches et de laves torrentielles, qui ont dévalé les pentes du massif, inondant les villages en aval et détruisant les infrastructures.

Cette catastrophe, qui a fait 11 morts, est l'une des conséquences des effets du changement

climatique sur le massif alpin. En effet, une diminution des précipitations de neige a été signalée durant l'hiver précédant la catastrophe (déficit de 50%) réduisant fortement la période d'accumulation mais également des températures très élevées (10°C au front du glacier le jour de sa rupture) (Olivieri & Bettanini, 2022).

### 3.1.3. Les phénomènes périglaciaires

Les phénomènes périglaciaires sont directement liés aux phénomènes glaciaires, dont ils sont souvent la conséquence aval. Les effets cascades entre ces deux types de phénomènes sont particulièrement redoutés. Les caractéristiques des phénomènes périglaciaires varient fortement en fonction de l'aléa glaciaire concerné en amont, et du paysage. Ces types de phénomènes sont par ailleurs fortement amplifiés par la fonte du permafrost, qui entraîne une forte instabilité des massifs alpins.

#### 3.1.3.1. Déstabilisation des glaciers rocheux

Les glaciers rocheux sont constitués d'un mélange de glace et de débris rocheux et sont isolés par une épaisse couche de débris à leur surface. Ils sont en effet caractérisés par un flux de matériaux important, en opposition avec un flux de glace très faible qui ne permet pas l'évacuation des matériaux, qui s'accumulent alors à la surface. Ils se déplacent généralement lentement, et progressent vers l'aval, contrairement aux glaciers blancs qui reculent. Leurs mouvements dépendent par ailleurs de la masse du glacier. Ce type de glaciers entraîne la formation de moraines bien développées, prenant parfois la forme de bastion. Le front est par ailleurs caractérisé par une très forte pente atteignant 40 degrés (Bodin *et al.*, 2015).

Les mouvements de progression vers l'aval peuvent conduire à un risque de déstabilisation du front du glacier. Des risques sont alors induits, tels que des chutes de blocs, un écroulement du glacier rocheux, des glissements de terrain, ou encore la formation de lave torrentielle en aval du glacier. Les structures (refuges ou infrastructures des domaines skiables) construites sur le glacier peuvent par ailleurs être soumises à une forte déstabilisation (Marcer, 2018).

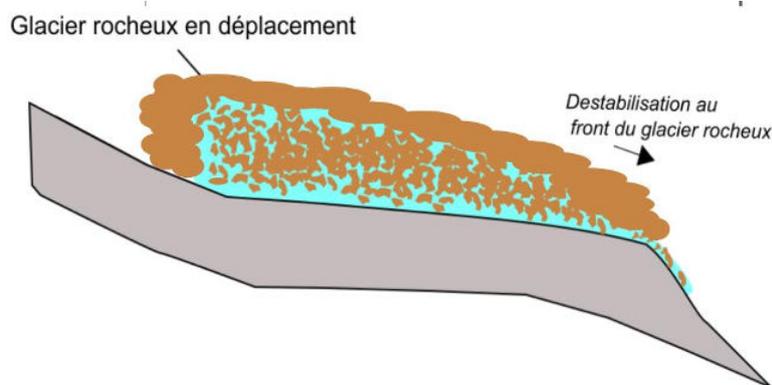


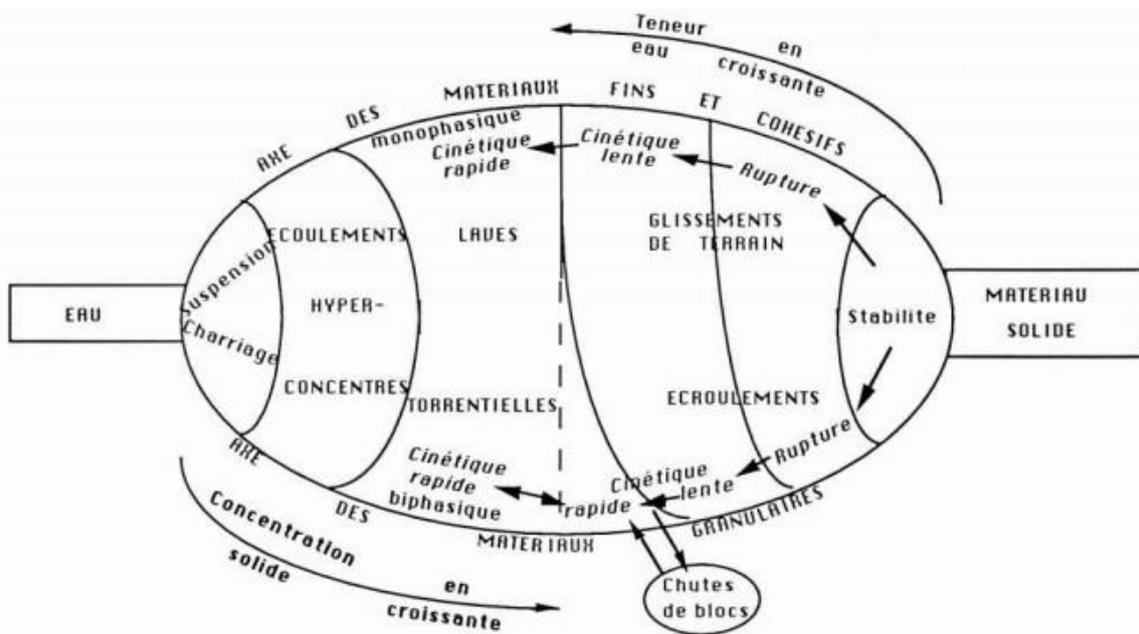
Figure 26 : Déstabilisation d'un glacier rocheux (M2 Géoïdes, 2022).

Le glacier rocheux de Laurichard est un exemple marquant des risques induits par la déstabilisation de tels glaciers. Situé à 2 500 m d'altitude dans le massif des Écrins (Hautes-Alpes), le glacier est sous surveillance depuis 1983, et considéré comme site de référence

alpin par le Parc National des Écrins qui instrumentalise le glacier. D'une épaisseur de 40 m pour 600 m de longueur, ce glacier imposant est très actif et en constante déformation. Avec une hausse globale de ses températures, son instabilité s'accroît fortement, avec des vitesses de déplacement en forte augmentation depuis 2008 (Bodin *et al.*, 2015). Ses déplacements, assez rapides, atteignent 10 cm par an sur la partie basse, et jusqu'à 150 cm par an dans sa partie la plus raide (Thibert & Bodin, 2022).

### 3.1.3.2. Les crues et laves torrentielles

Afin de comprendre le phénomène de lave torrentielle, il faut d'abord définir ce que sont les écoulements de montagne. Les travaux de Naaim-Bouvet & Richard en 2015 et la figure 27 illustrent les propos suivants.



3. Représentation du champ de l'hydraulique torrentielle par rapport aux mouvements de terrain et à l'hydraulique fluviale.

Figure 27 : Représentation du champ de l'hydraulique par rapport aux mouvements de terrain et à l'hydraulique fluviale (Meunier, 1994).

Pour rappel, tout cours d'eau de montagne n'est pas synonyme d'aléa. Une première distinction est faite par rapport à la pente du versant afin de classer les cours d'eau. Pour qu'une lave torrentielle naisse, la pente doit être inclinée d'au minimum 25 % (Salomon, 2008).

Les laves torrentielles sont des écoulements liquides qui, plus ils dévalent la pente, plus ils se chargent en matériaux solides jusqu'à atteindre des rapports de  $\frac{3}{4}$  solide  $\frac{1}{4}$  liquide. Ces mêmes laves se divisent en deux sous-groupes, les laves boueuses et les laves granulaires.

« L'aléa lave torrentielle peut se définir comme un écoulement visqueux, pas totalement liquide ni totalement solide » (Bardou, 2012). Deux composantes de la lave peuvent se distinguer : l'eau et la composante granulaire constituée de particules fines (<400  $\mu\text{m}$ ) et de particules

grossières. Toutefois ce mélange n'est pas désordonné, une lave se divise en plusieurs parties schématisées dans la [figure 28](#).

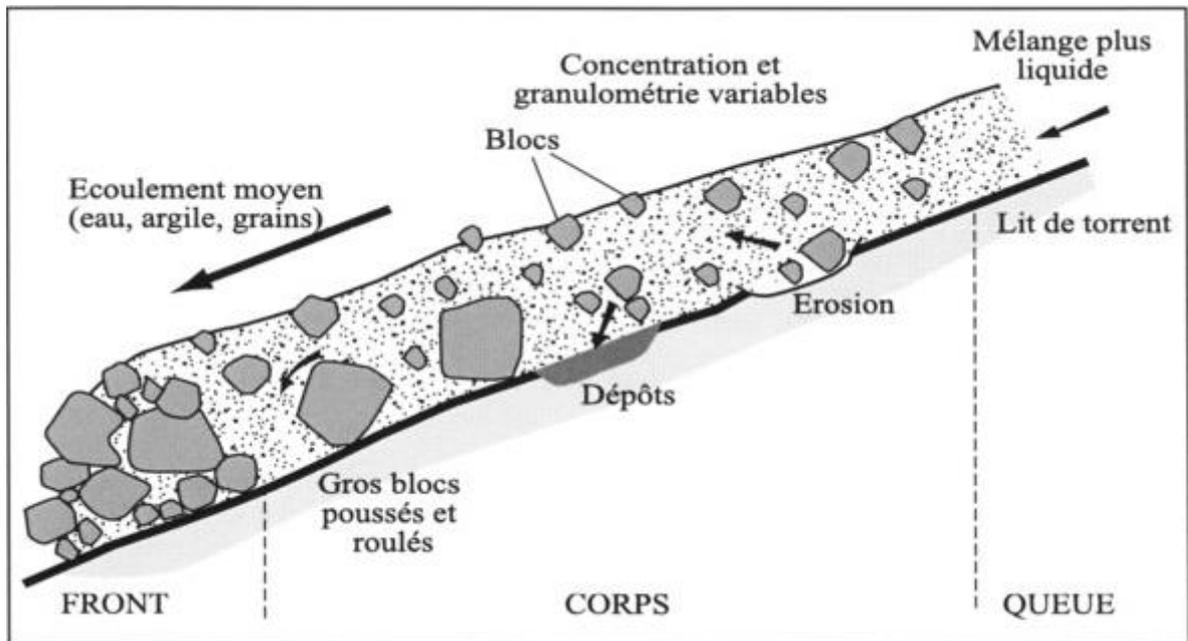


Figure 28 : Représentation d'une lave torrentielle (Meunier et al., 1997).

Nous retrouvons d'abord le front où une grande quantité d'éléments grossiers s'entassent. Ensuite, le corps représente la majeure partie de l'événement avec un mélange homogène. Finalement, la queue de la lave s'apparente plutôt à un écoulement hyperconcentré. La composante granulaire étant vers l'avant de la lave, naturellement, il ne reste quasiment que de l'eau en fin de course, qui érode le lit.

Certaines laves présentent aussi des bourrelets ou levées. La dernière entité représente les levées. Ce sont des dépôts formés de grains grossiers. Le phénomène de lave torrentielle répond donc à des lois rhéologiques, c'est-à-dire l'étude des comportements des fluides et des matériaux visqueux (Cousot, 1992).

Afin d'illustrer nos propos, nous allons nous intéresser au cas de la lave torrentielle du col du Lou en 2015. Le 14 août de cette année, un orage se déclenche sur la région de Lanslevillard et plus précisément au Grand Mont Cenis. Cet orage, en pleine période de canicule et donc de fonte du permafrost, génère deux glissements de terrain qui, le temps d'arriver jusqu'au village, se rejoignent pour former une seule lave torrentielle. Les matériaux proviennent de niches d'arrachements et le volume arraché est estimé à 4 000 m<sup>3</sup>, dévalant une pente de plus de 35 % (Ribeyre, 2016). La présence de fines particules gelées témoigne d'un apport de matériaux provenant d'un glacier. La lave, en s'engouffrant dans les gorges, s'est enrichie en matériaux au point de laisser apparaître le socle rocheux du lit du torrent. Au total, ce sont entre 10 000 et 15 000 m<sup>3</sup> qui ont été estimés. L'état de catastrophe naturelle a été déclaré et les dégâts ont été estimés à plusieurs centaines de milliers d'euros.

### 3.1.3.3. La dégradation du permafrost et la fragilisation des parois rocheuses

Le permafrost est une couche de sol gelée en permanence qui se trouve dans les régions polaires et les hautes montagnes. Dans les Alpes, le permafrost se trouve généralement à une altitude de plus de 2 500 m. Cependant, avec la hausse globale des températures, le permafrost a tendance à se fragiliser et à passer au-dessus de 0°C, température de fusion de l'eau.

Cette dégradation du permafrost peut entraîner une fragilisation des parois rocheuses en haute altitude, notamment par l'augmentation du phénomène de gélifraction (Figure 29). L'eau pénètre dans les fissures et les crevasses de la roche. Cette eau, qui est amenée à geler, peut générer une pression importante sur la roche, entraînant des fissures, des fractures et la fragmentation de la roche en blocs.

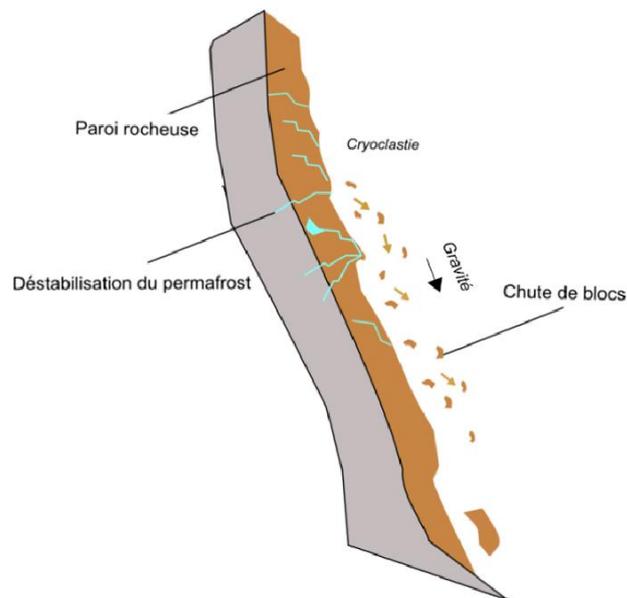


Figure 29 : La déstabilisation d'une paroi rocheuse (M2 Géoïdes, 2022).

La face ouest de l'Aiguille des Drus dans le massif du Mont-Blanc, connue pour ses pentes abruptes et rocheuses et ses corniches dangereuses et prisée par les plus grands alpinistes et grimpeur, est un exemple de déstabilisation des parois rocheuses liée à la fonte du permafrost. Les parois rocheuses deviennent de plus en plus instables et sont susceptibles de former des chutes de blocs dépassant de plus en plus fréquemment les 10 000 m<sup>3</sup> (Deline *et al.*, 2009).

Les services de l'Etat et les chercheurs surveillent de près l'évolution de la situation et mettent en place des mesures pour protéger les grimpeurs, notamment en installant des filets de protection pour retenir les éventuelles chutes de blocs (Ravanel & Deline, 2008).

## 3.2. La gestion et le suivi des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire

### 3.2.1. Les dispositifs d'étude et de suivi

Dans la maigre quantité de dispositifs et plans d'actions qui existent sur ce sujet, les plans d'action pour la prévention des risques d'origine glaciaire et périglaciaire (PAPROG) ont été pionniers. Il s'agit d'un ensemble d'études et de suivi des ROGP ayant pour but d'identifier les sites à suivre et à instrumentaliser pour une gestion efficace et durable. Co-piloté par la DGRP (Direction Générale de Prévention des Risques) et l'Irstea, avec une participation du PARN, les PAPROG ont été mis en place en 2012.

Bien qu'étant antérieur à 2012, un premier projet de recherche supporte la création de ces PAPROG : le **projet GLACIORISK**. D'une durée de trois ans, effectif entre 2001 et 2003, ce programme européen a permis d'identifier et de suivre les catastrophes d'origine glaciaire en Europe dans l'optique de mieux les prévenir et s'en protéger de manière plus efficace, dans un contexte climatique et socio-économique en constante évolution.

Initié par le PARN, GLACIORISK regroupe divers acteurs tels que le CEMAGREF pour la France, l'institut fédéral suisse de technologie de Zurich, l'Université de Salzbourg ou encore la Società Meteorologica Subalpina italienne.

Le projet a permis la construction d'une base de données sur l'ensemble des événements passés et ce sur différents aléas glaciaires : chutes de sérac, avalanches, crues liées aux ruptures de lacs glaciaires, *etc.* (Richard *et al.*, 2003). Diverses simulations numériques des glaciers et des risques ont été effectuées afin de comprendre les mécanismes et les conditions de déclenchement, la fréquence et l'ampleur des phénomènes étudiés.

Initialement prévu, le zonage cartographique des risques n'a pas pu être réalisé faute de compréhension des phénomènes hydrologiques sous-glaciaires. Toutefois, des documents de gestion directrice ont été produits. Suite à cela, des ateliers ont été proposés afin d'informer les décideurs des mesures préventives pouvant être mises en place.

Le **projet PermaNET** (2008 - 2011) avait pour objectif de contribuer à réduire les risques naturels liés au permafrost et à gérer leurs conséquences, le tout en étudiant les impacts du changement climatique. C'est pourquoi un réseau de suivi a été mis en place dans les Alpes afin de favoriser un développement pérenne de ces territoires en partenariat avec les décideurs et acteurs de la gouvernance. Une fois les ressources et informations en main, les élus locaux seraient plus à même de mener ces politiques de développement durable.

Initié par le service géologique de la province de Bolzano en Italie, nombreux sont les acteurs de l'espace alpin à avoir participé au projet, comme par exemple le laboratoire EDYTEM de l'université de Savoie ou encore le laboratoire Pacte de Grenoble.

Les objectifs finaux attendus étaient : la réalisation de la carte de distribution du permafrost dans les Alpes, la détection et l'évaluation des aléas naturels pouvant être reliés à la fonte du permafrost et la récolte de l'information sur le permafrost et la ressource eau dans les sources alpines.

Troisième projet de ces PAPROG, le **projet GlariskAlp** entre 2010 et 2013. Si les deux premiers projets s'articulent plus sur la connaissance du risque, ici c'est la réponse pouvant être donnée qui est au cœur du projet. Il s'agit d'apporter des réponses pratiques à la fonte accélérée des glaciers en matière d'aménagement du territoire et de gestion des risques. Plusieurs partenaires italiens et français ont travaillé sur ce projet. On retrouve la fondation Montagna Sicura en tête de file puis divers instituts comme l'agence régionale de protection de l'environnement du Val d'Aoste, l'Université de Savoie est représentée quant à elle par EDYTEM et finalement, d'autres laboratoires comme le LGGE.

Encore une fois, leurs travaux se basent sur un inventaire cartographique des glaciers des Alpes. Plusieurs sites pilotes sont étudiés de manière approfondie pour appuyer la recherche. Par exemple, l'analyse du glacier de Taconnaz a permis de caractériser la fréquence des chutes de séracs mais également de déterminer le régime thermique de ce dernier pour connaître sa stabilité et son mouvement. D'autres glaciers ont aussi été étudiés comme celui de la Tête Rousse ou encore celui d'Argentière.

Finalement, le dernier programme et le plus récent est **PermaRisk**. Mis en place entre 2017 et 2020, le but était de co-construire des méthodes de gestion des risques associés à la fonte du permafrost. En partant d'une répartition de la distribution du permafrost dans les Alpes françaises, des études de cas sont menées pour approfondir les connaissances et la compréhension des phénomènes associés. Par la suite des mesures de gestion seront proposées aux autorités locales et gestionnaires des territoires. D'après le site internet du projet, trois thématiques sont étudiées à savoir les risques liés aux glaciers rocheux, ceux liés aux phénomènes cryo-karstiques et ceux liés aux infrastructures sur permafrost.

Pour répondre à ces objectifs, le projet PermaRisk s'est basé sur 4 volets d'actions. Le premier était la meilleure compréhension et spatialisation du permafrost et des phénomènes associés. Le deuxième volet était le « zoom » sur le processus au travers de cas d'étude. Dans un troisième temps, il s'agissait de proposer et de mettre en place des mesures de surveillance et de gestion. Finalement, le dernier volet portait sur la diffusion de la connaissance sur la fonte du permafrost et les risques qui étaient encourus

Si ces dispositifs d'étude semblent se compléter et étoffer la connaissance sur les ROGP dans les Alpes françaises, ils ne sont cependant pas suffisants pour une gestion globale et complète. C'est pourquoi d'autres programmes d'actions existent en dehors des PAPROG.

C'est le cas du **programme « Riskfrost »** composé et financé par HES-SO pour la Suisse et les laboratoires français EDYTEM et Pacte sous le nom d'alliance campus rhodanien qui a vu

le jour en 2022. Ce contrat exploratoire vise à initier une discussion entre acteurs sur la perception des risques liés à la dégradation du permafrost pour mieux l'anticiper.

Cette discussion repose sur une enquête préalablement réalisée auprès de trois groupes d'acteurs, les citoyens, les autorités locales et les professionnels de la montagne, et ce, sur trois massifs différents : la Vanoise, le Mont-Blanc et le Valais Suisse. La méthodologie mise en place suit un guide d'entretien précis visant à donner une cotation de la gravité et de la maîtrise du risque avant et après information. L'information consiste en la présentation de trois risques : l'un visible, le deuxième non visible et le dernier risque étant un effet cascade.

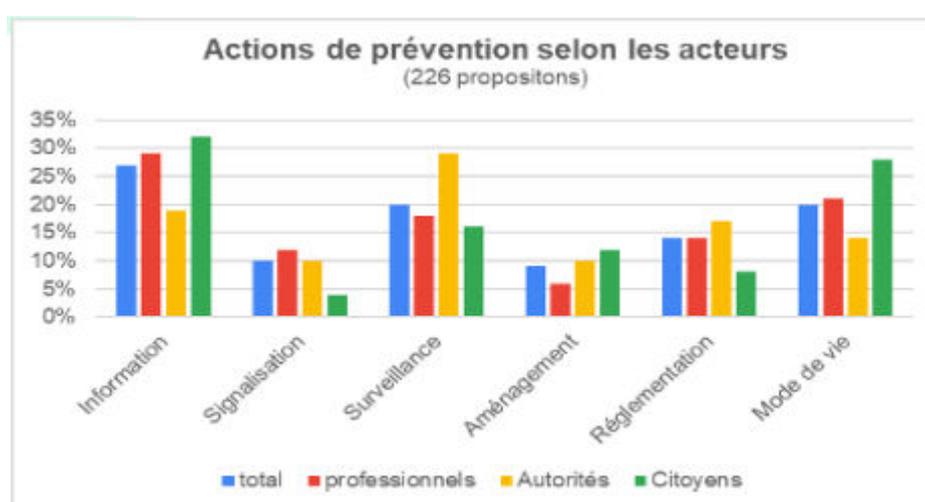
Respectivement nous avons donc l'écoulement de la Meije, la déstabilisation du permafrost de la télécabine de Bochard et enfin l'effet cascade de processus de Bondo.

D'après [Caroly et al. \(2022\)](#), 34 interviews ont eu lieu au total. Le niveau de perception de la gravité du risque et les actions de prévention sont résumés respectivement dans le [tableau 1](#) et la [figure 30](#).

*Tableau 1 : Perception de la gravité du risque (Caroly et al., 2022).*

Perception Gravité	Faible	Elevée	Total
Avant information	15	19	34
Après information	6	28	34

Le [tableau 1](#) montre que la perception de la gravité du risque était assez mitigée. Sur les personnes interrogées, seulement 19 avaient conscience de la gravité d'un risque. Après information ce chiffre passe à 28 soit à plus de 80 %. Il est donc constaté directement l'intérêt de ce genre de projet de recherche : sensibiliser les pratiquants des acteurs de la montagne.



*Figure 30 : Actions de prévention requises selon les acteurs (Caroly et al., 2022).*

La [figure 30](#) illustre quant à elle les différentes actions de prévention requises par les trois groupes interrogés. Des différences se voient. Par exemple, les autorités mettent l'accent sur

le volet surveillance alors que les citoyens voudraient plus d'informations et de changements sur le mode de vie.

En conclusion sur ce graphique, pour tout changement de conscience, c'est davantage chez les citoyens que cette démarche va opérer que chez les deux autres catégories qui elles disposent déjà de ces connaissances par leur profession.

De plus, les résultats montrent que la gravité est perçue comme étant moins élevée au Mont-Blanc que dans les deux autres massifs. Cela peut s'expliquer par une surexposition des acteurs à l'information, ce qui peut entraîner une banalisation du risque. L'étude conclut sur une perception de la maîtrise du risque faible pour tous les acteurs. Les raisons évoquées étant des connaissances encore insuffisantes pour mettre en œuvre des moyens et un sentiment d'être démuné face au réchauffement climatique, principal moteur d'accélération d'occurrence des ROGP (Caroly *et al.*, 2022).

Enfin, « Refuges sentinelles » est un dispositif de recherche-action sur les changements climatiques et culturels en haute montagne. Dans une volonté de recueillir de l'information notamment sur le changement climatique en haute montagne et l'évolution de l'aménagement et des pratiques sur ce territoire, 4 massifs ont été étudiés : les Ecrins, le Mont-Blanc, le Valais en Suisse et la Vanoise. Les refuges qui sont des points de rencontre en haute montagne, pour tous types d'acteurs, jouent le rôle de « laboratoire de terrain ». Par le biais d'entretiens et de questionnaires avec les touristes, professionnels de montagne et toutes personnes passant par le refuge, la construction d'un recueil de données sur la montagne est effectuée. Diverses thématiques sont abordées comme la météorologie, l'écologie et la biologie, la géomorphologie ou bien encore la sociologie des acteurs. L'interdisciplinarité mélangeant sciences humaines et sociales avec les sciences naturelles permet d'aborder la montagne sous un angle plus constructif. L'évolution du terrain en lien avec la dégradation des glaciers et du permafrost oblige les acteurs à revoir leur vision et pratique de la montagne. C'est pourquoi les refuges jouent un rôle important car ils centralisent ces acteurs et donc l'information. De plus, les refuges sont aussi instrumentés pour récolter des données quantitatives.

Si la prévention est un outil majeur et sûrement le moins coûteux financièrement, l'adaptation et la résilience n'est pas à négliger. Que faisons-nous lorsqu'un événement à bien lieu et que des dégâts sont constatés et ce, malgré la prévention faite sur le territoire ?

### **3.2.2. Adaptation et résilience**

L'adaptation des populations et des sociétés est donc nécessaire pour pouvoir continuer à pratiquer la montagne. La capacité de résilience des acteurs et gestionnaires de la montagne est donc primordiale afin d'adapter les besoins des populations aux enjeux que représente la montagne.

Cette évolution des pratiques passe par exemple par les guides de haute montagne,

pratiquants et experts de cet environnement. En effet, si les massifs souffrent d'une augmentation de la fréquentation, cette même fréquentation des refuges est en baisse. De plus, le changement climatique impacte la pratique de la montagne. Par exemple, l'effondrement d'une section de l'arête des Cosmiques le 22 Aout 2018 ou bien l'évolution du glacier de l'itinéraire du Pas de la Chèvre en 2020 sont des exemples de mutation du 21<sup>ème</sup> siècle (Figure 31).



Figure 31 : Mutation de la montagne : accès perdu pour une course historique, le Pas de la Chèvre depuis le Montenvers (Mourey, 2020).

En 2021, le centenaire de la Compagnie des Guides de Chamonix a eu lieu. Cette profession est au premier plan pour constater l'évolution de la montagne et des pratiques associées. D'après Carlson (2023) et au nom de la profession, plusieurs effets sont constatés. Un glissement saisonnier lié à la détérioration des conditions de haute montagne pousse à revoir les périodes d'accueil des pratiquants. Avec des hivers de plus en plus doux, la période d'accueil des touristes est de plus en plus longue. Il y a donc une nécessité de former et d'informer le public sur ces modifications. D'un point de vue environnemental, il y a aussi beaucoup de mutations. Que cela soit au niveau de l'impact des habitats des espèces sensibles ou de la modification des itinéraires.

Finalement, le rapport à la haute montagne est contraint d'évoluer et cela passe notamment par une évolution des pratiques sportives. La multiplication des activités (marche, trail, escalade, alpinisme) et de la durée de l'expédition (journée, demi-journée, semaine) obligent à repenser la haute montagne (Bourdeau, 2023). Il faut réussir à concilier tous les types d'acteurs et touristes. Certains veulent une montagne durable là où d'autres sont là pour consommer la montagne dans tous ces aspects. Des enjeux importants au centre de la gestion des risques en montagne tels que l'économie existent. En effet, si la gestion des risques

semble simple au premier abord, il ne faut pas négliger l'aspect financier du territoire. A titre d'exemple, la commune de Chamonix vit de son tourisme et il semble difficile d'imaginer une complète fermeture du massif à cause des risques naturels, trop d'emplois en dépendent.

L'adaptation passe également par des projets de recherche-action comme le projet STAFF pour les stratégies d'adaptation pour les infrastructures construites sur le permafrost dans les Alpes. S'inscrivant dans la continuité des travaux sur la connaissance des risques cités plus tôt, le projet STAFF vise à consolider les connaissances sur ce milieu en proposant un meilleur suivi des territoires de montagne afin d'aider les gestionnaires et les élus à favoriser des stratégies d'anticipation et non plus de réaction. Trois grands axes de travail ont été proposés. Premièrement, une mise à jour de l'inventaire des dommages des infrastructures construites sur permafrost est faite. À cela s'ajoute une analyse des stratégies réactives et d'anticipation déjà mises en place afin de comprendre ce qui a déjà été fait et savoir ce qui fonctionne concrètement. Enfin, le dernier axe de travail consiste en la mise en place de nouvelles méthodes de détection et de suivi de l'état du permafrost. Au sujet des résultats, les données collectées ont permis de compléter la base de données existantes (Duvillard, 2019). Une augmentation des coûts des infrastructures de géotechniques est aussi constatée. Il ressort également de l'étude que la plupart des dommages étant dus au substratum composé de glace auraient pu être évités si des diagnostics adaptés au permafrost avaient été fait.

Enfin, l'étude fait ressortir que la plupart des stratégies sont de types réactives avec des renforcements du terrain, travaux très coûteux. En revanche, les stratégies proactives ont un effet à plus court terme et non pour anticiper des évolutions sur le long terme.

Finalement, le projet AICOTRA - AdaPT Mont-Blanc (2017-2020). Ce projet est issu de la STAAF vu précédemment. L'objectif général est le développement d'outils de planification et de gestion du territoire pour l'adaptation aux changements climatiques. La planification territoriale joue donc un rôle important dans la réduction de la vulnérabilité et l'augmentation de la résilience du territoire et ce dans une optique de développement durable tant pour l'environnement que pour les sociétés qui en dépendent.

L'action du projet repose sur trois axes de travail principaux. Au travers d'ateliers techniques et participatifs, des solutions pour l'adaptation au changement climatique ont été données. De plus, une diffusion des résultats sur divers nouveaux scénarios des changements climatiques a été faite. Cela représente la partie communication et participation du projet.

Un deuxième axe de travail repose sur la connaissance des impacts des effets du réchauffement climatique. Avec l'observatoire du Mont-Blanc comme instrument de support, de nombreuses données ont été acquises.

### 3.3. La vallée de Chamonix : gestion du risque en quatre études de cas

Située dans les Alpes françaises, la vallée de Chamonix, est un espace enclavé entre le massif des Aiguilles Rouges et celui du Mont-Blanc. Chamonix occupe une place centrale dans la vallée à une altitude d'environ 1 000 m. Capitale de l'alpinisme européen et porte d'entrée vers l'Italie via le tunnel du Mont-Blanc, cet espace urbain occupe une très grande part du fond de vallée jusqu'au pied même des glaciers. Le bassin versant est abrupt et s'élève très rapidement à plus de 3 000 m d'altitude pour le massif des Aiguilles Rouges et plus de 4 800 m pour le massif du Mont-Blanc. Ces hautes altitudes, englacées, englobent dans un espace réduit la totalité des risques d'origine glaciaire et périglaciaire. La vallée de Chamonix représente un cas unique de prise en compte de ces risques en raison de la vulnérabilité de ce fort urbanisme en zone de montagne. Les enjeux économiques, touristiques et emblématiques de cet espace en font, de plus, un lieu d'étude remarquable des possibilités d'aménagements en réaction aux risques naturels.

Dans le cadre de ce présent travail, le choix a été réalisé de retenir quatre secteurs d'études caractéristiques de cette prise en compte du risque. Quatre ROGP différents sont donc interrogés (fonte du permafrost de paroi, rupture de poche d'eau pro-glaciaire, chute de sérac et déstabilisation de glacier rocheux) au regard des enjeux proches (bâti principalement) (Figure 32).

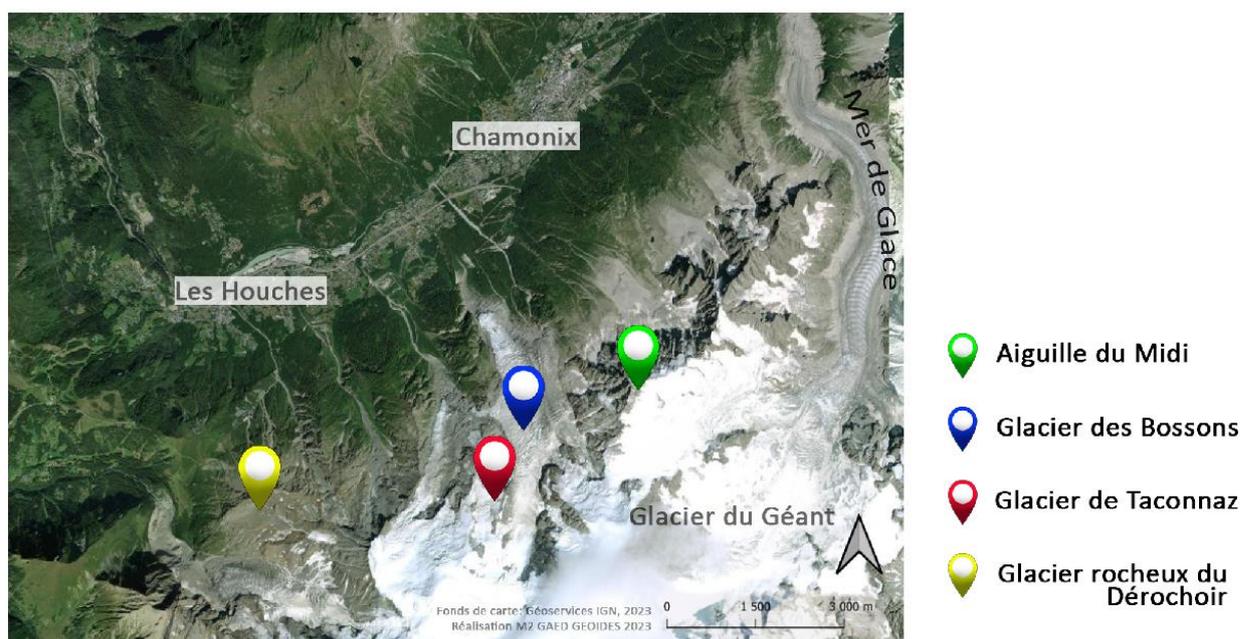


Figure 32 : localisation des quatre secteurs étudiés de la vallée de Chamonix (M2 Géoïdes, 2022).

#### 3.3.1. L'Aiguille du Midi et ses annexes

L'Aiguille du Midi est le sommet des Aiguilles de Chamonix (Figure 33). Située au sud-ouest de cette série d'aiguilles et d'arêtes rocheuses, elle surplombe la vallée de Chamonix. De ce fait, les événements qui affectent sa face nord sont documentés depuis plus de 150 ans grâce

aux archives de la mairie de Chamonix, de la Compagnie des Guides ainsi que celles conservées au Musée (Huggel *et al*, 2012). Ces séries permettent de retracer les observations d'écroulements et donc leurs récurrences. De ce fait, une augmentation de l'activité de chutes de blocs et d'écroulements est constatée depuis les années 1990 et surtout 2000 dans toute la face nord des Aiguilles de Chamonix (Ravanel *et al*, 2010).



Figure 33 : Vue sur les Aiguilles de Chamonix depuis la vallée. L'Aiguille du Midi correspond au sommet à droite, détaché du reste des Aiguilles de Chamonix par une arête en neige. Grande lithographie réalisée vers 1860 (Weibel & Jaccotet, 1860).

Il a été choisi de rassembler sous le nom « d'Aiguille du Midi et ses annexes » l'ensemble de la partie méridionale des Aiguilles de Chamonix à savoir : les faces nord et sud de l'Aiguille du Midi et les installations du même nom ainsi que l'arête des Cosmiques et le refuge du même nom (Figure 34).

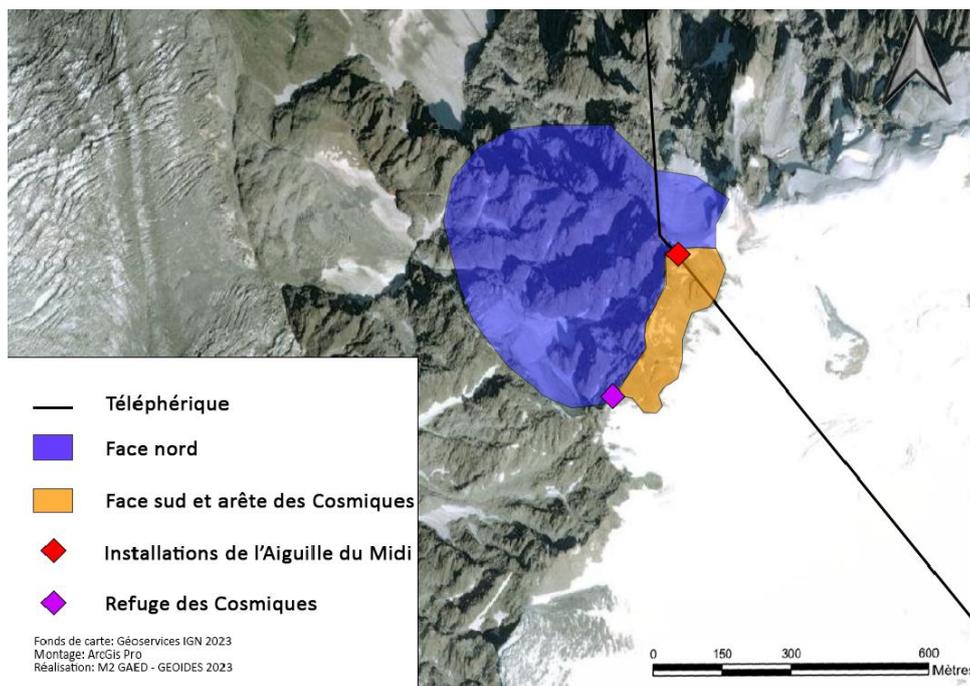


Figure 34 : L'Aiguille du Midi et ses annexes (M2 Géoïdes, 2023).

L'Aiguille du Midi est emblématique de l'activité économique reine de la vallée de Chamonix : l'alpinisme. Le sommet, qui culmine à 3 842 m, est de fait un belvédère imprenable sur le cœur du massif du Mont-Blanc : Grandes-Jorasses, Dent du Géant, Mont-Blanc en enfilade avec le Mont-Blanc du Tacul et le Mont Maudis. Dès les années 1930, un téléphérique est construit depuis Chamonix pour ravitailler l'observatoire pour l'étude des rayons cosmiques (ancien refuge des Cosmiques). A la sortie de la Seconde Guerre Mondiale, un projet de grande ampleur voit le jour : aménager le sommet de l'Aiguille du Midi. Inaugurées en 1951, ces installations reçoivent de nos jours plus de 500 000 visiteurs à l'année qui y trouvent un panel complet d'offres touristiques : panorama, attractions (le « *pas dans le vide* »), boutique « *souvenirs* », musée sur l'alpinisme, restaurants, *etc.* Cet accès privilégié au cœur du massif fait aussi l'attrait de ces installations pour les pratiquants d'alpinisme et de skis. Ainsi de nombreuses courses emblématiques sont réalisables au départ de l'Aiguille. La traversée Midi-Plan, la Rébuffat en face sud, les Pointes Lachenal, l'Arête des Cosmiques sont autant d'exemples. Il ne faut pas non plus oublier la descente « *mythique* » de la Vallée Blanche à ski. Les installations de l'Aiguille du Midi représentent donc un des centres majeurs de l'activité économique à Chamonix (Photo 2).



Photo 2 : Alpinistes à la descente de l'Aiguille du Midi (Gadiolet, 2018).

De par son accessibilité toute l'année, son attitude, sa géométrie variée (pentes et expositions) ainsi que la possibilité de travailler dans les parois, l'Aiguille du Midi est un site de recherche et d'expérimentation remarquable pour le suivi du permafrost de paroi. De ce fait, dès 2005, dans le cadre du programme PERMAdataROC puis dans le cadre de PermaNet, différentes instrumentations sont installées (Magnin *et al*, 2015 ; Deline *et al*, 2009) :

- thermomètres de surface et intérieur, tomographie électrique résistive (Figure 35) et thermographie infrarouge
- deux stations météorologiques
- modélisation par réalisation d'un MNT de haute résolution (Figure 35)
- suivi de la face sud-est de l'arête des Cosmiques par laserscan terrestre longue portée

Tout cet équipement permet de connaître et suivre la fracturation de la roche, la circulation de l'eau dans les fissures ou encore la distribution des températures et leur évolution. Il s'agit de la première instrumentation de paroi de haute altitude. L'Aiguille du Midi est toujours le principal centre de recherche sur le permafrost dans les Alpes.



Figure 35 : A gauche : tomographie électrique résistive en 2008. A droite : modèle polygonal 3D (Deline et al, 2009).

Les résultats de ces recherches démontrent une forte fracturation des compartiments rocheux en face nord de l'Aiguille du Midi ainsi que sur l'arête des Cosmiques. La fonte, mesurée, du permafrost en surface de paroi engendre une augmentation de l'activité de chute de blocs et écroulements en face nord (Photo 3). De plus, la présence de plusieurs glaciers froids en face nord inquiète. Il est craint que ceux-ci, dont le volume est estimé entre 15 000 et 20 000 m<sup>3</sup>, se déstabilisent. Des prémices de chutes ont été observés durant l'été 2021. Les installations de l'Aiguille du Midi ne semblent toutefois pas impactées par ces évolutions. De fait, les mesures démontrent qu'ils reposent sur un compartiment monolithique rocheux non fracturé dont les températures internes sont stables (L. Ravanel, entretien du 10 janvier 2023). Enfin, sont aussi observés des écroulements au niveau de l'arête des Cosmiques comme le témoigne la récurrence d'événements des étés 2018 et 2022 au niveau de la Brèche du Rappel (Photo 4).

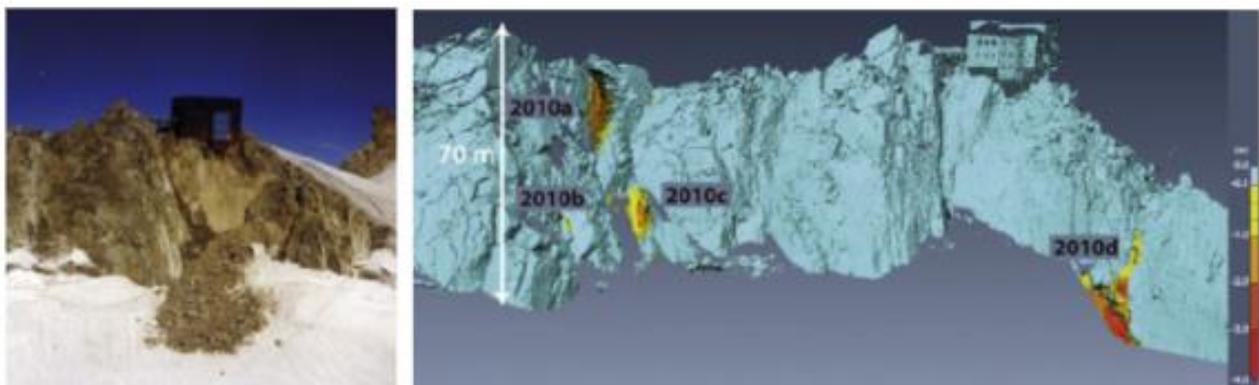


Photo 3 : Ecoulement en face nord de l'Aiguille du Midi (Ravanel, 2017).



*Photo 4 : Écroulement à la Brèche du Rappel sur l'arête des Cosmiques le mercredi 22 août 2018 (La Chamoniarde, 2018).*

Situé à l'extrémité de l'arête rocheuse, le refuge des Cosmiques est positionné à cheval entre le glacier du col du Midi (au sud-est) et un ensemble de roches particulièrement fracturées qui surplombent un cirque rocheux (au nord-ouest). Déjà impacté par un incendie en 1989 qui fait fondre son socle, ce bâtiment est légèrement déplacé pour sa reconstruction. Le refuge actuel est inauguré en 1991. Les écroulements qui affectent le compartiment rocheux sont fréquents et de plus en plus récurrents (Huggel *et al*, 2012 ; Ravelin *et al*, 2013). À noter particulièrement les étés 1998, 2003, 2010, 2015, 2020 et 2022 (Figure 36). Ce dernier épisode estival est particulièrement hors normes, le recul du glacier ainsi que les chutes de blocs laissent le refuge en partie sur le vide, les vestiges de l'incendie de 1989 sont réapparus suite au déglacement. L'avenir du bâtiment à moyen voire court terme semble menacé. Les impacts sont aussi humains puisque cette situation précaire engendre de fortes anxiétés pour les gardiens qui se trouvent démunis face au délabrement du bâtiment. Ceci conduit au désengagement pour la saison 2023 d'un des deux gardiens (M. Marcuzzi, entretien du 02 décembre 2022).



*Figure 36 : A gauche : écoulement de 600 m<sup>3</sup> sous le refuge en 1998. A droite : modélisation des écroulements de la saison estivale 2010 (Huggel *et al.*, 2012).*

### 3.3.2. Le glacier des Bossons

Le glacier des Bossons s'écoule du sommet du Mont-Blanc jusqu'à l'altitude 1 450 m au-dessus du hameau du même nom (Figure 37). Il s'agit d'un glacier polythermal dont la langue terminale correspond à un glacier froid. Celle-ci donne naissance à trois torrents : LesBossons, la Crozette et La Creuse.

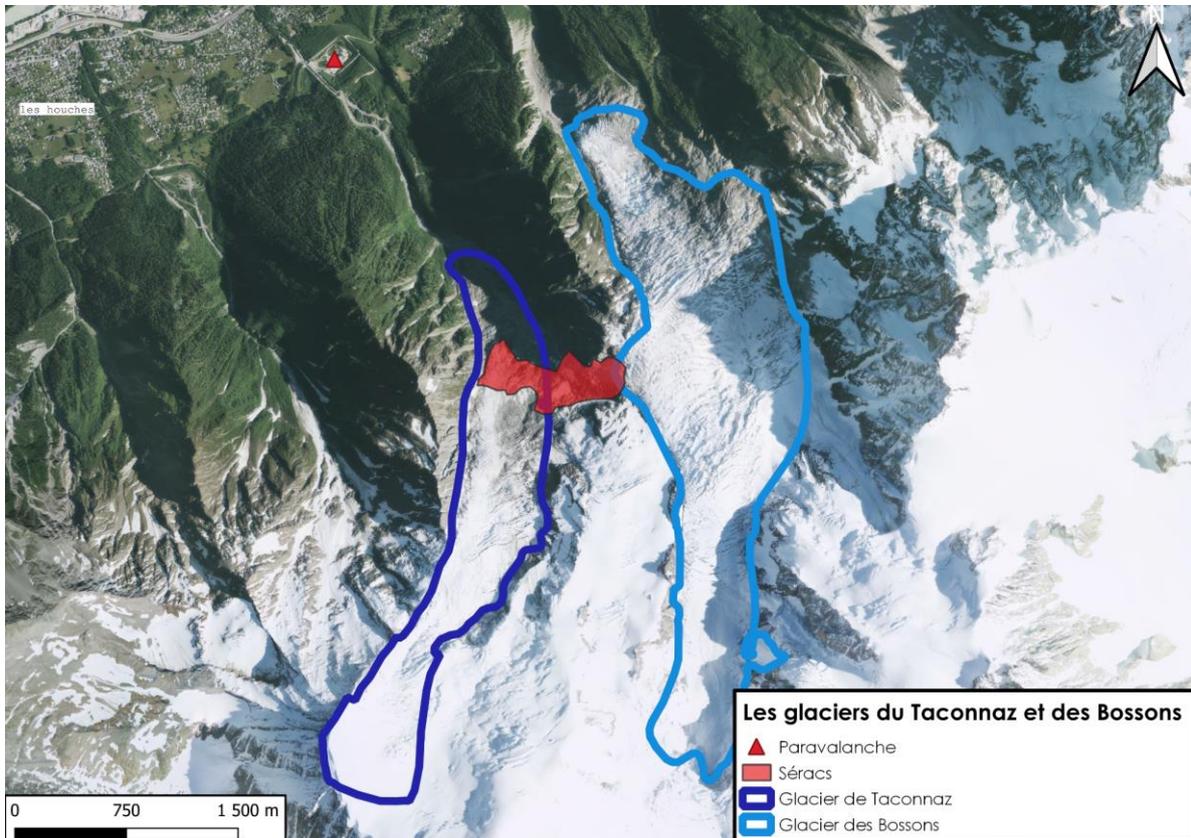


Figure 37 : Le glacier des Bossons (en bleu ciel à droite) surplombe le hameau du même nom.

Le glacier traverse par trois fois la RN205 sous des ponts-cadres (Photo 5). Ce dernier est réputé pour posséder un grand nombre de poches d'eau intraglacières non recensées et de petites dimensions. En juillet 1996, de forts orages éclatent dans le massif du Mont-Blanc. Les importantes précipitations auraient entraîné la rupture de poches intraglacières sur plusieurs glaciers dont celui des Bossons. Le fort afflux d'eau associé à un mauvais entretien de l'Arve à engendré une inondation en vallée (L. Ravanel, entretien du 10 janvier 2023). Un mètre d'eau était relevé dans les rues de Chamonix (RTM 74, entretien du 11 janvier 2023).



*Photo 5 : A gauche : le torrent de la Creuse traverse à trois niveaux la N205 sous des ponts cadres (Wikipédia, 2023). A droite : inondation de 1996. Vue du centre-ville de Chamonix (Le Dauphiné Libéré, 08/10/2020).*

Le recul de la langue terminale du glacier des Bossons a engendré récemment la formation d'un lac proglaciaire (branche du torrent de la Creuse). Les enjeux situés sur ce torrent ont rapidement attiré la vigilance des autorités sur les risques qu'une rupture pourrait engendrer. Une vidange par bréçage du barrage morainique est organisée et réalisée en juin 2022 par le RTM 74 et la DDT (Photo 6). La cote est abaissée de 2 m. Le suivi de l'évolution de ce lac est toujours d'actualité (RTM 74, entretien du 11 janvier 2023).



*Photo 6 : Incision dans le barrage morainique du lac pro-glaciaire des Bossons (Le Dauphiné Libéré, 15/06/2022).*

### **3.3.3. Le glacier de Taconnaz**

Le glacier de Taconnaz s'écoule du dôme du Goûter jusqu'à une altitude de 1 700 m environ. Ce glacier est à l'instar du glacier des Bossons un glacier polythermal dont la pente d'écoulement est marquée par une rupture brutale qui forme une vaste zone de séracs.

Ces séracs surplombent le village de Les Houches et leur chute génère un risque non négligeable. Toutefois, ce sont des processus en cascade qui sont les plus craints. De fait, des chutes de séracs produits durant l'hiver 1988 (février et mars) ont entraîné deux avalanches de très grandes ampleurs qui ont détruit des habitations. Ces deux événements consécutifs sont à l'origine de la construction du plus grand système de paravalanche du monde (Vincent *et al*, 2012). Combinant différents rôles tels que la dispersion et le freinage

des volumes avalancheux, le stockage, l'arrêt ou encore l'exutoire des eaux de fonte, les ouvrages occupent une surface de près de 30 ha (Photo 7). Son dimensionnement est, de prime abord, conçu pour stocker un volume de réception estimé à 600 000 m<sup>3</sup> sur une épaisseur d'environ 17 m. Toutefois, il s'est avéré que ce premier dimensionnement ne pouvait pas stocker deux avalanches consécutives. Il a donc été augmenté en 2010 pour contenir ce sur-aléa.



*Photo 7 : Vue d'ensemble des ouvrages du paravalanche de Taconnaz (Glacier-climat.fr, 2022).*

Le glacier de Taconnaz est suivi par le programme Glariskalp entre 2008 et 2012, comme glacier à potentiel dangereux étant donné que ses séracs surplombent la vallée de Chamonix (Photo 8). Les résultats démontrent que la partie basse du glacier est une partie froide dont la température de base est d'environ -2.5°C au niveau des séracs. Cette zone d'abruptes est conditionnée par le régime thermique. De fait, les volumes des écroulements de glace sont très disparates ; le désagrégement se fait soit par morceaux de faibles volumes mais aussi par ruptures pouvant dépasser 250 000 m<sup>3</sup>. La progression des séracs est, de plus, favorisée par ces ruptures. Pour certains, cette progression est mesurée jusqu'à 25 cm par jour. Les ouvrages du paravalanche sont donc dimensionnés pour ces processus en cascade ou les ruptures de grands dimensionnements. Toutefois, un changement de régime engendrant une déstabilisation générale de la partie froide du glacier est toujours envisagé et il ne semblerait pas que les ouvrages de protection soient dimensionnés face à cette situation.



Photo 8 : Glaciers des Bossons (à gauche) et de Taconnaz (à droite) (Gadiolet, 2016).

### 3.3.4. Le glacier rocheux du Dérochoir

Le bassin versant de la Griez domine le village de Les Houches (Figure 38). Il est alimenté en matériaux solides via des escarpements rocheux particulièrement actifs constitués des séries métamorphiques de l'Aiguille du Goûter (gneiss). Plusieurs torrents drainent son bassin de réception (torrents des Arrandellys, torrent du Griez).

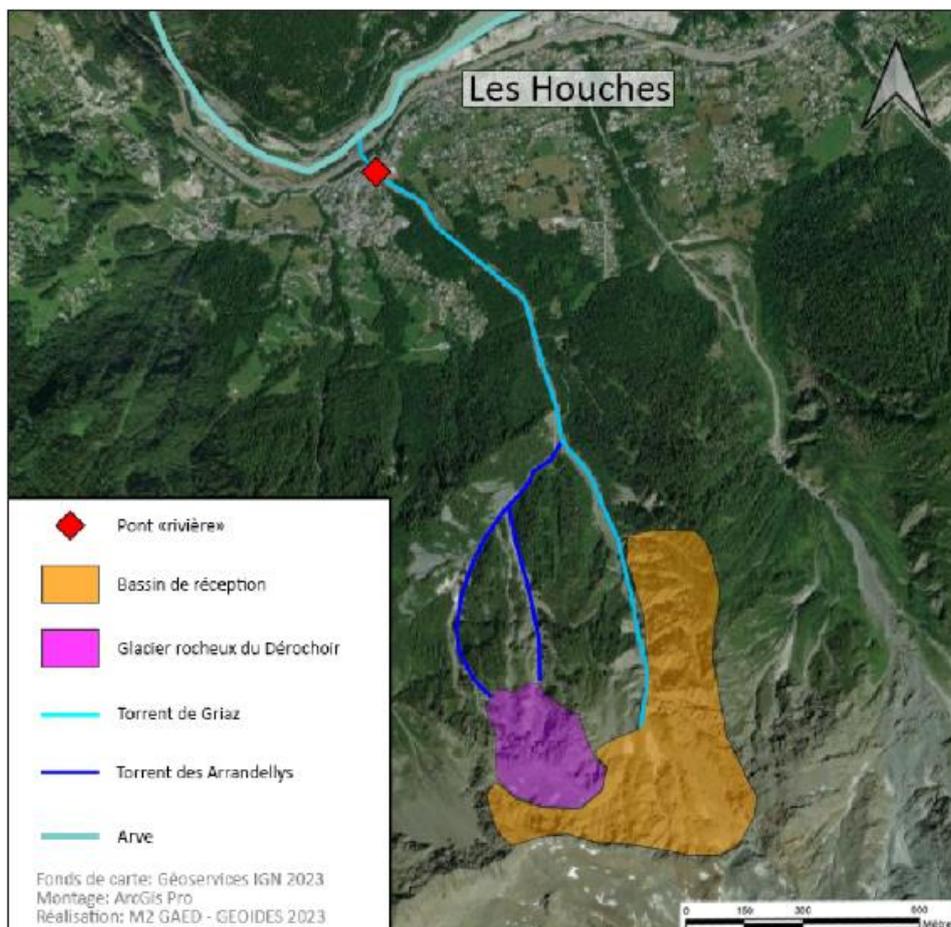


Figure 38 : Bassin versant des Arrandellys / Griez (M2 Géoïdes, 2023).

Au niveau de la vallée de Chamonix, le torrent de la Griez traverse le hameau du même nom avant de se jeter dans l'Arve. De fréquentes laves torrentielles de l'ordre de  $10\,000\text{ m}^3$  se

produisent et ont nécessité une série d'aménagements en vallée (P. Schoeneich, entretien du 11 janvier 2023). Un impressionnant « pont-rivière » (Photo 9) ainsi qu'une série de digues permettent la bonne traversée par les matériaux des espaces anthropisés.



*Photo 9 : L'impressionnant « pont rivière » au-dessus de la N205 (SM3A, 2023).*

Les différents torrents des Arrandellys sont alimentés via un petit glacier rocheux de 38 000 m<sup>2</sup> (le glacier rocheux du Dérochoir). Celui-ci est perché directement au-dessus du bassin de réception de ces torrents (Photo 10). Il contribue ainsi à l'apport d'environ 1 000 m<sup>3</sup>/an de matériaux solides aux laves torrentielles produites (P. Schoeneich, entretien du 11 janvier 2023).



*Photo 10 : Front du glacier rocheux du Dérochoir au-dessus de Les Houches (Kummert et al., 2021).*

Le glacier rocheux du Dérochoir est l'un des cinq glaciers rocheux suivis par le réseau PermaFrance (Kummert et al, 2021). Son instrumentation est constituée de thermomètres de surface et de subsurface ainsi que de GPS. Les premiers résultats démontrent une tendance à l'augmentation de sa vitesse d'écoulement en lien avec les réchauffements climatiques. Cette vitesse mesurée de manière relativement homogène aux alentours de 20 cm par an au 20<sup>ème</sup> siècle correspond de nos jours à environ 80 cm par an. Ceci se traduit par une érosion au front du glacier en augmentation (Figure 39).

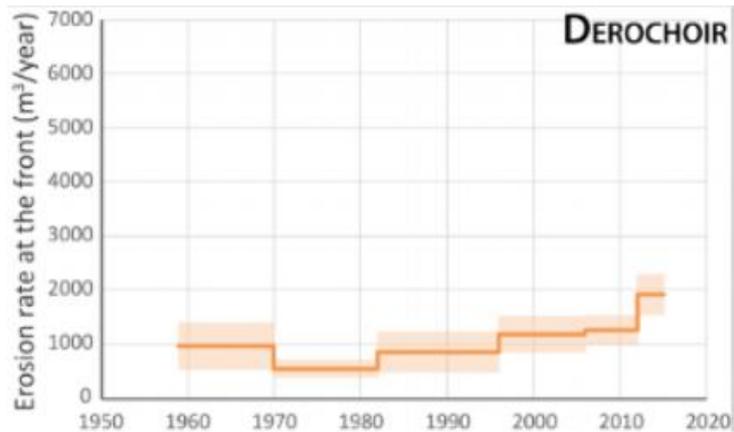


Figure 39 : Érosion en m<sup>3</sup>/an du front du glacier rocheux du Dérochoir (Kummert et al., 2021).

Les contributions aux laves torrentielles du bassin versant paraissent, pour l'instant, marginales. Toutefois, une déstabilisation de l'ensemble ou d'une grande partie du glacier est crainte, ce qui justifie le suivi, toujours d'actualité, de ce glacier rocheux qui est donc identifié comme le 1<sup>er</sup> glacier rocheux à risque dans les Alpes françaises.

### 3.4. Conclusion sur les ROGP

Les ROGP sont des risques relativement bien étudiés depuis une vingtaine d'années. Toutefois, il semble que cette connaissance se limite au cas par cas et soit encore à ses débuts en ce qui concerne les interactions complexes qui peuvent régir ces risques entre eux ou avec leur environnement. De même, la modélisation ou l'anticipation de ces phénomènes en cascade, tout comme leurs évolutions possibles en fonction des différents scénarios, sont de nos jours encore du spéculatif.

À l'échelle des Alpes françaises, ces risques sont particulièrement inféodés à des localités précises et de faibles surfaces. De même, peu d'enjeux sont concernés puisque ces risques se trouvent dans le domaine de la haute montagne. Ceux-ci correspondent pour leur grande majorité à des installations de station de ski ou des refuges. Toutefois, la vallée de Chamonix, située au pied même du sommet de l'Europe, regroupe à la fois la plupart des ROGP mais aussi des enjeux importants directement impactés par leurs évolutions.

La prise en compte des ROGP reste encore émergente en France et est bien souvent représentée par des décisions et adaptations locales en réaction à des phénomènes ponctuels. Toutefois, l'élaboration actuellement conduite des PAPROG démontre une volonté du politique à s'investir dans ce domaine.

## Conclusion générale

Cette étude porte sur l'évolution de la gestion des risques dans les Alpes et ce au travers de deux cas d'étude : la tempête Alex et les risques d'origine glaciaire et périglaciaire dans la vallée de Chamonix.

Il a été rappelé dans un premier temps, la chronologie de l'évolution de la législation et de la gestion de crise des risques naturels en France. Du premier document de gestion (Plan de surface submersible) en 1935 jusqu'à la mise en place des PICS (Plans intercommunaux de sauvegarde) en passant par la création du fonds Barnier en 1984, un panel des documents et lois a été dressé afin de mieux appréhender les enjeux et le contexte actuel en France. Ensuite, une présentation rapide et succincte a été faite d'une gestion de crise en France. Le système pyramidal de gestion de crise a été résumé et sa structure permettant d'apporter une réponse rapide et opérationnelle décrite. La prise en charge successive des échelons supérieurs permet de pallier le manque de moyen de l'échelon inférieur lorsque celui-ci ne possède pas assez de moyens financiers, techniques et humains pour faire face à un événement. La mise en évidence de l'importance de la communication entre les acteurs et d'une préparation en amont est claire et semble primordiale pour gérer au mieux un événement.

Le premier cas d'étude sur la commune de Saint-Martin-Vésubie a permis de rendre compte de la gestion de crise en temps réel d'un événement, ici dépassant de loin les précédents. Bien qu'ayant été préparée aux aléas des inondations, la commune s'est retrouvée dépassée par l'ampleur de l'événement. Pour autant, la simple existence des documents tels que le PCS a permis de limiter les pertes et les dégâts. Cette vulnérabilité accentuée face à cet événement majeur a permis la construction d'un « Porter à Connaissance » afin d'initier des modifications sur plusieurs documents cartographiques de prévention. La commune a pris conscience de l'ampleur que pouvait avoir un événement majeur et c'est pourquoi, une mise à jour des dispositifs d'alarme, accompagnée d'une révision du PCS et d'exercices d'entraînement a été faite.

Si ce premier exemple illustre bien la complexité de gestion d'un événement même lorsque celui-ci est connu et documenté depuis plus d'un siècle et que l'on sait comment y faire face, il n'en reste pas moins un exemple de réponse face à cette problématique de risque naturel qui tend à s'accroître dans les années à venir en raison du changement climatique.

Le second cas d'étude, centré sur la vallée de Chamonix, permet d'illustrer une autre facette de la gestion de crise en France. Si les risques d'origine glaciaire et périglaciaire dans les Alpes ne sont pas nouveaux dans cette région, leur documentation et législation en matière de gestion de crise semblent pourtant encore émergentes.

Malgré une littérature fournie et une instrumentalisation des sites d'études sur la compréhension de la multitude d'aléas qui existent, la rareté des événements couplée à une échelle très localisée ne permettent pas une prise en charge aussi importante que pour l'aléa inondation par exemple. En partant d'une classification de ces aléas proposée par le PARN, il

a pu être mis en évidence les différents programmes d'études et d'actions existants autour de cette thématique. Par le biais d'entretiens, suffisamment d'informations ont été compilées pour cibler quatre points d'études précis pour en comprendre les enjeux mais également les risques.

Finalement, les risques d'origines glaciaires et périglaciaires nécessitent encore un travail de documentation pour une meilleure prise en charge. Si peu d'événements ont eu lieu aujourd'hui, tout comme pour l'aléa inondation, le changement climatique va tendre à amplifier l'intensité des événements en plus d'en augmenter la fréquence. Pour autant, la vallée de Chamonix étant un territoire extrêmement touristique, une prise en charge simple impliquant la fermeture de certains sites et une sur-information envers les populations peut impliquer des effets négatifs sur l'attractivité du territoire ce qui implique toute une économie. La question de la gestion de ces risques est encore nouvelle à l'heure actuelle et donc beaucoup plus complexe et ne se limite pas seulement aux enjeux de sécurité mais englobe tous les acteurs d'un territoire. Il faut parler de gestion globale et généralisée.

## Bibliographie - Evolution de la législation

- Bellurot, N., Chapelon, J., Meignien, X., & Joannis de Verclos, C. (2013). Évaluation des dispositions visant à l'information préventive des citoyens vis-à-vis des risques naturels auxquels ils peuvent être exposés. *Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et de l'Énergie, Conseil général de l'environnement et du développement durable, 008684-01, Article 008684-01.*
- Blanc, P. (2022). *DGv1 – Organisation de la sécurité civile – IRMa*. Mémento du maire et des élus locaux. <https://www.mementodumaire.net/dispositions-generales-2/vigilance-alerte-et-secours/dgv1-organisation-de-la-securite-civile/>
- Challot, A. (1986). *Bilan provisoire des incendies de forêts dans le sud-est de la France en 1986, les grands feux et la prévention.*
- DDT - service urbanisme et risques (SUR). (2013). *Qu'est-ce qu'un PPR ?* Les services de l'Etat dans l'Ain. <https://www.ain.gouv.fr/qu-est-ce-qu-un-ppr-a105.html>
- Deville, J. (2009). *L'incendie meurtrier dans la forêt des Landes en août 1949*. Les Éditions des Pompiers de France.
- Douvinet, J., Pallares, R., Genre-Grandpierre, C., Gralepois, M., Rode, S., & Servain-Courant, S. (2013). *L'information sur les risques majeurs à l'échelle communale.*
- Episeine. (2021). *Outil – Le plan familial de mise en sûreté*. Episeine. <https://episeine.fr/ressource/outil-le-plan-familial-de-mise-en-surete>
- Kowalski, J.-J. (2009). *Organisation et structuration du dispositif ORSEC.*
- Lavole, M. (2022). *R8 – Plan communal de sauvegarde (PCS) et Plan Intercommunal de Sauvegarde (PICS)—IRMa*. Mémento du maire et des élus locaux. <http://www.mementodumaire.net/responsabilites-du-maire-2/r8-plan-communal-de-sauvegarde-pcs/>
- Légifrance. (1982). *Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.*
- Légifrance. (1987). *Loi n°87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs.*
- Légifrance. (1992). *Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau.*
- Légifrance. (1995). *Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement.*
- Légifrance. (2003). *Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.*
- Légifrance. (2004). *Loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile.*
- Légifrance. (2021). *Loi n° 2021-1520 du 25 novembre 2021 visant à consolider notre modèle de sécurité civile et valoriser le volontariat des sapeurs-pompiers et les sapeurs-pompiers professionnels (rectificatif).*
- Mauerhan, F. (2022). *Incendies : Avec plus de 62.000 hectares brûlés, l'année 2022 d'ores et déjà record.* ici, par France Bleu et France 3. <https://www.francebleu.fr/infos/environnement/incendies-avec-plus-de-62-000-hectares-brules-l-annee-2022-d-ores-et-deja-record-1661523187>
- Nahon, M., & Michaloux, M. (2016). L'organisation de la réponse de la sécurité civile : Le dispositif ORSEC. *Journal Européen des Urgences et de Réanimation, 28(2), 94-99.* <https://doi.org/10.1016/j.jeurea.2016.06.002>
- Olei, S. (2018). *Le dossier départemental sur les risques majeurs (DDRM)*. Cerema.
- Préfecture de la Haute-Savoie, Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt, Office National des Forêts, & Service de Restauration des Terrains en Montagne. (s. d.). *PPR INONDATION DE L'ARVE Commune de VETRAZ-MONTHOUX.*

- Préfet du Doubs. (2022). *Plan de Prévention des Risques d'inondation (PPRI) du Doubs amont*. [doubs.gouv.fr](https://www.doubs.gouv.fr). <https://www.doubs.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Securite-et-protection-de-la-population/Risques-majeurs/Risques-inondations/Plans-de-Prevention-des-Risques-d-Inondation-PPRI/Le-Plan-de-Prevention-des-Risques-d-inondation-PPRI-du-Doubs-amont>
- Retailleau, C. (2022, juin 29). Le plan d'opération interne. *GESIP*. <https://gesip.com/plan-operation-interne/>
- Rouselon, M. (2013). *Le Plan d'Organisation de Mise en Sécurité (POMSE) dans les entreprises et les établissements recevant du public*. Institut des Risques Majeurs. [http://www.irma-grenoble.com/01actualite/01articles\\_afficher.php?id\\_actualite=529](http://www.irma-grenoble.com/01actualite/01articles_afficher.php?id_actualite=529)
- Terranota. (2021). *Les plans de risque : Comment s'y retrouver?* Le blog de Terranota. <http://blog.terranota.fr/2021/05/05/les-plans-de-risque-comment-sy-retrouver/>
- Toulemont, M. (1992). Les conditions d'application de la loi du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles aux dommages dus à la sécheresse. *Revue Française de Géotechnique*, 58, Article 58. <https://doi.org/10.1051/geotech/1992058027>
- UNALCI. (s. d.). *Outils de la prévention : Loi Matras – PCS & PICS – UNALCI*. UNALCI - France Inondations. Consulté 11 décembre 2022, à l'adresse <https://www.unalci-france-inondations.org/outils-de-terrain-2/>

## Bibliographie - Tempête Alex

- Branchereau, A. (2021). *Gestion de crise lors de la tempête Alex—Présentation : Service interministériel de défense et de protection civiles des Alpes-Maritimes*.
- Brocart, B. (2008). *Plan Prévention Risque Inondation (Saint-Martin-Vésubie)*.
- Brocart, B. (2010). *Plan de prévention des risques naturels prévisibles relatif aux crues torrentielles à Saint-Martin-Vésubie*.
- Capelli, H., Fuzellier, A., & Fromentin, E. (2022). *Tempête Alex : Deux ans après le drame, la renaissance progressive de Saint-Martin-Vésubie*. Franceinfo. [https://www.francetvinfo.fr/meteo/tempete/tempete-alex/tempete-alex-deux-ans-apres-le-drame-la-renaissance-progressive-de-saint-martin-vesubie\\_5390248.html](https://www.francetvinfo.fr/meteo/tempete/tempete-alex/tempete-alex-deux-ans-apres-le-drame-la-renaissance-progressive-de-saint-martin-vesubie_5390248.html)
- Cerema. (2021). *De quoi la tempête Alex a-t-elle été le catalyseur ? Le replay du webinaire Cerema*. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/quoi-tempete-alex-t-elle-ete-catalyseur-replay-du-webinaire#:~:text=Le%20replay%20du%20webinaire%20Cerema,-20%20d%C3%A9cembre%202021&text=Le%2009%20d%C3%A9cembre%202021%2C%201e,les%20vall%C3%A9es%20des%20Alpes%2DMaritimes>.
- CNRM. (s. d.-a). *AROME - Centre National de Recherches Météorologiques*. Consulté 11 février 2023, à l'adresse <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article120>
- CNRM. (s. d.-b). *ARPEGE - Centre National de Recherches Météorologiques*. Consulté 11 février 2023, à l'adresse <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article121>
- Département des Alpes-Maritimes. (2020). *Moyens engagés*. Département des Alpes-Maritimes. <https://www.departement06.fr/tempete-alex-mesures-du-departement/moyens-engages-37486.html>
- Département des Alpes-Maritimes. (2021). *Tempête Alex : 1 an après le drame*. Département des Alpes-Maritimes. <https://www.departement06.fr/actualites-24/tempete-alex-1-an-apres-le-drame-45753.html?cHash=67c5bff13d47e7c237166282162b451f>
- Fredj, L., & Teobaldi, J.-C. (2020). *Synthèse : Entreprises touchées – Bâtiments et équipements publics détruits ou impactés—Intentions des personnes sinistrées – Questions de la population – Idées proposées par les habitants pour les aménagements futurs*. 20.
- Géorisques. (2022). *Vigicrues : Le service pour s'informer sur les crues*. Géorisques. <https://www.georisques.gouv.fr/me-preparer-me-proteger/vigicrues-le-service-pour-sinformer-sur-les-crues>

- Geufroi, S. (2021). *Tempête Alex. Le bilan s'alourdit, 10 morts et 8 disparus*. Ouest-France.fr. <https://www.ouest-france.fr/meteo/tempete/tempete-alex-le-bilan-s-alourdit-10-morts-et-8-disparus-7134909>
- Gonzales, B. (2021). *Recommandations relatives à la prise en compte des conséquences de la tempête Alex dans l'instruction des demandes d'autorisations d'urbanisme—Porter à connaissance*.
- IGN. (2021). *Tempête Alex : Un avion de l'IGN photographie les zones sinistrées*. IGN institut. <https://www.ign.fr/institut/nos-domaines-d-intervention/prevention-des-risques/tempete-alex-un-avion-de-lign-photographie-les-zones-sinistrees>
- Jardinet, A. (16 décembre 2022). *Retour sur la tempête Alex à Saint-Martin-Vésubie* [Entretien].
- Le Monde. (01 octobre 2022). *Deux ans après la tempête Alex, reconstruction express dans l'arrière-pays de Nice* [Le Monde]. [https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/10/01/deux-ans-apres-la-tempete-alex-reconstruction-express-dans-l-arriere-pays-de-nice\\_6143985\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2022/10/01/deux-ans-apres-la-tempete-alex-reconstruction-express-dans-l-arriere-pays-de-nice_6143985_3244.html)
- Martin, E. (2022). *C'est quoi ce projet de bassin d'eau vive à Saint-Martin-Vésubie ?* www.20minutes.fr. <https://www.20minutes.fr/planete/4003762-20221006-alpes-maritimes-deux-ans-apres-tempete-alex-projet-bassin-eau-vive-fait-remous-saint-martin-vesubie>
- Météo-France. (2020a). *Tempête Alex : Des intempéries exceptionnelles*. Météo-France. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/climat/tempete-alex-des-intemperies-exceptionnelles>
- Météo-France. (2020b). *Bilan climatique de l'automne 2020* (p. 10).
- Ministère de l'Intérieur et des Outre-mer. (2020). *Tempête Alex : Les gendarmes assurent l'évacuation des personnes à Saint-Martin-Vésubie* (06). <https://www.youtube.com/watch?v=K18kGZMkARI>
- Queffelec, Y., & Guitet, C. (2022). *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie Volet torrentiel*.
- Rey, T., Chevret, C., Candela, T., & Robustelli, M. (2022). *Leçons tirées de la crue torrentielle catastrophique du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie (Alpes-Maritimes, France)*. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, Volume 17, Article Volume 17. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.14922>
- Sirpa Gendarmerie. (2020). *Tempête Alex : La gendarmerie mobilise tous ses moyens dans les Alpes-Maritimes*. <https://www.gendarmerie.interieur.gouv.fr/gendinfo/dossiers/tempete-alex-un-engagement-sans-precedent-face-a-la-catastrophe/tempete-alex-la-gendarmerie-mobilise-tous-ses-moyens-dans-les-alpes-maritimes>
- SMIAGE. (2021). *Diagnostic approfondi et partagé du territoire, dossier de candidature à la labellisation du PAPI Var 3*. (p. 186).
- Travaux publics et bâtiments du midi (TPBM). (2022). *Tempête Alex : « L'ensemble des financements de l'Etat sont disponibles et décaissables »*. TPBM. <https://www.tpbm-presse.com/tempete-alex-l-ensemble-des-financements-de-l-etat-sont-disponibles-et-decaissables-94600.html>
- Vigicruces. (2022). *Vigicruces : Utelle [Pont du Cros] (Vésubie)*. <https://www.vigicruces.gouv.fr/niv3-station.php?CdEntVigiCru=22&CdStationHydro=Y633404001&GrdSerie=H&ZoomInitial=1>
- Vitiello, J.-B. (2021). *Tempête Alex un an après : Émission spéciale—YouTube*. [https://www.youtube.com/watch?v=opl4jbhZAC4&ab\\_channel=France3Provence-Alpes-C%C3%B4ted%27Azur](https://www.youtube.com/watch?v=opl4jbhZAC4&ab_channel=France3Provence-Alpes-C%C3%B4ted%27Azur)
- Zugasti, T., & Merad, M. (2022). *Que pouvons-nous apprendre de la catastrophe de Saint-Martin-Vésubie ? Une approche historico-systémique*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35324.41608>

## Bibliographie – ROGP

- Bardou E. (2012). *Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. Faculté Enac, disponible sur [researchgate](https://www.researchgate.net/publication/312511111).
- Bodin, X., Schoeneich, P., Deline, P., Ravanel, L., Magnin, F., Krysiecki, J.-M., & Echelard, T. (2015). Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés : Évolutions récentes dans les Alpes françaises. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 103-2, Article 103-2. <https://doi.org/10.4000/rga.2806>
- Boudières, V., & Peisser, C. (2013). *Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et périglaciaire (ROGP). Synthèse des connaissances et des pratiques*. Pôle Alpin d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels.
- Caroly, S., Weissbrodt, R., Bodin, X., Ravanel, L., Rossier, Z., & Dufay, O. (Éds.). (2022). Confrontation à des cas réels de déstabilisations de versant rocheux pour accéder à la représentation d'un risque émergent lié au permafrost de montagne : Enjeux de construction d'une gouvernance. *Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement : actes du 56e Congrès de la SELF*, 756-761.
- Coussot, P. (1992). *Rhéologie des boues et laves torrentielles : étude de dispersions et suspensions concentrées*. Thèse de doctorat, Grenoble INPG.
- Deline, P., Coviello, V., Cremonese, E., Gruber, S., Krautblatter, M., Jailliet, S., Malet, E., Cella, U. M. D., Noetzi, J., Pogliotti, P., Rabatel, A., Ravanel, L., Sadier, B., & Verleysdonk, S. (2009). L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : Un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude. *Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques*, 8, 135-146.
- Duvillard, P.-A., Ravanel, L., Marcer, M., & Schoeneich, P. (2019). Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>
- Huggel, C., Allen, S., Deline, P., Fischer, L., Noetzi, J., & Ravanel, L. (2012). Ice thawing, mountains falling—Are alpine rock slope failures increasing? *Geology Today*, 28(3), 98-104. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2451.2012.00836.x>
- Kummert, M., Bodin, X., Braillard, L., & Delaloye, R. (2021). Pluri-decadal evolution of rock glaciers surface velocity and its impact on sediment export rates towards high alpine torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3213-3227. <https://doi.org/10.1002/esp.5231>
- Lahousse, P., & Guen, R. (1998). Le lac proglaciaire d'Arsine (Alpes françaises, massif du Pelvoux) : Un risque de vidange brutale définitivement écarté ? *Revue de Géographie Alpine*, 86(3), 49-59. <https://doi.org/10.3406/rga.1998.2891>
- Laily, B. (2005). *Le lac épiglaciaire de Rochemelon, Savoie—Commune de Bessans. De la crise de 2004 à la vidange contrôlée de 2005. Note de synthèse*. (p. 80). ONF - Service Départemental RTM Savoie.
- Magnin, F., Deline, P., Ravanel, L., Noetzi, J., & Pogliotti, P. (2015). Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l.). *The Cryosphere*, 9(1), 109-121. <https://doi.org/10.5194/tc-9-109-2015>
- Marcer, M. (2018). *Déstabilisation des glaciers rocheux dans les Alpes Françaises : Une évaluation à l'échelle régionale et locale* [Université Grenoble Alpes]. <https://www.theses.fr/2018GREAU048>
- Meunier, M. (1994). *Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels*. La houille blanche, 80(3) : 25-31.
- Naaim-Bouvet, F., & Richard, D. (2015). *Les risques naturels en montagne*. Editions Quae.
- Olivieri, L., & Bettanini, C. (2022). Preliminary observation of Marmolada glacier collapse of July 2022 with space-based cameras. *Remote Sensing Letters*, 14(1), 21-29. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2152754>

- PARN. (2012). *Gestion des risques d'origine glaciaire et périglaciaire : Document préparatoire au séminaire technique sur les risques glaciaires et périglaciaires.*
- Ravanel, L., Allignol, F., Deline, P., Gruber, S., & Ravello, M. (2010). Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. *Landslides*, 7, 493-501. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0206-z>
- Ravanel, L., & Deline, P. (2008). La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : Évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7444>
- Ravanel, L., Deline, P., Lambiel, C., & Vincent, C. (2013). Instability of a high alpine rock ridge: The lower arête des cosmiques, mont blanc massif, france. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95(1), 51-66. <https://doi.org/10.1111/geoa.12000>
- Ribeyre, C. (2016). *La lave torrentielle du 24 août 2015 (Lanslevillars, Savoie) : Un cas de dégradation du pergélisol dans le contexte du réchauffement climatique ? Étude de l'évolution des dynamiques du glacier-rocheux du col du Lou entre 1970 et 2016 : Approche par photogrammétrie.* [Mémoire de Master 2]. Université Grenoble Alpes.
- Thibert, E., & Bodin, X. (2022). Changes in surface velocities over four decades on the Laurichard rock glacier (French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 33(3), 323-335. <https://doi.org/10.1002/ppp.2159>
- Vincent, C., Auclair, S., & Meur, E. L. (2010). Outburst flood hazard for glacier-dammed Lac de Rochemelon, France. *Journal of Glaciology*, 56(195), 91-100. <https://doi.org/10.3189/002214310791190857>
- Vincent, C., Descloitres, M., Garambois, S., Legchenko, S., Guyard, H., Thibert, E., Gilbert, A., Karr, N., & Tairraz, V. (2012). Détection d'une poche d'eau au glacier de Tête Rousse en 2010 et mesures préventives pour éviter une catastrophe. *La Houille Blanche*, 2, Article 2. <https://doi.org/10.1051/lhb/2012013>

## Table des figures

Figure 1 : Chronologie des évènements ayant fait évoluer les lois et les outils relatifs aux risques naturels en France depuis 1935 (M2 Géoïdes, 2022, d'après les sources suivantes : Bellurot et al., 2013 ; Challot, 1986 ; DDT-SUR, 2013 ; Deville, 2009 ; Douvinet et al., 2013 ; Kowalski, 2009 ; Lavole, 2022 ; Légifrance, 1982, 1987, 1992, 1995, 2003, 2004, 2021 ; Mauerhan, 2022 ; Nahon et Michaloux, 2016 ; Olei, 2018 ; Préfet du Doubs, 2022 ; Préfecture de la Haute-Savoie et al., s.d. ; Terranota, 2021 ; Toulemont, 1992 ; UNALCI, s.d.).	7
Figure 2 : Organisation face aux situations d'urgence en France selon différents niveaux et échelles d'actions (M2 Géoïdes, 2022, d'après les sources suivantes : interieur.gouv.fr ; Rousselon, 2013 ; Episeine, 2021 ; Blanc, 2022 ; Retailleau, 2022).	9
Figure 3 : Commune de Saint-Martin-Vésubie : réseau hydrographique et espaces construits (M2 Géoïdes, 2022).	10
Figure 4 : Cumul des précipitations en 24 heures du 02/10/2020 à 06h UTC au 03/10/2020 à 06h UTC (Météo-France, 2020b).	11
Figure 5 : Caractéristiques hydrogéomorphologiques sur la commune de Saint-Martin-Vésubie (Brocart, 2008).	13
Figure 6 : Aléas sur la commune Saint-Martin-Vésubie (Brocart, 2008).	13
Figure 7 : Enjeux sur la commune de Saint-Martin-Vésubie (Brocart, 2008).	13
Figure 8 : Plan de Prévention du Risque Inondation de la commune de Saint-Martin-Vésubie (Brocart, 2010).	14
Figure 9 : Ouvrages de protection réalisés sur le Boréon, la Madone de Fenestre et la Vésubie (Brocart, 2008).	15
Figure 10 : Organisation du service vigicrues (Ministère de la transition écologique, 2022).	17
Figure 11 : Zones touchées par la crue et emprise de ce qu'il y avait avant la crue (Infoclimat, 2020).	19
Figure 12 : La situation avant/après la tempête Alex dans la commune de Saint-Martin-Vésubie. © images pré-catastrophe (esri world imagery - 2016), images post-catastrophe (pléiades, cnes 2020, distribution airbus ds) (Rémy Decourt pour Futura Sciences, 2020).	20
Figure 13 : Chronologie de la gestion de crise dans le département des Alpes-Maritimes du 1er au 3 octobre 2020 (M2 Géoïdes, 2023, adapté d'après Branchereau, 2021, avec source supplémentaire : A. Jardinet, entretien du 16 décembre 2022).	21
Figure 14 : Principales actions d'une gestion de crise mises en œuvre lors de la crise de la tempête Alex (M2 Géoïdes, 2022, d'après Branchereau 2021).	22

Figure 15 : Localisation des dégâts à Saint-Martin-Vésubie (IGN - Sertit, 2020) (Rémy Decourt pour Futura Sciences, 2020).....	23
Figure 16 : Impacts géomorphologiques et paysagers de la crue de la Vésubie à Saint-Martin-Vésubie. Sources : BD Ortho 2019 et BD Ortho octobre 2020, IGN 2020. Conception Chevret, 2021 (Rey et al., 2022).....	25
Figure 17 : Impacts morfo-sédimentaires de la crue torrentielle le long de la vallée de la Vésubie. Fond de figure : BD Topo 2019, IGN 2020. Conception Chevret, 2021 (Rey et al., 2022).....	26
Figure 18 : Montant et sources de financement pour restaurer la vallée de la Vésubie (CEREMA, 2021).....	29
Figure 19 : Localisation des bâtiments endommagés ou détruits et comparaison de l'enveloppe de crue délimitée au 2 octobre 2020 avec les zonages PPRI (à gauche) et AZI (à droite) à Saint-Martin-Vésubie (Rey et al., 2022). ....	31
Figure 20 : Aléas crues torrentielles et mouvements de terrain à Saint-Martin-Vésubie, d'après les données du PAC, 2021. Source (Rey et al., 2022).....	33
Figure 21 : Esquisse d'une préconisation de reconstruction des routes à 50-60 m du lit au niveau du Boréon à Saint Martin Vésubie par le RTM (Queffelec et al., 2022). ....	34
Figure 22 : Évolution des outils de gestion des risques disponibles à Saint-Martin-Vésubie avant et après la tempête Alex (M2 Géoïdes, 2022). ....	36
Figure 23 : Déroulement de la gestion de crise du lac de Rochemelon en 2004 (Lailly, 2005).39	
Figure 24 : Chute d'un sérac en aval du glacier (M2 Géoïdes, 2022).....	41
Figure 25 : Rupture d'un glacier fragilisé (M2 Géoïdes, 2022). ....	41
Figure 26 : Déstabilisation d'un glacier rocheux (M2 Géoïdes, 2022). ....	42
Figure 27 : Représentation du champ de l'hydraulique par rapport aux mouvements de terrain et à l'hydraulique fluviale (Meunier, 1994).....	43
Figure 28 : Représentation d'une lave torrentielle (Meunier et al., 1997).....	44
Figure 29 : La déstabilisation d'une paroi rocheuse (M2 Géoïdes, 2022). ....	45
Figure 30 : Actions de prévention requises selon les acteurs (Caroly et al., 2022). ....	48
Figure 31 : Mutation de la montagne : accès perdu pour une course historique, le Pas de la Chèvre depuis le Montenvers (Mourey, 2020). ....	50
Figure 32 : localisation des quatre secteurs étudiés de la vallée de Chamonix (M2 Géoïdes, 2022).....	52

Figure 33 : Vue sur les Aiguilles de Chamonix depuis la vallée. L’Aiguille du Midi correspond au sommet à droite, détaché du reste des Aiguilles de Chamonix par une arête en neige. Grande lithographie réalisée vers 1860 (Weibel & Jaccotet, 1860). .....	53
Figure 34 : L’Aiguille du Midi et ses annexes (M2 Géoides, 2023). .....	53
Figure 35 : A gauche : tomographie électrique résistive en 2008. A droite : modèle polygonal 3D (Deline et al, 2009). .....	55
Figure 36 : A gauche : écroulement de 600 m <sup>3</sup> sous le refuge en 1998. A droite : modélisation des écroulements de la saison estivale 2010 (Huggel et al., 2012). .....	56
Figure 37 : Le glacier des Bossons (en bleu ciel à droite) surplombe le hameau du même nom.....	57
Figure 38 : Bassin versant des Arrandellys / Griaz (M2 Géoides, 2023). .....	60
Figure 39 : Érosion en m <sup>3</sup> /an du front du glacier rocheux du Dérochoir (Kummert et al., 2021). .....	62

## Table des photos

Photo 1 : Vue amont du pont de Venanson sur la commune de Saint-Martin-Vésubie (Queffelec et al., 2022). Le pont endommagé ne permet plus de relier le centre de la commune aux quartiers périphériques. Celui-ci sera démantelé le 22 octobre 2021.....	27
Photo 2 : Alpinistes à la descente de l’Aiguille du Midi (Gadiolet, 2018). .....	54
Photo 4 : Écroulement à la Brèche du Rappel sur l’arête des Cosmiques le mercredi 22 août 2018 (La Chamoniarde, 2018). .....	56
Photo 5 : A gauche : le torrent de la Creuse traverse à trois niveaux la N205 sous des ponts cadres (Wikipédia, 2023). A droite : inondation de 1996. Vue du centre-ville de Chamonix (Le Dauphiné Libéré, 08/10/2020). .....	58
Photo 6 : Incision dans le barrage morainique du lac pro-glaciaire des Bossons (Le Dauphiné Libéré, 15/06/2022). .....	58
Photo 7 : Vue d’ensemble des ouvrages du paravalanche de Tacconnaz (Glacier-climat.fr, 2022). .....	59
Photo 8 : Glaciers des Bossons (à gauche) et de Tacconnaz (à droite) (Gadiolet, 2016). .....	60
Photo 9 : L’impressionnant « pont rivière » au-dessus de la N205 (SM3A, 2023). .....	61
Photo 10 : Front du glacier rocheux du Dérochoir au-dessus de Les Houches (Kummert et al., 2021). .....	61

## Table des tableaux

Tableau 1 : Perception de la gravité du risque (Caroly et al., 2022).....	48
---	----

## Table des matières

Introduction générale .....	5
1. Mise en contexte de l'évolution de la législation.....	5
1.1. Chronologie des lois relatives aux risques naturels .....	5
1.2. Schéma de l'organisation face à la situation d'urgence en France selon les différentes échelles d'action .....	7
2. Le cas d'étude de la tempête Alex.....	10
2.1. AVANT : état des lieux et contexte à Saint-Martin-Vésubie avant la tempête Alex .....	11
2.1.1. Retour d'expérience de grands évènements dans le département des Alpes- Maritimes .....	11
2.1.2. Outils de prévention mis à disposition de la population à Saint-Martin-Vésubie 12	
2.1.3. Préparation et anticipation de futures crises.....	15
2.1.4. Moyens de surveillance à Saint-Martin-Vésubie .....	16
2.2. PENDANT : gestion de crise pendant la tempête Alex.....	18
2.2.1. Gestion de la crise .....	18
2.2.2. Bilan des dégâts humains et matériels .....	22
2.2.3. Bilan des moyens humains mis en place.....	23
2.3. APRES : conséquences de la tempête et adaptations du territoire.....	24
2.3.1. Conséquences environnementales de la tempête Alex sur la commune : modifications du fond de vallée .....	24
2.3.2. Conséquences sur les biens et les infrastructures de la commune .....	26
2.3.2.1. Le besoin de réhabiliter les réseaux stratégiques .....	26
2.3.2.2. Les problèmes posés par les bâtiments détruits ou endommagés .....	28
2.3.2.3. L'enjeu financier.....	29
2.3.3. Réduction de la vulnérabilité de la commune en adaptant les documents techniques et l'aménagement du territoire.....	30
2.3.3.1. Adaptation de la législation indispensable à la reconstruction de la commune .....	30
2.3.3.2. Adaptation du territoire : un aménagement plus résilient face au risque.	32

2.4.	Conclusion sur l'évolution de la législation suite à la tempête Alex.....	35
3.	Risques d'origine glaciaires et périglaciaires (ROGP).....	37
3.1.	Synthèse des ROGP .....	37
3.1.1.	Les phénomènes glaciaires issus d'eau sous forme liquide.....	37
3.1.1.1.	Lac proglaciaire : le lac d'Arsine.....	37
3.1.1.2.	Lac supraglaciaire : le lac de Rochemelon .....	38
3.1.1.3.	Poche d'eau interglaciaire : glacier de Tête Rousse .....	40
3.1.2.	Les phénomènes glaciaires issus d'eau sous forme solide .....	40
3.1.2.1.	Les chutes de séracs.....	40
3.1.2.2.	La rupture partielle ou complète du glacier .....	41
3.1.3.	Les phénomènes périglaciaires .....	42
3.1.3.1.	Déstabilisation des glaciers rocheux.....	42
3.1.3.2.	Les crues et laves torrentielles.....	43
3.1.3.3.	La dégradation du permafrost et la fragilisation des parois rocheuses .....	45
3.2.	La gestion et le suivi des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire .....	46
3.2.1.	Les dispositifs d'étude et de suivi.....	46
3.2.2.	Adaptation et résilience .....	49
3.3.	La vallée de Chamonix : gestion du risque en quatre études de cas.....	52
3.3.1.	L'Aiguille du Midi et ses annexes .....	52
3.3.2.	Le glacier des Bossons .....	57
3.3.3.	Le glacier de Tacconnaz .....	58
3.3.4.	Le glacier rocheux du Dérochoir .....	60
3.4.	Conclusion sur les ROGP .....	62
	Conclusion générale .....	63
	Bibliographie - Evolution de la législation .....	65
	Bibliographie - Tempête Alex.....	66
	Bibliographie – ROGP.....	68
	Table des figures .....	70
	Table des photos .....	72
	Table des tableaux .....	73
	Table des matières.....	73