

## Rapport de stage

Cycle des Ingénieurs 3<sup>ème</sup> année de l'ENSG – Carthagéo

---

Mise en place d'un outil de restitution des dommages  
postsismiques pour les acteurs du secours

---

Joséphine Boyer

27 septembre 2022

Non confidentiel    Confidential IGN    Confidential Industrie

## Jury

Président de jury : Emmanuel FRITSCH

Membres du jury : Jacques GAUTIER, Sébastien MUSTIERE, Nicolas PAYET

## Organisme de stage

BRGM – Division Risque et Prévention, Unité Risques Sismique et Volcanique  
3 Avenue Claude Guillemin - 45000 Orléans

## Encadrement de stage

Samuel AUCLAIR, ingénieur sismologue

Johanna VIEILLE, ingénieure risque sismique

## Professeur référent

Sébastien MUSTIERE

## Responsable pédagogique du cycle Ingénieur

Jean-François HANGOUET, IGN/ENSG/PEGI

## Responsable pédagogique du cycle 3<sup>ème</sup>année Carthagéo :

Nicolas PAYET, IGN/ENSG

## Stage du 20 avril 2022 au 20 octobre 2022

Diffusion web :  Internet  Intranet

Situation du document : Rapport de stage de fin d'études présenté en fin de 3<sup>ème</sup>année du cycle des Ingénieurs

Nombre de pages : 51 dont 9 d'annexes

## Modifications :

Edition	Révision	Date	Pages modifiées
X		juillet 2022	Introduction, Parties 1, 2
X		août 2022	Parties 3 et 4
X	X	septembre 2022	Partie 4, Relecture, Conclusion

# Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier Samuel Auclair et Johanna Vieille, mes tuteurs, pour m'avoir accueilli au sein du BRGM. Leurs accompagnement, conseils et leur confiance m'ont aidé à progresser tout au long de mon travail. Nos échanges m'ont beaucoup apporté, il a été très agréable de collaborer avec des personnes à l'écoute et attentives comme eux, qui ont su me laisser une grande autonomie.

Je remercie naturellement les membres de l'Unité Risques Sismique et Volcanique pour l'accueil qu'ils m'ont réservé au sein de leurs bureaux à Orléans. J'ai pu profiter de conditions de travail optimales et d'une bonne ambiance de travail. Je voulais aussi exprimer ma gratitude envers les sapeurs-pompiers de l'Entente-Valabre et des départements de l'Isère et des Alpes-Maritimes, en particulier le lieutenant-colonel Franck Fiorelli. Merci pour la confiance qu'ils m'ont accordée et pour leurs retours indispensables à la réalisation de mon travail.

Je remercie Sébastien Mustière, mon professeur référent, pour son suivi attentif et ses précieux conseils. Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'ENSG qui a contribué à la réussite de ce travail en accompagnant ma scolarité depuis ces trois dernières années, mon cursus à l'ENSG m'a permis d'acquérir des compétences et connaissances qui me permettent de m'intégrer sereinement dans le monde du travail.

# Résumé

La survenue de séismes est susceptible de générer des dommages aux personnes et aux biens sur des territoires très étendus, et ainsi de produire des crises généralisées nécessitant une réponse de sécurité civile rapide et de grande ampleur. Pour ce faire, il est nécessaire de pouvoir dresser aussi rapidement que possible un « paysage » de la situation dégradée, afin notamment de dimensionner et d'engager de manière adaptée les équipes de secours. Pour répondre à ce besoin, le BRGM travaille depuis des années au développement d'outils de modélisation permettant l'évaluation rapide des dommages résultants de séismes.

Mon stage intervient au moment où le BRGM souhaite mettre en place les recommandations du projet européen BELICE dans son système de génération automatique et rapide de communiqués dédié aux acteurs de la sécurité-civile. Ce projet apporte des conseils sur la préparation des autorités à la gestion de crise, en proposant notamment à ces dernières d'établir une sectorisation qui permet de répartir les équipes de sauvetage-déblaiement pour couvrir rapidement et entièrement la zone touchée par un séisme.

Dans ce contexte, l'objectif principal du stage est de proposer une solution de cartographie d'urgence qui met en place cette sectorisation et restitue une estimation des dommages à plusieurs échelles dont celle de la sectorisation. En suivant les recommandations des acteurs du secours (sapeurs-pompiers ayant la spécialité USAR), j'établirai la spécification des besoins en termes d'indicateurs et de modalités de restitution. A partir de cela, je proposerai un maquettage cartographique des restitutions, puis le mettrai en place pour générer une cartographie de façon automatique, grâce à un plugin QGIS qui sera mis à la disposition des acteurs du secours.

Mots-clefs : gestion de crise, séisme, cartographie d'urgence, estimation des dommages, BELICE, ASR, USAR, BRGM

# Abstract

The occurrence of an earthquake can generate damages to people and properties over very large areas thus producing widespread crises requiring a rapid and large-scale civil protection response. To do so, it is necessary to be able to draw up as quickly as possible an overview of the degraded situation, in order to size and engage in an adapted way the rescue teams. To meet this need, BRGM (French geological survey) has been working for some years on the development of modeling tools allowing the rapid damage assessment resulting from earthquakes.

My internship occurs when BRGM wishes to implement the recommendations of the European BELICE project in its system of automatic and rapid report generation dedicated to the actors of civil security. This project provides advice on the preparation of authorities for crisis management, by suggesting to the latter to establish a sectorization that allows the distribution of USAR teams to cover efficiently the area impacted by an earthquake.

Thus, the main objective of the internship is to develop an emergency mapping solution that uses this sectorization and shows an estimation of the damages at multiple scales. Following the recommendations of the safety forces - firemen having the USAR specialty, I will establish the specification of the needs in terms of indicators and restitution form. From this, I will suggest a cartographic model as a restitution of the calculated damages, then I will implement it to generate a cartography in an automatic way, through a QGIS plugin, that will be at the disposal of the safety forces.

Keywords: crisis management, earthquake, emergency cartography, damage assessment, BELICE, ASR, USAR, BRGM

# Table des matières

Introduction .....	9
1. Contexte et objectifs .....	11
1.1. BRGM.....	11
1.2. Dimensionnement des secousses d'un séisme .....	11
1.3. Etude du besoin et des ressources existantes.....	12
1.3.a. Difficulté de l'estimation des pertes humaines et dommages matériels.....	12
1.3.b. SEISAid.....	13
1.3.c. Coopérations internationales .....	16
1.4. Objectifs du stage et interlocuteurs .....	17
2. Automatisation du zonage USAR.....	19
2.1. Projet BELICE.....	19
2.1.a. Ouverture à une sectorisation USAR .....	19
2.1.b. Limites du plugin QGIS BELICE pour la création d'une sectorisation automatique	20
2.2. Méthode proposée.....	23
2.3. Implémentation .....	25
2.4. Résultats .....	29
3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone.....	33
3.1. Génération d'une carte des dommages avec Vigirisks et QGIS .....	33
3.1.a. Présentation de Vigirisks .....	33
3.1.b. Choix du scénario et estimation des dommages.....	35
3.2. Construction de la cartographie d'urgence .....	40
3.2.a. Recueil des besoins cartographiques .....	40
3.2.b. Création de la maquette .....	42
3.3. Création d'un plugin QGIS pour la mise à disposition des rapports.....	45
4. Difficultés rencontrées et perspectives .....	47
4.1. Difficultés rencontrées .....	47
4.2. Pistes d'amélioration sur le contenu de la cartographie .....	47
4.3. Développements supplémentaires pour le plugin .....	48
Conclusion .....	50

# Glossaire et sigles utiles :

ASR	Assessment, Search and Rescue : Niveaux d'interventions définis par l'INSARAG pour organiser la réponse post-sismique dans le temps.
BELICE	Building Experience to Lead Initial Assessment in Challenging Emergency : Projet européen visant à proposer un cadre méthodologique pour la réalisations des activités USAR dans les premières heures après la survenue d'un séisme.
BCSF	Bureau Central Sismologique Français : Organisme qui centralise et diffuse les données sur les séismes affectant le territoire français.
BRGM	Service géologique national (Bureau de Recherches Géologiques et Minières)
EMS-98	European Macroseismic Scale 98 : Echelle européenne d'évaluation de l'intensité des secousses sismiques
Entente-Valabre	Centre de formation des métiers de la Sécurité Civile, de la Recherche, des Nouvelles Technologies et de la Prévention dans le domaine des risques naturels
INSARAG	International Search And Rescue Advisory Group : Organe de l'ONU, l'INSARAG est un réseau de pays et d'organisations qui établit des standards et structure la communauté internationales intervenant dans le champs du sauvetage-déblaiement.
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Économiques
PGA	Alternative instrumentale (i.e. mesurable) à l'intensité macroseismique, le PGA – qui est l'accélération maximale du sol – est une mesure utile pour

évaluer rapidement la sévérité des secousses sismiques. Elle est mesurée en pourcentage de  $g$ ,  $g$  étant l'accélération de la pesanteur.

SDIS	Service Départemental d'Incendies et de Secours
SEISAid	Outil développé par le BRGM qui envoie de manière autonome et rapide un bilan des dommages estimés aux autorités.
USAR	Urban Search And Rescue : Anciennement appelé « Sauvetage-Déblaiement » en France, c'est un type de sauvetage qui consiste à localiser, extraire et soigner les victimes piégées sous décombres.
USGS	United States Geological Survey : Service géologique américain
Vulnérabilité	La vulnérabilité permet de quantifier la capacité de résistance des enjeux. Elle influe sur l'estimation des dommages, car - confronté à la même agression sismique - un bâtiment plus vulnérable aura plus de dommages qu'un autre moins vulnérable.
Vigirisks	Plateforme développée par le BRGM qui rassemble les codes scientifiques du BRGM portant sur les risques naturels, tels que des traitements pour modéliser des scénarios sismiques, de mouvements de terrain ou de submersion marine.

# Introduction

La survenue d'un séisme en France métropolitaine constitue un risque majeur, à cause des enjeux d'ordre humains, économiques et environnementaux qui s'y concentrent. Les dégâts causés par les secousses entraînent la mise en danger des personnes et des biens sur un large territoire, et le risque est peu inscrit dans les mémoires car les périodes de retour dépassent la durée d'une vie humaine. Il est donc impératif de se préparer au mieux à gérer ce risque, qui ne peut être évité ou prédit, où une réponse efficace des autorités compétentes peut sauver beaucoup de vies si elle est bien menée.

Le BRGM (service géologique national), étudie le risque sismique et aide les autorités dans la gestion de crise. J'y ai effectué mon stage de fin d'étude dans le but d'appliquer les préconisations issues du projet BELICE (*Building Experience to Lead Initial Assessment in Challenging Emergency*<sup>1</sup>), un projet européen de protection civile qui s'est terminé en 2021. Ce projet a émis des recommandations visant à améliorer et préparer la réponse des services de secours avant le séisme et dans les premières heures le suivant, connues pour être critiques quant à l'organisation des secours et l'évaluation des dégâts.

Pour améliorer la mise en place de la réponse postseismique, le BRGM développe des outils de modélisation permettant l'évaluation rapide des dommages causés par un séisme. Ainsi, mon rôle sera de proposer un prototype d'application basé sur les outils actuels du BRGM et qui proposera une cartographie des dommages et des zones d'intervention pour répartir au mieux les équipes de sauvetage, tout en prenant en compte les recommandations du projet BELICE et celles d'acteurs opérationnels.

Dans un premier temps, il faudra s'acculturer au monde de la gestion de crise postseismique, à travers l'étude du projet BELICE, qui introduit une notion de sectorisation pour répartir les équipes de sauvetage : c'est ce zonage que je vais réaliser de façon automatique. Pour cela, je réaliserais des géotraitements, et le zonage sera validé par les utilisateurs finaux (i.e. les acteurs du secours). Ensuite, une fois les outils du BRGM pris en main, je proposerai une méthode de cartographie automatique des dommages qui reprend le zonage précédemment établi, et je réaliserais des maquettes pour la restitution des résultats, afin de valider les besoins cartographiques des utilisateurs opérationnels. Enfin, il s'agira d'implémenter cette solution pour avoir un outil à mettre à disposition des acteurs de la sécurité civile.

---

<sup>1</sup> <https://www.beliceproject.eu/>



# 1. Contexte et objectifs

## 1.1. BRGM

Le BRGM est le service géologique national français, il est l'établissement public français de référence pour l'application des Sciences de la Terre. Plus de 700 chercheurs et ingénieurs y travaillent pour comprendre les phénomènes géologiques, développer de nouvelles techniques, produire et diffuser des données et des outils sur la gestion du sol et des ressources, la prévention des risques et des pollutions, les politiques de réponse au changement climatique.

J'ai effectué mon stage au sein de la *Direction Risques et Prévention (DRP)*, plus particulièrement dans l'*Unité Risques Sismique et Volcanique (RSV)*. Cette unité regroupe des sismologues et géophysiciens qui étudient le risque sismique dans le monde entier.

Le BRGM travaille avec des organisations publiques et privées, partout dans le monde. Dans ce contexte et celui de mon stage, je serai amenée à dialoguer avec les partenaires du BRGM qui organisent la réponse postseismique, à savoir les sapeurs-pompiers spécialisés dans le « sauvetage-déblaiement » des Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS) des Alpes-Maritimes et de l'Isère, et de l'Entente Valabre.

## 1.2. Dimensionnement des secousses d'un séisme

Afin de mieux comprendre les enjeux et le contexte de l'outil développé, je présente dans cette sous-partie comment les secousses d'un séisme sont mesurées et comment les dommages en résultant sont caractérisés. Un séisme se traduit par des vibrations du sol causées par une rupture de roches en profondeur. Cette rupture se traduit par la libération et la diffusion d'ondes sismiques qui peuvent occasionner des dommages importants en atteignant la surface. Par ailleurs, la nature du sous-sol et la topographie peuvent localement augmenter l'amplitude des ondes sismiques, on appelle cela les effets de site. En plus de sa localisation, l'amplitude, la fréquence et la durée du séisme sont des facteurs qui influent sur le potentiel destructeur d'un séisme. Ainsi, les secousses d'un séisme peuvent être perçues dans un rayon de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres.

Lorsqu'un séisme survient, il s'agit avant tout d'estimer l'ampleur du phénomène, caractérisée par la magnitude et par l'intensité macrosismique. La mesure qui rend compte de la puissance d'un séisme est la magnitude : elle peut être évaluée de différentes manières mais est unique pour un séisme donné. Souvent associée à « l'échelle de Richter », elle est « ouverte » (i.e. ne dispose ni de valeur minimale ni de valeur maximale) et logarithmique : l'augmentation d'un degré de la magnitude correspond à une énergie libérée trente fois plus forte. Ainsi, un séisme de magnitude 6 est par exemple 900 fois plus puissant qu'un séisme de magnitude 4 ( $30^{6-4} = 30^2$ ).

Pour estimer l'impact du séisme à la surface, on évalue l'intensité macrosismique ( $I$ ) qui qualifie la sévérité des secousses à partir des effets constatés à chaque point de la surface. En Europe, l'échelle utilisée pour la mesurer est l'EMS-98 (European Macroseismic Scale 1998), qui est une indication descriptive des effets ressentis par les humains et des dommages potentiels aux bâtiments (Grünthal et Levret 2001). Elle dépend du point d'observation, et est d'autant plus forte que l'épicentre est proche ou que la nature du sol amplifie les secousses (effets de site). L'échelle comporte douze

degrés d'intensité, écrits en chiffres romains pour ne pas confondre avec la magnitude exprimée en chiffres arabes. A partir des valeurs d'intensité, l'échelle définit cinq degré de dommages aux bâtiments. Le BRGM utilise cette classification des dommages, qui est illustrée sur la Figure 1.1 ci-dessous.

	Bâtiments en maçonnerie	Bâtiments en béton armé	Description des dégâts
Degré 1			Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)
Degré 2			Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
Degré 3			Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)
Degré 4			Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)
Degré 5			Destruction (dégâts structuraux très importants)

Figure 1.1 - Echelle de dégâts aux bâtiments EMS-98 pour les constructions en maçonnerie et en béton armé. Source : (Grünthal et Levret 2001)

### 1.3. Etude du besoin et des ressources existantes

A la suite de l'apparition d'un séisme, il est nécessaire de dresser rapidement un tableau de la situation afin d'organiser la réponse de la sécurité civile, qui doit permettre de répondre aux besoins immédiats tout en prévoyant un retour progressif à la normale. Il faut donc une évaluation rapide de l'ampleur de la crise, plutôt qu'une estimation fine et donc longue à obtenir à partir des constatations du terrain. Cette sous-partie présente les outils et méthodes actuellement en place pour décrire la situation juste après le début d'un séisme.

#### 1.3.a. Difficulté de l'estimation des pertes humaines et dommages matériels

Les expériences passées montrent qu'il est difficile d'avoir une estimation de l'ampleur des bilans humain et matériel rapidement. Sur la Figure 1.2 ci-dessous est illustré le modèle de (Tang, et al. 2019), qui estime la progression temporelle du taux de connaissance du nombre de personnes décédées, réalisé à partir de retours d'expériences suite à plusieurs séismes japonais. On voit qu'il est difficile d'obtenir rapidement une vision claire du nombre de victimes qui sont découvertes progressivement, surtout si le nombre de victimes est élevé.

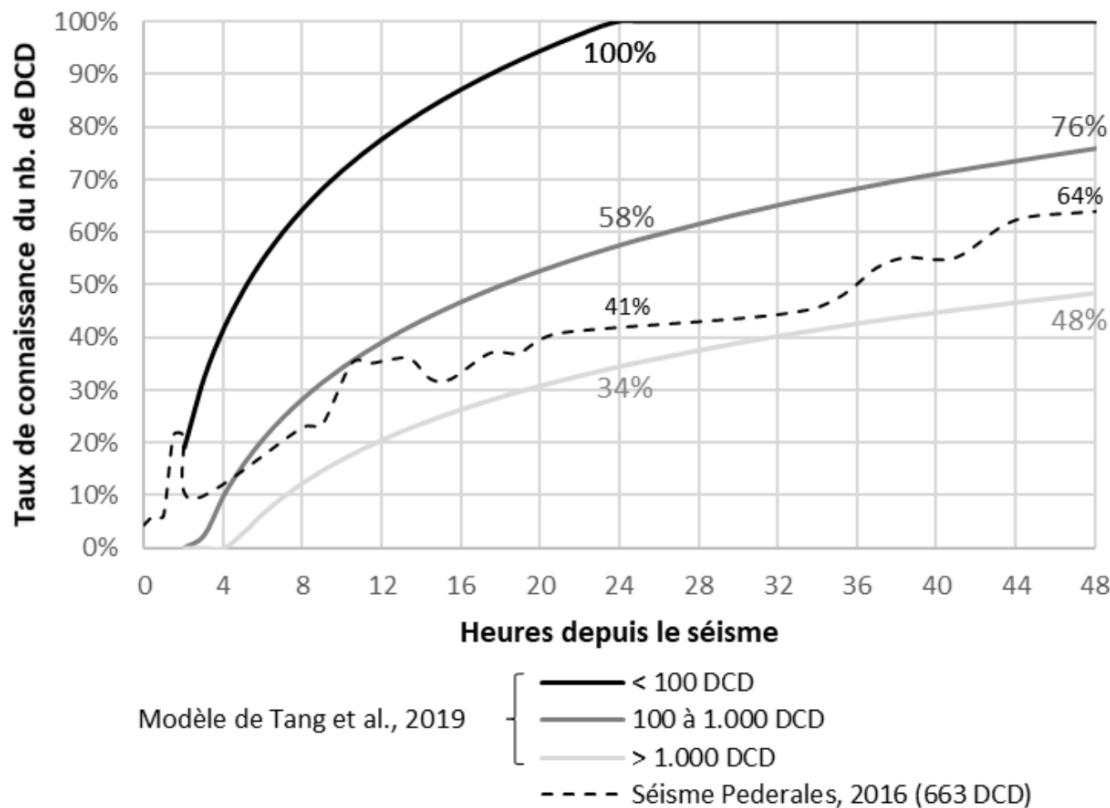


Figure 1.2 – Evolution dans le temps du taux de connaissance du nombre de personnes décédées (notés « DCD ») – Source : BRGM, à partir des données du Secrétariat équatorien de la gestion des risques, et du modèle de Tang et al., 2019

Par exemple, en pointillés est illustré le taux de connaissance du nombre de décédés les jours suivants le séisme de Pedernales (2016), d'après les points de situations publiés par le Secrétariat équatorien de la gestion des risques. Il leur a fallu plus de deux jours pour dresser un bilan qui couvre moins de 70% du bilan humain total en termes de personnes décédées. L'expérience montre qu'il faut beaucoup plus de temps encore pour obtenir une vision fiable de l'ampleur du bilan matériel.

### 1.3.b. SEISAid

Pour contrer cela, le BRGM a développé SEISAid, un outil qui met à disposition des acteurs de la sécurité civile une estimation rapide des dommages une demi-heure après les premières secousses. Ce compte-rendu de la situation prend la forme d'un communiqué PDF d'une page recto, envoyé par mail de façon automatique. Je ne travaillerai pas sur cet outil, mais mon travail servira à le compléter vis-à-vis de recommandations abordées en 1.3.c et décrites plus loin. SEISAid a aussi pour vocation de rendre l'information accessible à des acteurs qui ne sont pas sismologues de métier, une étape de vulgarisation est donc nécessaire pour traduire les notions de magnitude et d'intensité macroseismique en paramètres qui dimensionnent la réponse à mettre en place. Pour ce faire, on évalue l'intensité macroseismique, que l'on croise avec la vulnérabilité du bâti exposé, afin d'avoir une estimation du nombre de blessés graves et de bâtiments détruits.

## 1. Contexte et objectifs

L'intensité est évaluée grâce au logiciel *ShakeMaps* développé par l'United States Geological Survey (USGS), et qui permet de croiser à la fois des données de modèles (atténuation, effets de site) et d'observations issues d'observatoires sismologiques, complétées par des témoignages récoltés en quelques dizaines de minutes par internet (par le BCSF en France), un exemple de Shakemap est proposé en Figure 1.3.

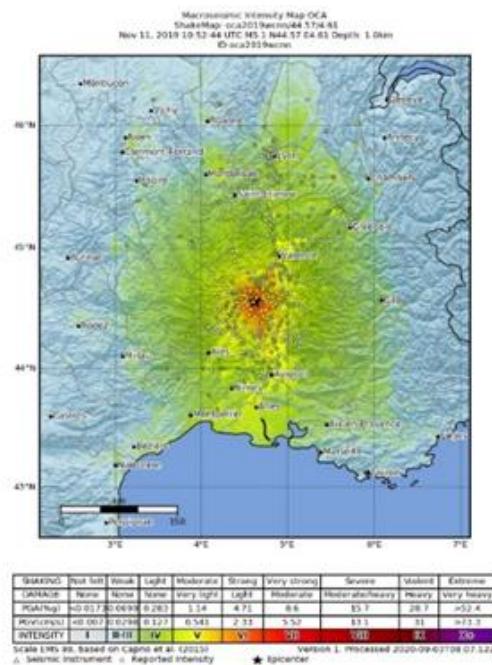


Figure 1.3. Exemple de ShakeMap réalisée par GéoAzur pour le séisme du 11/11/2019 –  
Source : GéoAzur

L'outil SEISAid du BRGM utilise des modèles capables de croiser une évaluation de l'intensité des secousses sismiques avec les bâtiments vulnérables exposés, processus illustré en Figure 1.4.

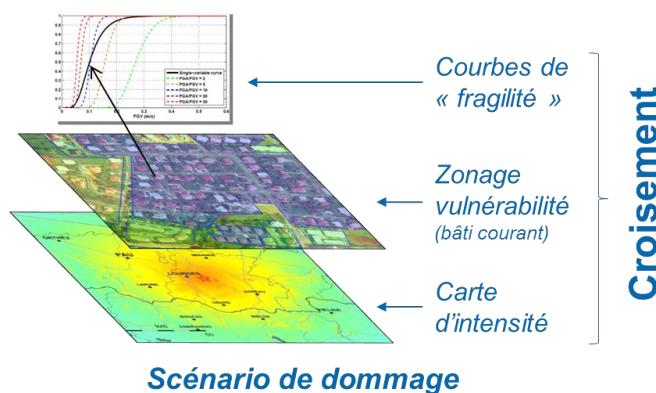
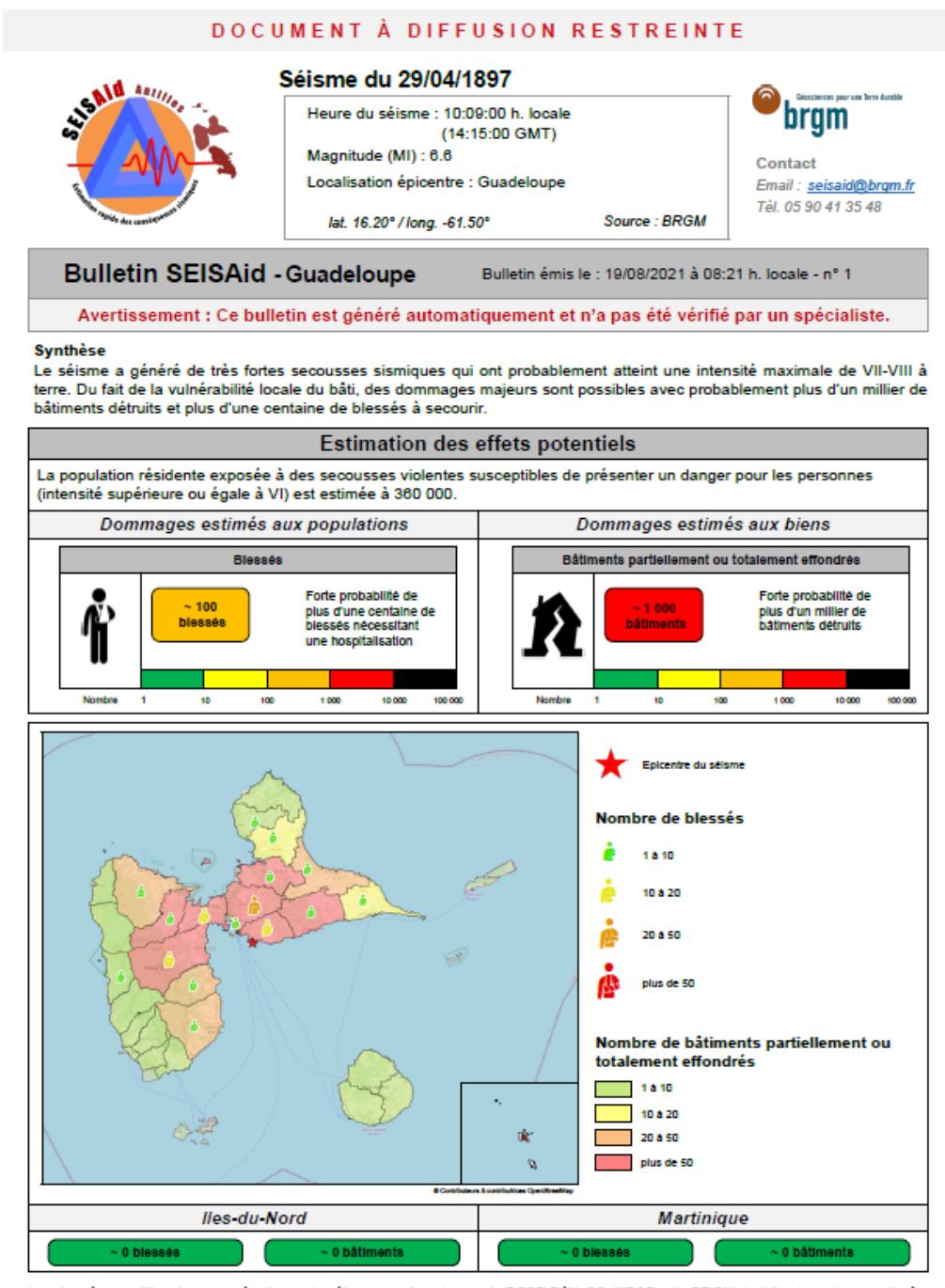


Figure 1.4. Représentation schématique de la manière dont le BRGM procède pour réaliser un scénario de dommage par modélisation – Source : BRGM

Ce croisement permet une estimation statistique de la répartition des pertes matérielles et humaines à l'échelle de quartiers ou de communes. Ces modèles permettent la réalisation des bulletins SEISAid, dont un exemple est représenté en Figure 1.5.



**DOCUMENT À DIFFUSION RESTREINTE**

Figure 1.5. Exemple de communiqué SEISAID réalisé par le BRGM aux Antilles pour un séisme de scénario reprenant les caractéristiques du séisme historique du 29 avril 1897 – Source : BRGM

L'estimation des dommages est ainsi réalisée de telle manière que les autorités locales puissent dimensionner la réponse qu'elles apportent à la crise. En effet, la situation d'immense confusion que crée un séisme est propice au désordre et à l'aggravation de ses conséquences. Une bonne préparation dès les premiers instants de la crise permet aux équipes d'opérer plus sereinement et efficacement pour un retour rapide à la normale.

### 1.3.c. Coopérations internationales

Pour aider à organiser cette réponse, les organisations de sécurité civile italienne, allemande et française ont participé au projet BELICE : *Building Experience to Lead Initial Assessment in Challenging Emergency*<sup>2</sup>. Je décrirai son contenu dans le paragraphe 2.1.

Ce projet est soutenu par l'INSARAG : un bureau des Nations Unies qui organise les activités de sauvetage-déblaiement (également appelées USAR : *Urban Search and Rescue*) après un séisme, en publiant des recommandations et en proposant une méthode qui optimise l'organisation du pays touché et de l'aide internationale lors d'un séisme. Les lignes directrices de l'INSARAG dictent des principes de conduite pour les équipes USAR, qui sont des personnes spécialement formées pour rechercher et mener les opérations de sauvetage des victimes sous-décombres. La méthode publiée, et acceptée au niveau international, propose cinq phases d'action (i.e. cinq types de travaux), de l'évaluation de la zone touchée à la déconstruction d'un bâtiment pour retrouver les dernières victimes. Une description de ces cinq phases est visible sur la Figure 1.6, elles sont appelées ASR (« Assessment Search and Rescue ») et sont suivies d'un numéro de 1 à 5 qui indique leur chronologie (INSARAG 2020).

**Annex B20: Assessment, Search and Rescue Level**

ASR Levels	Descriptions	Definition and Purpose	Carried out who/when
1	Wide Area Assessment.	Preliminary survey of the affected areas for the purpose of developing the Sectorisation plan, BoO options and overall plan of action.	LEMA/UNDAC/first Responder few USAR Teams in country at the onset.
2	Sector Assessment.	Fast pace methodical assessment to identify viable live rescue sites within assigned sector.	USAR Teams assigned to respective sector.
3	Primary Search and Rescue.	Conduct in early stages – Fairly rapid progress through assigned worksite to maximise lifesaving opportunities.	USAR Team(s) assigned to respective side.
4	Secondary Search and Rescue.	Thorough search through all survivable voids involving full range of USAR capabilities usually at one worksite.	USAR Team(s) assigned to respective side.
5	Full Coverage Search and rescue.	Complete search of entire worksite to locate all life and deceased victims. 2 options for use complete delayering of collapsed structures or room to room clearance of non-collapsed structures.	LEMA, sometimes together with USAR Teams at the of rescue phase.

Figure 1.6 - Lignes directrices de l'INSARAG : Niveaux d'ASR - Source : (BELICE 2019)

---

<sup>2</sup> <https://www.beliceproject.eu/>

Le projet BELICE fournit une méthodologie et des formations pour effectuer l'évaluation à grande échelle initiale, ou ASR-1. Le guide publié à son issue donne des conseils pour classifier l'urgence et prioriser les méthodes d'évaluation pour mobiliser les ressources nécessaires. Ce projet est d'autant plus utile que les directives INSARAG ne décrivent pas comment l'ASR-1 doit être conduite.

Dans le cadre de mon travail, je vais mettre en place les résultats de ce projet dans une cartographie automatique, qu'il faudra faire valider au préalable par les sapeurs-pompiers.

### 1.4. Objectifs du stage et interlocuteurs

L'objectif principal de mon stage sera de compléter l'outil SEISAid afin qu'il puisse être utilisé par les équipes USAR. Actuellement, le bulletin émis par l'outil donne un aperçu très global et peu détaillé de la situation sur l'étendue impactée, visant ainsi les instances de coordinations de la gestion de crise, à savoir les préfectures. Or, avant même que la situation ne soit clarifiée sur la base de remontées d'informations, les équipes de sauvetage ont besoin d'avoir une idée des zones d'intervention prioritaires sur un territoire qui peut mesurer plusieurs centaines de kilomètres carrés. Pour ce faire, il faut produire une cartographie plus détaillée qui montre des indicateurs pertinents permettant une bonne répartition du nombre d'équipes sur le territoire sinistré. Cette cartographie utilise les mêmes modèles d'estimation des dommages que SEISAid, mais elle est plus détaillée pour décrire la situation au plus près des secours sur le terrain.

Cette cartographie devra être fournie pour appuyer l'organisation de l'ASR-2, qui débute après l'ASR-1 (soit en général six heures après le séisme), et qui consiste en la reconnaissance par les équipes USAR de secteurs où l'endommagement des bâtiments est susceptible d'avoir piégé des victimes sous les décombres. Elle devra présenter une sectorisation pour attribuer des zones de recherche aux équipes, chaque zone comptant un nombre équivalent de bâtiments à inspecter.

Tout au long de mon stage, je pourrai faire valider mes choix cartographiques par les pompiers des Alpes-Maritimes, qui sont spécialisés dans la gestion de crise postseismique, et avec lesquels le BRGM a lancé un partenariat. J'essaierai de répondre à leurs besoins tout en gardant à l'esprit que leur méthode de fonctionnement est spécifique à leur département, et que la solution qui sera amenée à être développée à la suite de mon travail doit être applicable sur d'autres territoires, et donc permettre de répondre à d'autres contraintes.

D'autre part, je travaillerai sur le département des Alpes-Maritimes, car c'est l'un des territoires les plus exposés au risque sismique en France métropolitaine : dans son bilan de 2019 sur les catastrophes naturelles en France, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) retient le scénario d'un séisme impactant le littoral niçois parmi les sept évènements d'origine naturelle nécessitant l'engagement de mesures extrêmes par l'Etat. De plus, le contact est déjà établi entre le BRGM et les sapeurs-pompiers spécialisés de ce département.

## 1. Contexte et objectifs

---

Enfin, le diagramme de GANTT présent en Annexe A-1 présente le déroulement du stage, les différentes étapes de mon travail, ainsi que les réunions importantes lors desquelles j'ai discuté de mon travail avec les sapeurs-pompiers pour identifier comment répondre à leurs besoins. Le cas particulier de ce stage est qu'il était difficile de prévoir un calendrier dès son début. D'une part, parce qu'on m'a laissé une grande autonomie qui m'a été utile pour explorer différentes pistes, et dont j'ai pu profiter pour tester plusieurs solutions et renforcer mes compétences pour des sujets que j'avais le plaisir de choisir. D'autre part, parce que les réunions avec les professionnels du secours étaient déterminantes pour identifier leurs besoins et poursuivre mon travail en fonction de ces besoins. La planification de mon travail s'est donc réalisée par étapes, suite aux rencontres avec les utilisateurs finaux.

En résumé, mon travail s'est réalisé en quatre grandes étapes : premièrement, j'ai créé un protocole de création automatique d'un zonage qui répond aux besoins émis par le projet BELICE et les sapeurs-pompiers. Ensuite, j'ai utilisé les outils du BRGM pour obtenir une estimation des dommages, que j'ai ensuite cherché à adapter au zonage précédemment établi. J'ai ensuite travaillé sur la restitution de cette cartographie en créant des mises en pages qui ont été validées par les sapeur-pompiers. Enfin, j'ai automatisé tous mes travaux à travers la création d'un plugin, qui permet (à partir d'un fichier qui contient l'estimation des dommages) de créer un zonage, calculer les dommages à plusieurs échelles dont celle des zones créées juste avant, et générer les mises en page aidant la mise en place de la réponse.

## 2. Automatisation du zonage USAR

La première étape de mon travail sera de proposer un zonage aux équipes USAR. Cet aspect de l'organisation de la réponse postseismique a été introduit par le projet BELICE, dans le contexte suivant.

### 2.1. Projet BELICE

#### 2.1.a. Ouverture à une sectorisation USAR

Le projet BELICE a rassemblé entre 2019 et 2021 le Corps National des sapeurs-pompiers italien (CNVVF), l'Entente Valabre via son Ecole d'Application de la Sécurité Civile (EcASC), et la Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW), un organisme de secours du gouvernement fédéral allemand. Il est à l'origine d'un guide et de manuels de formation pour les équipes USAR. Ces équipes spécialisées sont formées selon les directives de l'INSARAG, qui indiquent les méthodes de recherche, de sauvetage et d'assistance médicale. Mais les instructions de l'agence de l'ONU restent floues sur le rôle des équipes USAR dans les premières heures de la catastrophe, si bien que le projet BELICE a vu le jour.

Ce projet s'est articulé autour de phases de discussions (retours d'expériences, études de cas) et de formations, pour trouver une méthode qui soit fiable et en accord avec les recommandations déjà émises par l'INSARAG. Cette méthode est résumée dans un guide « Méthode de préparation et évaluation des dégâts sur de larges territoires » (BELICE 2019). C'est le document qui m'a servi de base de travail durant les premiers mois de mon stage, car mon travail consiste à adapter ce guide aux moyens d'aides à la décision proposés par le BRGM (notamment SEISAid).

L'un des grands axes de recommandation issus de ce guide est l'établissement rapide d'une sectorisation basée sur les caractéristiques du terrain touché, avec des données disponibles en « temps de paix » (par opposition à la crise), et qui optimise le déploiement des équipes de secours. Les modalités de création de cette sectorisation se fondent sur les expériences passées. On considère qu'une équipe de recherche passe en moyenne quinze minutes à inspecter chaque bâtiment, et que l'inspection de tous les bâtiments du territoire touché doit être réalisée en trois heures (c'est la durée de la phase ASR-2). Ainsi, considérant une moyenne de cinq binômes d'inspection bâtimentaire par zone de recherche, on obtient des zones de soixante bâtiments, comme expliqué sur la Figure 2.1 ci-dessous. En plus de cela, le rapport BELICE propose d'appliquer un coefficient réducteur de 20% pour prendre en compte les aléas liés au terrain, ce qui donne une cible d'une cinquantaine de bâtiments par zone. Pour délimiter les zones, il est recommandé d'utiliser le réseau routier, qui définit des blocs de bâtiments de structure assez homogène, et dont la délimitation est aisément repérable par des renforts extérieurs qui ne connaîtraient pas la région.

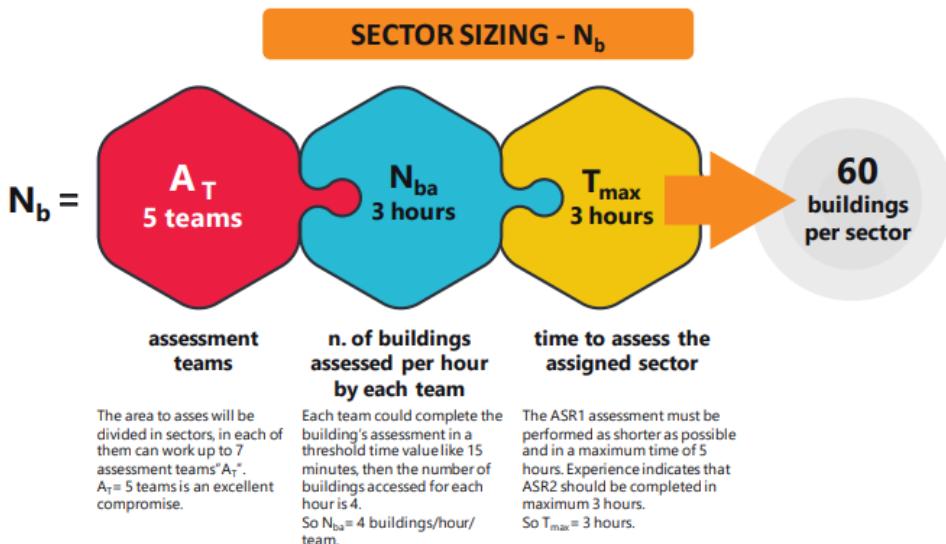


Figure 2.1 - Dimensionnement des secteurs : nombre maximal de bâtiments à évaluer par secteur  
(Guide BELICE, 2021)

Pour écarter l'établissement de cette sectorisation, il est recommandé aux autorités locales de préparer cette dernière en regroupant un maximum de données et de paramètres de leur zone pour disposer d'un plan de sectorisation. On parle alors de pré-sectorisation, et de phase pré-ASR.

C'est ce travail préparatoire que je devrai réaliser dans un premier temps, sur le département des Alpes-Maritimes. Pour aider à réaliser cette tâche, les membres du projet BELICE ont proposé un plugin QGIS<sup>3</sup> qui réalise cette sectorisation automatiquement à partir des réseaux routier, ferré et hydrographique. J'explique dans la partie suivante comment ce plugin fonctionne, en quoi il est intéressant, quelles sont ses limites et comment je m'en suis inspirée pour obtenir une bonne sectorisation.

## 2.1.b. Limites du plugin QGIS BELICE pour la création d'une sectorisation automatique

La solution proposée sous forme de plugin vise à mettre à disposition des équipes internationales une pré-sectorisation d'un territoire inconnu pour elles et touché par un événement sismique. Pour ce faire, le plugin doit prendre en entrée des données libres disponibles sur internet partout dans le monde. Ces données ne sont pas les plus précises, mais elles ont l'avantage d'être présentes là où les autorités locales n'en disposent pas.

---

<sup>3</sup> <https://www.beliceproject.eu/download-area/>

Le plugin fonctionne sur QGIS, avec pour paramètres d'entrée une couche de la population estimée, en format raster et une ShakeMap, généralement disponible vingt minutes après le séisme sur les sites internet d'organismes de surveillance sismologique. La ShakeMap demandée est une couche vectorielle de répartition du PGA (Peak Ground Acceleration) du séisme.

Pour obtenir ces données, les sites internet les plus répandus sont WorldPop d'une part, une base de données raster mondiale qui renseigne sur de nombreux indicateurs démographiques à une précision de cent mètres, on prendra le fichier qui compte le nombre d'habitants dans la zone touchée par le séisme. D'autre part, l'USGS est une source sûre pour obtenir des ShakeMap de presque tous les séismes destructeurs du monde. Pour compléter, le plugin extraira les réseaux de transport, l'hydrographie et les bâtiments depuis OpenStreetMap (OSM), une base de données géographique libre couvrant le monde entier. Les traitements réalisés pour obtenir la sectorisation sont les suivants.

La première étape du traitement est la délimitation de la zone impactée, dans laquelle la sectorisation sera créée. Le plugin délimite cette zone grâce à la carte d'intensité, en calculant l'étendue soumise à une intensité supérieure à un seuil choisi par l'utilisateur (entre 0.2 et 0.6% de g). La zone renvoyée est ensuite demandée dans un second plugin de traitement, accompagnée du fichier WorldPop du pays touché. Puis, le traitement fait une requête à OpenStreetMap pour obtenir les routes, les réseaux ferrés et l'hydrographie situés à l'intérieur du territoire touché. Ces géométries linéaires requêtées permettent de délimiter les zones d'intervention une fois converties en polygones. Enfin, une estimation des dommages par zone est menée grâce aux valeurs de PGA et de densité de population calculés dans chaque zone. Cette estimation est réalisée afin de prioriser les zones pour l'intervention, par conséquent, les zones classées prioritaires sont celles qui ont une forte densité de population, proches de l'épicentre. Enfin, le plugin propose une représentation en aplats blanc, vert, orange ou rouge selon l'urgence d'intervenir dans les zones.

J'ai utilisé ce plugin pour voir la sectorisation qu'il génère sur le séisme du 29 décembre 2020 ayant touché la ville de Petrinja en Croatie, de magnitude 6,4. Nous obtenons la carte sectorisée de la Figure 2.2 ci-dessous, avec les données de WorldPop et de l'USGS.

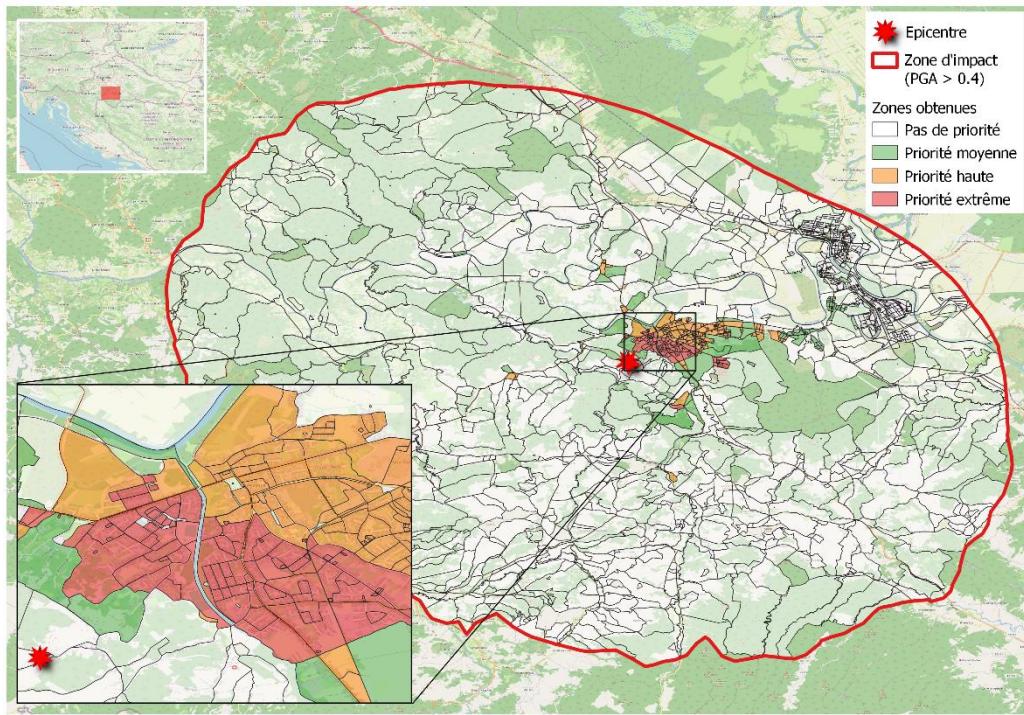


Figure 2.2 - Résultat de la sectorisation réalisée avec le plugin BELICE sur QGIS, pour le séisme de Petrinja du 29/12/2020.

Avec cette solution, nous obtenons une carte qui permet de décider quels secteurs sont à secourir en priorité, et ce quel que soit l'endroit du monde. Cependant, cela ne correspond pas forcément aux recommandations émises initialement, à savoir la délimitation de zones contenant une cinquantaine de bâtiments. Pour observer cela, j'ai regardé la répartition du nombre de bâtiments par zone, illustrée sur l'histogramme de la Figure 2.3, et obtenue par géotraitement à partir de la couche OSM des bâtiments.

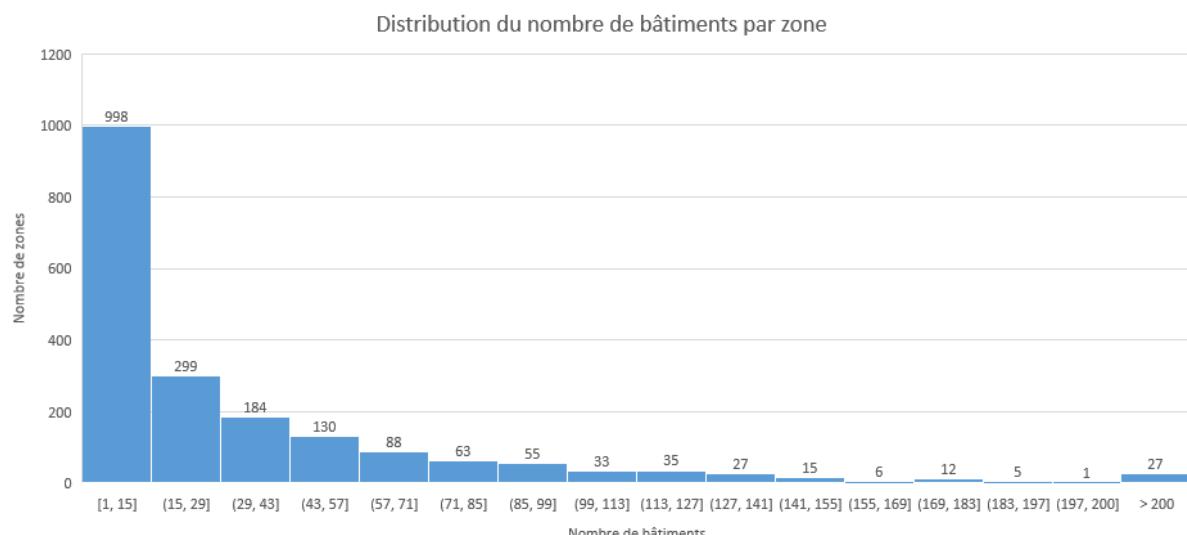


Figure 2.3 - Répartition du nombre de bâtiments par zone à la sortie du plugin BELICE, pour la zone épicentrale du séisme de Petrinja du 29/12/2020

Alors que l'objectif initial est de disposer de zones présentant chacune une cinquantaine de bâtiments, il est flagrant que la majorité des zones ainsi obtenues contiennent entre un et quinze bâtiments, et 66% des zones ont moins de trente bâtiments. Dès lors, je me suis inspirée de cette méthode, mais il était nécessaire de l'améliorer afin d'avoir des zones ayant un sens pour les services de secours.

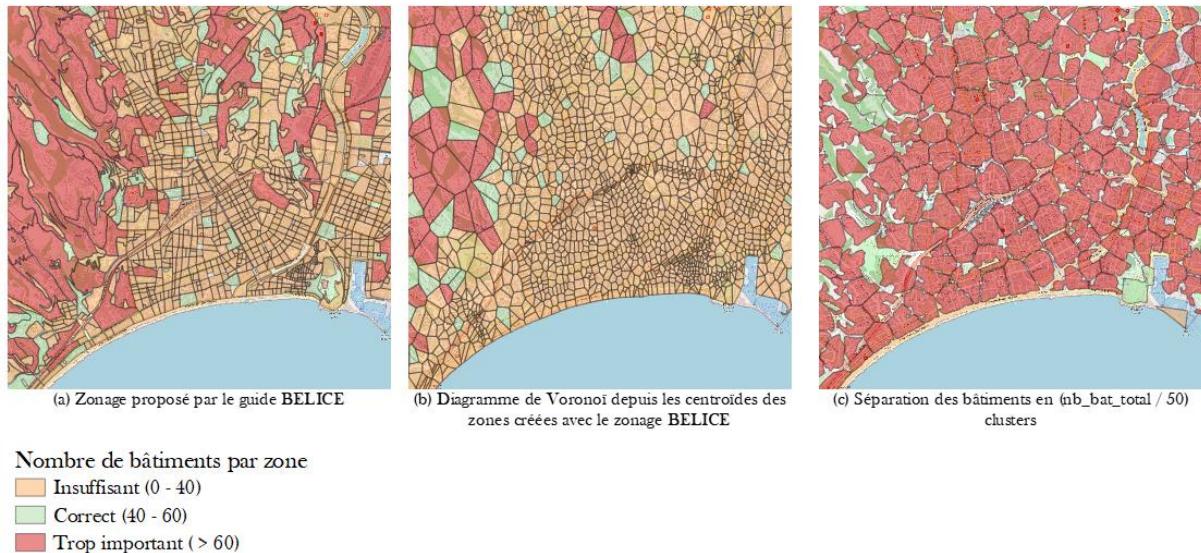
Concernant l'évaluation de la priorité d'une zone, je laisse cet aspect du plugin de côté, car le BRGM possède des outils qui permettent d'estimer les dommages de façon plus précise en France métropolitaine, dont j'aborderai le fonctionnement dans la partie suivante. Malgré cela, la priorisation des zones peut pallier au manque d'homogénéité dans le nombre de bâtiments en privilégiant les grandes zones plus peuplées. D'autre part, cette priorisation sous forme de codes-couleurs est intéressante, et je pourrai m'en inspirer pour réaliser la cartographie finale.

## 2.2. Méthode proposée

Afin de mieux définir comment la sectorisation sera utilisée, j'ai présenté aux sapeurs-pompiers des Alpes Maritimes la méthode proposée par le projet BELICE. Ce partenariat avec eux a pour but de pouvoir adapter les méthodes d'intervention françaises aux recommandations de BELICE. Pour ce faire, ils ont présenté leur sectorisation préétablie en cas de rupture de flux (i.e. rupture des canaux de communications). Cette sectorisation est pyramidale : le département est divisé en trois sites, divisés en trois secteurs, chacun présentant trois sous-secteurs. Ma sectorisation complètera celle des sapeurs-pompiers, car elle présente des zones plus petites et donc aborde un nouvel aspect de l'intervention. Pour ne pas causer de confusion, il a aussi été décidé de renommer la sectorisation BELICE en « zonage », et les secteurs que je proposerai seront appelés « zones ». Mon travail à présent doit consister à créer de manière automatique un zonage qui présente des zones contenant une cinquantaine de bâtiments.

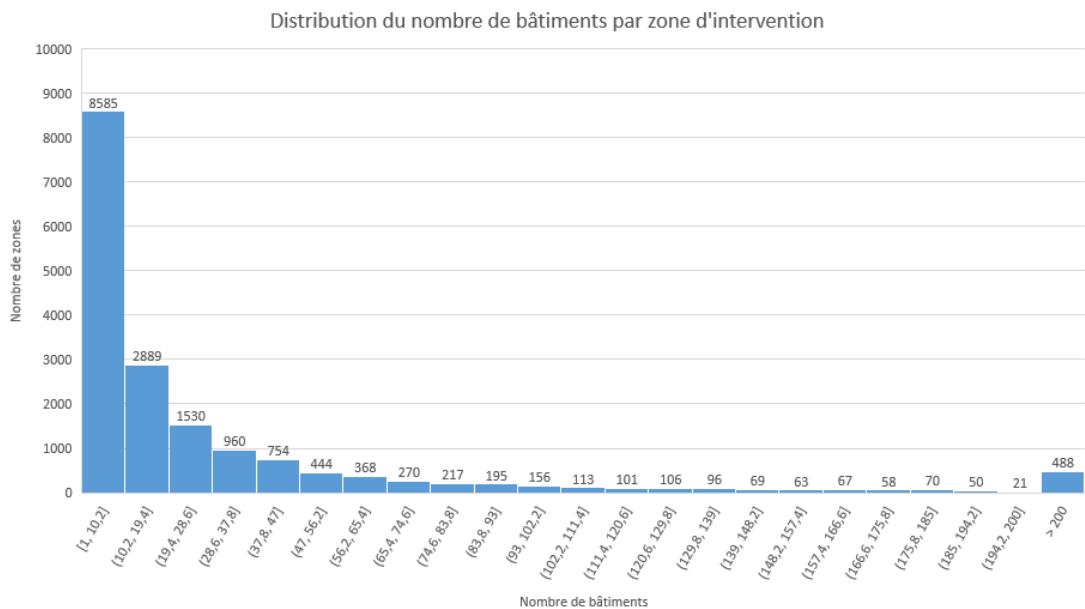
Comme le zonage à partir des routes engendre des zones non-homogènes, j'ai réfléchi à un moyen de regrouper les bâtiments par une autre méthode. J'ai ainsi essayé de créer des clusters de bâtiments grâce à un algorithme de K-means (cf. Figure 2.4 (c)) pour avoir des zones présentant un nombre de bâtiments équivalent, ou de créer un diagramme de Voronoï à partir de la sectorisation type BELICE (cf. Figure 2.4 (b)) pour n'avoir que des zones adjacentes. Ces méthodes permettent d'avoir un rendu plus homogène, mais elles ont le désavantage d'enlever le caractère topologique des zones. Si je soumettais ce type de zonage à des équipes de sauvetage qui ne connaissent pas le terrain, ces derniers auraient du mal à se repérer, et la communication serait difficile entre les postes de commandement et les zones de recherche, car ils n'auraient pas d'attributs topologiques de repérage.

Résultats des autres méthodes de zonage en fonction du nombre de bâtiments par zone, avec l'objectif de placer 50 bâtiments par zone - Zoom sur le centre ville de Nice



*Figure 2.4 - Sectorisations expérimentales*

De ce fait, j'ai décidé de reprendre le zonage proposé dans le guide BELICE et de conserver les routes, cours d'eau et ligne de chemins de fer comme points de départ du zonage. Afin de présenter cette méthode aux sapeurs-pompiers, j'ai créé le zonage brut, en transformant les linéaires des réseaux en polygones, puis en comptant le nombre de bâtiments dans chaque zone. J'ai ensuite créé la Figure 2.5 qui montre la répartition du nombre de bâtiments par zone pour tout le département des Alpes-Maritimes. Cette répartition est très similaire à celle obtenue pour le séisme croate de Petrinja, montrant que la densité du bâti et des réseaux n'est pas liée à la qualité du zonage.



*Figure 2.5 - Répartition du nombre de bâtiments par zone pour les zones créées depuis les réseaux routiers, ferrés et hydrographique.*

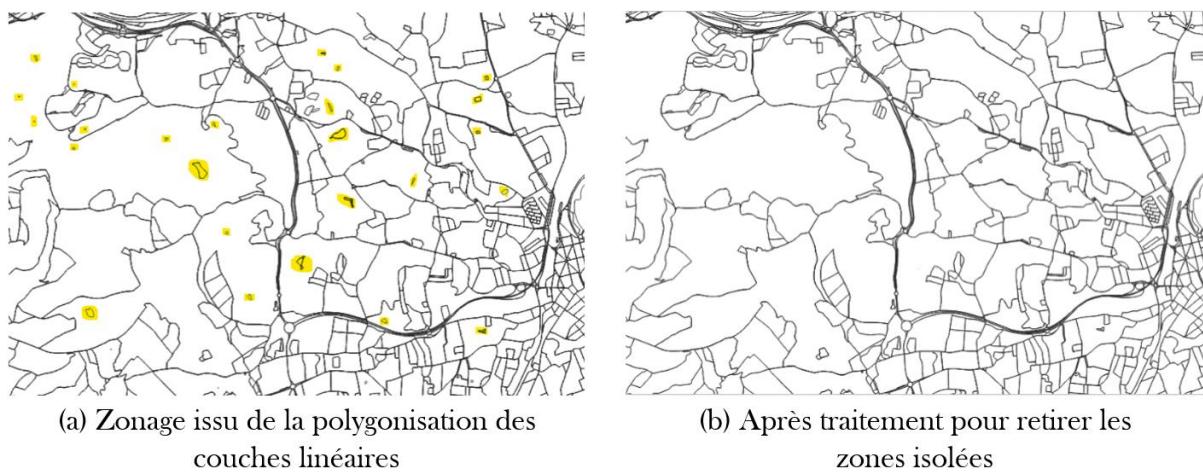
Comme pour les autres méthodes de zonage, j'ai constaté que la grande majorité des zones sont trop petites, ainsi le traitement pour obtenir des zones d'une cinquantaine de bâtiments devra consister à réunir les zones voisines si elles contiennent ensemble moins de cinquante bâtiments, puis d'itérer ce traitement jusqu'à ce que les zones voisines aient trop de bâtiments pour être unies. Le zonage résultant permettra d'avoir des zones dont le nombre de bâtiments se situe au plus près des cinquante recommandés.

### 2.3. Implémentation

Pour créer le zonage, j'ai à ma disposition des logiciels libres, dont QGIS et PostGIS qui me permettront d'avoir accès à un grand catalogue de géotraitements. J'ai utilisé le logiciel QGIS en priorité, car il est simple d'utilisation et assez complet.

Pour commencer, si l'utilisateur ne possède pas les données utiles au traitement, j'ai mis en place un modèle de traitements sur QGIS qui permet de télécharger les données OpenStreetMap d'une emprise entrée en paramètres. Ces données correspondent d'une part à la géométrie des réseaux (routier, ferré, hydrographique) et doivent permettre de tracer les contours des zones, et d'autre part à l'emprise des bâtiments, pour rééquilibrer les zones en fonction de la densité du bâti. Pour le moment, et contrairement à l'objectif du plugin proposé par le projet BELICE, il est prévu de réaliser cette sectorisation pour le territoire français, car les données d'estimation des dommages du BRGM ne sont disponibles qu'en France. Pour cela, j'ai fait le choix d'utiliser la BD Topo de l'IGN pour avoir la localisation de la quasi-totalité des bâtiments résidentiels en France. Il a en effet été convenu de ne traiter que les bâtiments résidentiels, car le calcul des dommages par l'outil du BRGM (détailé plus tard) s'applique sur la population résidente, et tient uniquement compte des bâtiments à usage de logements. Toutefois, le traitement restera applicable sur d'autres sources de données (comme OpenStreetMap) car je n'utilise que la localisation des bâtiments. L'estimation sera cependant moins précise car la densité du bâti ne correspondra pas forcément aux données d'enjeu considérées par le BRGM.

Ensuite, j'ai mis en place un second modèle de traitements réalisant le zonage primaire, grâce aux couches des réseaux routier, hydrographique et ferré, et des bâtiments. Pour cela, les couches des réseaux sont unies, et les linéaires sont transformés en zones grâce à l'outil « Mise en polygones » de QGIS. Ce traitement laisse quelques défauts, en créant des zones enfermées dans une plus grande. Comme les traitements de QGIS ne permettaient pas de corriger cela, j'ai ajouté un traitement PostGIS qui permet d'unir à leur voisine les zones qui ont une seule zone voisine et dont la longueur de l'intersection avec cette zone est égale à leur périmètre, afin d'obtenir des zones qui ont toutes des zones adjacentes et qu'aucune ne se trouve inaccessible car encerclée par une autre. Ce passage par PostGIS est automatisé dans le modèle de traitements QGIS grâce à une requête « SELECT » au sein du traitement « Exécuter et charger SQL » de QGIS, et le résultat de cette union est illustré en Figure 2.6. L'union obtenue par la requête est ensuite unie avec les autres zones qui n'ont pas été corrigées. Est également renseigné pour chaque zone le nombre de bâtiments qu'elle contient.



*Figure 2.6 - Correction du zonage en retirant les zones isolées*

A la suite de cette étape préparatoire sur QGIS, il m'a fallu trouver un moyen d'unir les zones adjacentes dont l'union contient moins de cinquante bâtiments. J'ai utilisé des fonctions PostGIS, qui offrent la possibilité de réaliser les géotraitements qui m'intéressent. J'ai donc créé une base de données PostgreSQL, dans laquelle j'ai exporté la couche des zones obtenues grâce au modèle de traitement QGIS. Puisque j'utilise des fonctions PostGIS, j'ai également créé un script Python qui fait appel à la librairie *Psycopg2*, et qui, exécuté depuis la fenêtre QGIS, se connecte à la base de données et déclenche l'exécution des fonctions de traitement, dont voici la description.

Tout d'abord, une première fonction *init\_table\_voisins(table\_a\_corriger)* prend la table des zones non-corrigées en entrée, et retourne une table VOISINS dont chaque ligne contient les identifiants, les géométries et le nombre de bâtiments de deux zones adjacentes. Par construction, une géométrie peut se trouver autant de fois dans la table qu'elle a de zones voisines. La seconde fonction *regroupement\_voisins()* permet d'éviter les doublons, elle parcourt la table et trie chaque ligne comme expliqué sur la Figure 2.7. En plus de cela, une liste mise à jour à chaque itération contient les identifiants des zones qui ont déjà été triées, afin d'ignorer la zone si elle a déjà été triée.

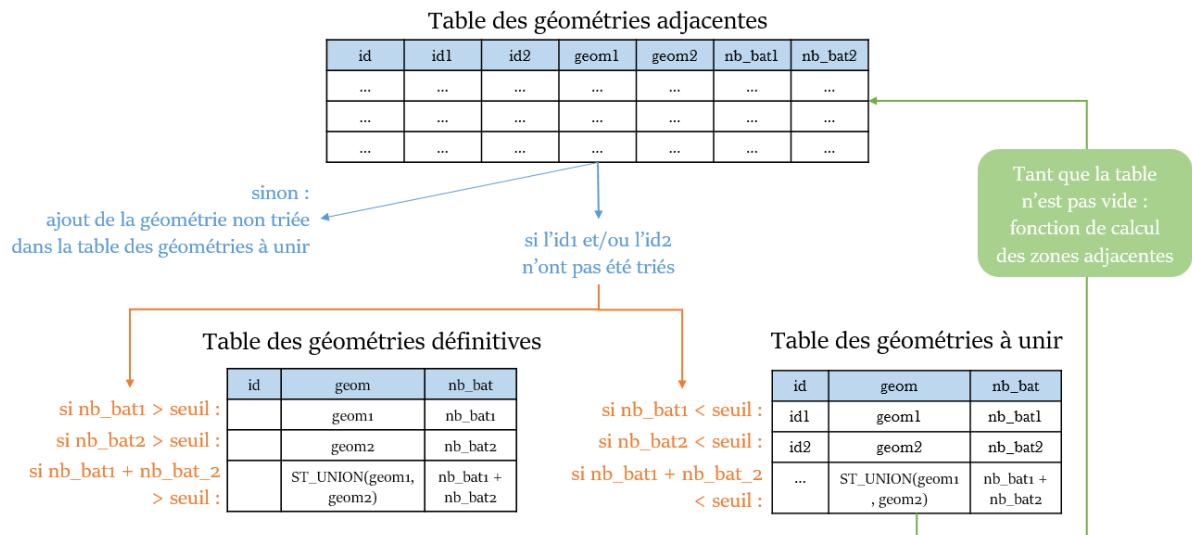


Figure 2.7 - Fonctionnement de la fonction *regroupement\_voisins()* de tri des zones adjacentes

Après l'exécution de cette fonction, nous obtenons deux tables : la table ZONES\_CORRIGEES, et la table ZONES\_A\_UNIR qui contient des zones qui ont moins de cinquante bâtiments qu'il faut encore traiter. Pour cela, j'ai créé une dernière fonction *iteration\_jointures()* qui trie cette table, en déplaçant dans la table des zones corrigées les géométries qui n'ont pas de zone adjacente assez petite pour s'y unir.

On obtient une table qui recense toutes les zones qui ont moins de cinquante bâtiments et au moins une voisine avec laquelle s'unir. Il suffit donc de placer cette table en entrée du processus précédemment décrit, pour unir les zones voisines. La table des zones à unir est ensuite vidée, et remplie lors de l'exécution de la fonction de tri précédente. La fonction *iteration\_jointures()* réitère le tri jusqu'à ce que la table des zones à unir soit vide.

Après ces géotraitements, j'ai remarqué que des petites zones de moins de cinq bâtiments étaient toujours présentes, car elles se situent à côté de zones qui dépasseraient le seuil de cinquante bâtiments fixé si elles s'unissaient. J'ai donc eu l'idée de changer le critère de cinquante bâtiments dans les fonctions pour voir s'il améliorait la sectorisation. J'ai réalisé la sectorisation pour trois petites zones urbaine, périphérique et rurale des Alpes-Maritimes, afin de ne pas avoir des temps de calculs trop longs en considérant la totalité du département. En faisant varier les seuils par rapport à trois objectifs de sectorisation, j'obtiens les résultats du Tableau 2.1 ci-dessous. J'en ai conclu qu'il est préférable que la valeur de seuil soit égale au nombre de bâtiments souhaité par zone.

## 2. Automatisation du zonage USAR

---

Objectif	Seuil	Zones qui ont le bon nombre de bâtiments (seuil $\pm 10$ )		Nombre de zones
50	50	305	36%	854
	60	205	27%	758
70	70	200	28%	717
	80	140	21%	652
100	100	197	34%	577
	110	146	27%	547

Tableau 2.1 - Impact du seuil entré en paramètre sur la qualité du zonage, en fonction d'un objectif fixe

Afin d'optimiser la répartition des bâtiments dans les zones, j'ai testé plusieurs manières de parcourir la table des zones adjacentes pour prioriser l'union des zones en fonction de différents paramètres : peu de bâtiments dans la zone, beaucoup de bâtiments dans la zone, ou encore la longueur de la frontière entre les zones. Pour évaluer le meilleur paramètre, j'ai exécuté le traitement avec plusieurs valeurs de seuil (50, 70 et 100 bâtiments), et j'ai regardé pour chaque paramètre le pourcentage moyen de zones qui ont un nombre de bâtiments correct (i.e. seuil  $\pm 10$ ). De cette manière, j'ai constaté que – indépendamment de la valeur de seuil considérée – les zones étaient mieux réparties lorsque l'on parcourt la table des zones adjacentes en unissant en priorité les zones qui ont peu de bâtiments : le Tableau 2.2 récapitule les résultats.

Objectif	Nombre de zones correctes avec une priorisation des zones à unir selon ...					
	le nombre de bâtiments dans la zone décroissant		le nombre de bâtiments dans la zone croissant		la longueur de la frontière commune entre les zones croissante	
50	317	39 %	319	39%	191	24%
70	198	30 %	210	33%	120	18%
100	187	36 %	195	38%	110	21%

Tableau 2.2 - Nombre de zones qui ont le bon nombre de bâtiments en fonction du critère utilisé pour prioriser l'union des zones avec leur voisine

Pour résumer le processus d'établissement de ce zonage, la Figure 2.8 illustre les différentes étapes du traitement. Les résultats de ce traitement sont développés dans la partie suivante.

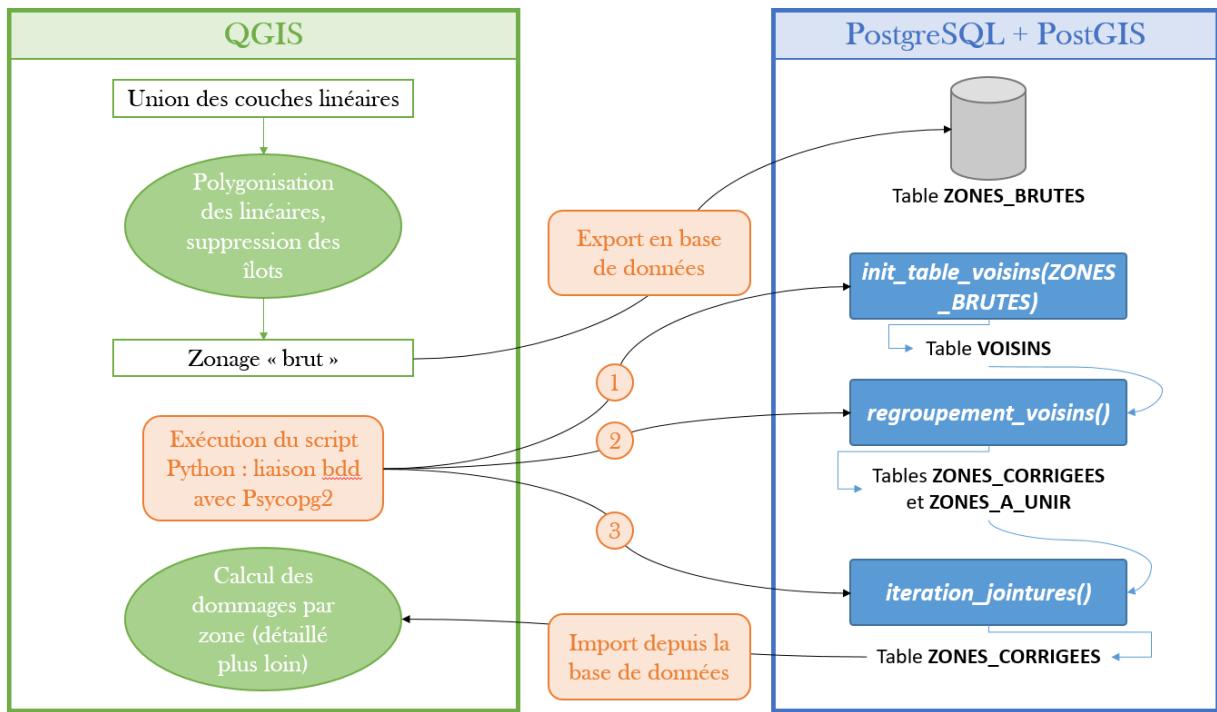


Figure 2.8 - Schéma du traitement de création du zonage

## 2.4. Résultats

A l'issue du chainage des modèles de traitement QGIS et de l'exécution des fonctions PostGIS, nous obtenons la carte de la Figure 2.9 ci-dessous, qui montre la répartition des zones de déploiement des équipes USAR lors de l'ASR2. J'ai choisi de représenter les zones avec un code couleur qui indique quelles sont les zones trop grandes (en rouge), trop petites (en blanc) et bien dimensionnées (en vert). Cette représentation a été montrée aux sapeurs-pompiers à la fin du travail d'automatisation du zonage, afin seulement d'évaluer ce dernier, mais n'a pas pour finalité d'être transmise lors de la crise.

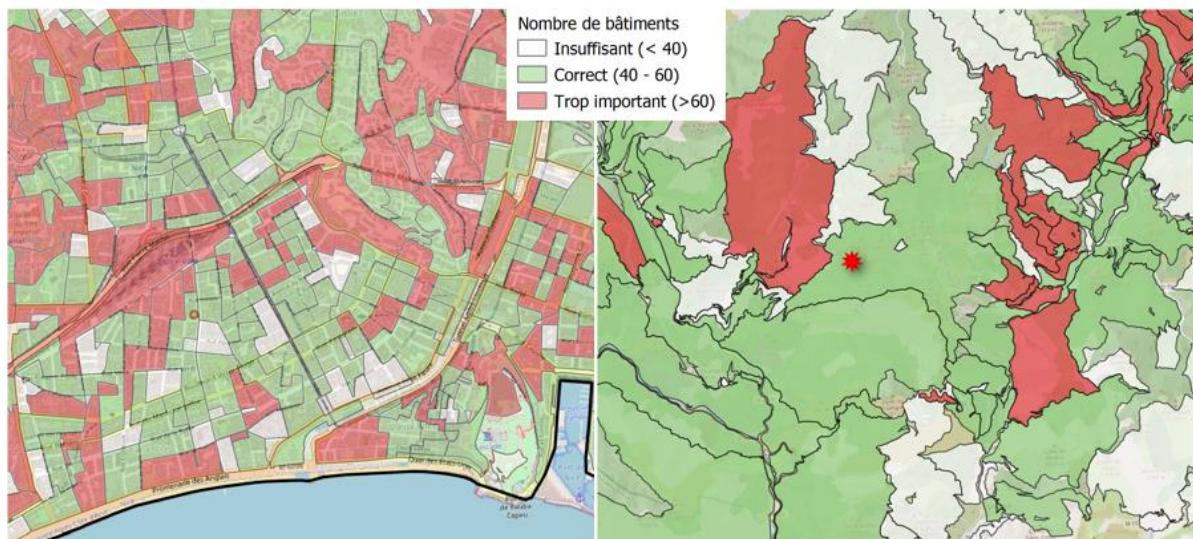


Figure 2.9 - Zonage final, coloré en fonction du respect ou non du critère de 50 bâtiments par zone

Pour compléter, la Figure 2.10 ci-dessous montre l'histogramme de répartition du nombre de bâtiments par zone, superposé à celui réalisé avant l'union des zones trop petites. Nous pouvons voir que le zonage tient bien compte du seuil de cinquante bâtiments fixé, et que l'union des zones diminue le nombre total de zones.

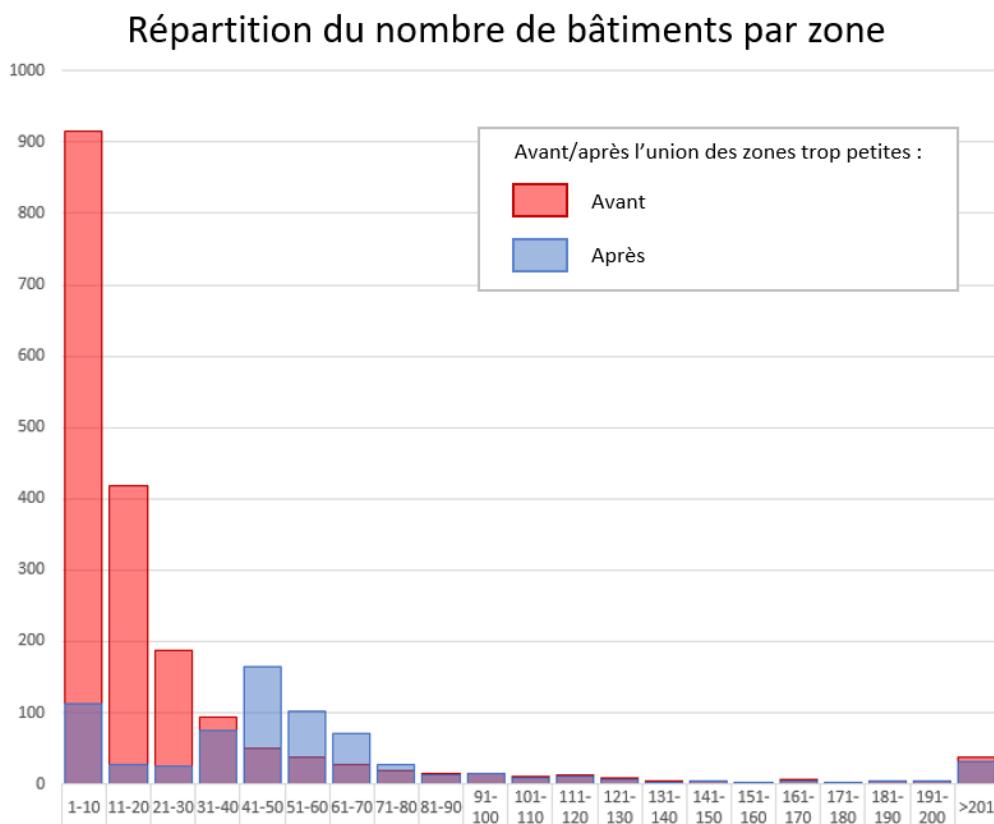


Figure 2.10 - Comparaison du nombre de bâtiments par zone avant / après l'exécution du script PostGIS

J'ai présenté ce zonage aux sapeurs-pompiers début juillet 2022, et leurs retours ont pu écarter mes interrogations quant à l'utilité de traitements supplémentaires que j'avais envisagés dans le but d'améliorer la sectorisation.

J'avais en effet réalisé un traitement permettant de diviser les zones qui comptent largement plus de cinquante bâtiments en polygones plus petits. Pour cela, le traitement PostGIS renvoyait initialement une table qui contenait les zones à diviser, dont le nombre de bâtiments par zone est connu. Cette table était importée dans une chaîne de traitement QGIS qui divisait les zones de sorte à avoir cinquante bâtiments par zone, grâce à la création de  $\frac{\text{nb\_bâtiments\_total}}{50}$  clusters. Ce traitement a été abandonné après avoir été proposé aux pompiers, car il perdait le sens topologique du zonage.

D'autre part, j'ai réfléchi à plusieurs traitements qui permettraient d'obtenir des zones qui tiennent mieux compte des caractéristiques des bâtiments, car je supposais qu'un immeuble ne nécessitait pas le même temps d'inspection qu'une maison individuelle. J'ai donc créé des zones où le critère de cinquante bâtiments est remplacé par la surface des bâtiments, en créant des zones où la surface totale des bâtiments équivaut à 50 fois la surface moyenne d'un logement, pour obtenir des zones homogènes en terme de logements, et non de bâtiments.

Cette proposition a également été écartée par les sapeurs-pompiers, qui nous ont expliqué que le temps d'inspection était indépendant de la nature et de la taille du bâtiment (en considérant ici uniquement les bâtiments résidentiels, et les activités ayant lieu dans ces bâtiments – comme les commerces en rez-de-chaussée, ce doit être différent pour les grands bâtiments d'usines ou de centres commerciaux par exemple).

Par ailleurs, le critère de cinquante bâtiments par zone leur paraît trop faible, et ils souhaitent le remplacer par soixante-dix. C'est aisément modifiable dans mon code, et j'ai ajouté ce nombre en paramètre d'entrée de la fonction PostGIS *regroupement\_voisins* pour que le script soit indépendant du nombre de bâtiments souhaité par zone.

J'en ai profité pour regarder l'impact de ce changement sur le zonage en créant un zonage de cinquante bâtiments, un de soixante-dix, et un de cent. Les résultats sont visibles dans le Tableau 2.3 ci-dessous, en exécutant les traitements en faisant uniquement varier le seuil. Je me suis rendu compte que le nombre de bâtiments souhaité par zone influe sur la qualité du zonage, laquelle dépend du territoire et de la répartition des bâtiments et des axes de transport. Comme chaque territoire est unique, les résultats du tableau seront différents si le traitement est appliqué ailleurs. Il est dès lors difficile d'appliquer ce résultat pour conseiller un dimensionnement optimal des zones. Il est tout de même intéressant de savoir que les paramètres du zonage influent sur sa qualité.

Taille de la zone en fonction du nombre souhaité de bâtiments par zone	50		70		100	
<i>Trop petite</i>	196	27%	329	45%	120	27%
<i>Correcte</i>	289	40%	205	29%	199	45%
<i>Trop grande</i>	234	33%	191	26%	121	28%
Total	719		725		440	

Tableau 2.3 - Comparaison des performances du zonage automatique en fonction de la taille des zones.

Pour finir, j'ai proposé de baser le zonage non pas sur le nombre de bâtiments, mais sur celui du nombre de bâtiments fortement endommagés nécessitant des reconnaissances USAR (niveaux d'endommagement D4 et D5 selon l'EMS-98), afin que la répartition des équipes prenne compte des dommages et non de la densité de bâti. Cette proposition a été retenue, et implique donc que le calcul des dommages soit effectué après l'établissement du zonage brut, et avant l'union des zones adjacentes (cf. chapitre 3). A noter que ce choix exclue la possibilité de définir un zonage d'intervention en temps de paix, mais au contraire de définir des zonages spécifiques tenant compte des caractéristiques de chaque séisme. Aussi, pour pallier aux défauts du zonage, il a été suggéré de moduler le nombre d'équipes à envoyer dans une zone en fonction du nombre de bâtiments à inspecter qu'elle contient, cela sera détaillé plus tard dans le paragraphe 3.2.a.

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

Après avoir créé le zonage, le nombre de bâtiments par zone n'est pas suffisant pour dimensionner le besoin en équipes de recherche et de sauvetage. La cartographie établie pour le moment prend en compte le terrain, mais elle a besoin d'être complétée par la connaissance des conséquences du séisme venant de se produire. L'ajout de cette étape de calcul des dommages au zonage est plus intéressant pour les sapeurs-pompiers, car ils peuvent voir en pratique à quoi pourrait leur servir mon travail. Je décris dans cette partie les méthodes de calcul des dommages du BRGM, puis comment les échanges avec les praticiens USAR ont orienté mon travail tout au long de la seconde partie de mon stage pour aboutir à une cartographie priorisée du zonage.

#### 3.1. Génération d'une carte des dommages avec Vigirisks et QGIS

##### 3.1.a. Présentation de Vigirisks

Vigirisks est une plateforme développée par le BRGM, qui propose plusieurs workflows ayant pour objectif de faire des simulations de scénarios de risques et des modélisations de dommages causés par des séismes, submersions marines ou mouvements de terrain. C'est d'ailleurs sur cette plateforme que repose SEISAid : elle réalise le calcul des dommages et passe ensuite par un traitement Python pour réaliser la mise en page PDF.

Pour ma part, j'ai utilisé Vigirisks pour obtenir une estimation des dommages causés par des séismes de scénario à l'échelle la plus fine possible. Cette estimation des dommages sera ensuite appliquée à mon zonage grâce à des géotraitements sur QGIS, décrits dans la partie suivante.

Le workflow qui permet d'évaluer les dommages causés par un séisme s'appelle « Armagedom - Seismic Risk Assessment », il reprend les méthodes de calcul d'Armagedom, un ancien logiciel du BRGM dédié au calcul des dommages (Sedan, et al. 2013). C'est d'ailleurs ce logiciel qui permet d'obtenir une ShakeMap raster, en fonction des caractéristiques du séisme (magnitude, profondeur, coordonnées épcentrales) et qui sera utilisée par le workflow « Armagedom - Seismic Risk Assessment » de Vigirisk.

Le workflow prend également en entrée un fichier CSV qui décrit la répartition de la typologie des bâtiments de chaque IRIS (fournit par mes encadrants) : un aperçu de son contenu est représenté en Figure 3.1 ci-dessous. Les bâtiments sont répartis selon plusieurs typologies qui caractérisent leur vulnérabilité.

Cette typologie contient quatorze classes, allant de la maison individuelle récente au grand logement collectif ancien, réparties sur quatorze colonnes qui indiquent pour chaque géométrie la répartition des bâtiments selon cette typologie. La donnée spatiale de ce fichier CSV prend la forme de deux colonnes *x\_centeroid* et *y\_centeroid*, qui sont les centroïdes des IRIS de la zone à étudier.

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

Le workflow croisera cette description des enjeux exposés au séisme avec un second fichier CSV qui fait le lien entre l'intensité à laquelle est confronté un bâtiment et sa typologie, pour obtenir une répartition des dommages qui tient compte de la vulnérabilité du bâti.

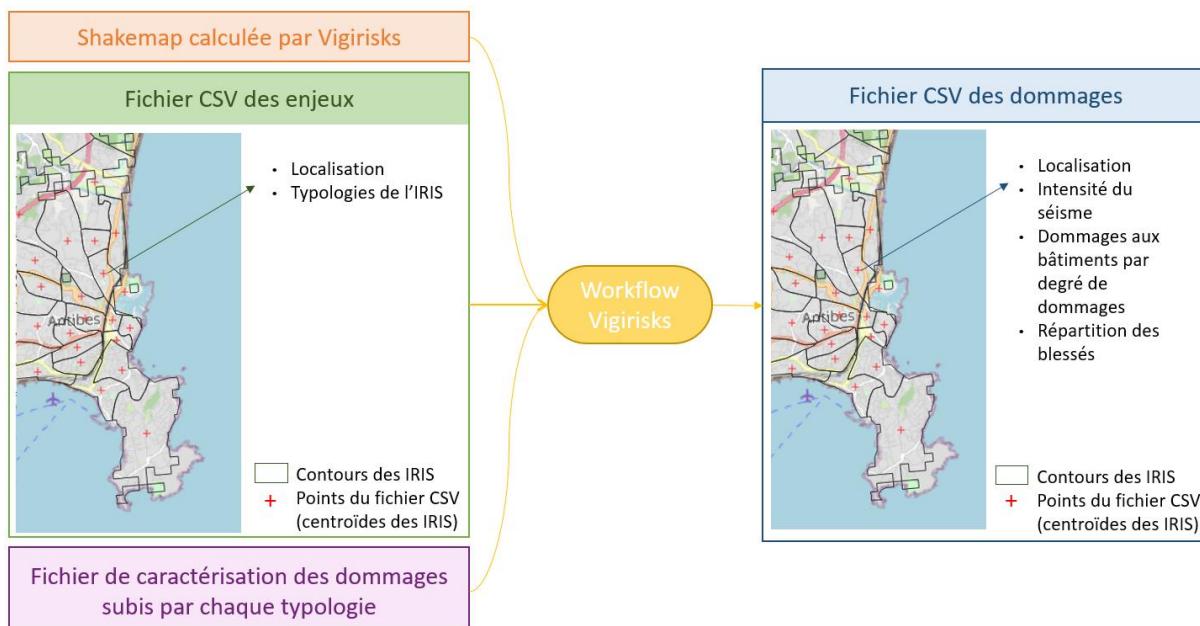


Figure 3.1 – Schéma des données nécessaires au fonctionnement du workflow Armagedom sur Vigirisks, et des données qu'il génère

Une fois le workflow paramétré et exécuté, il renvoie des fichiers CSV contenant l'estimation des dommages à plusieurs échelles :

- A l'échelle détaillée qui reprend les géométries en entrée du workflow (les points du fichier CSV à l'échelle des IRIS ou infra-IRIS)
- A l'échelle des communes
- A l'échelle du/des départements
- A l'échelle du pays.

J'ai utilisé le fichier des résultats détaillés, dont le contenu est illustré sur la Figure 3.1. Les dommages estimés aux bâtiments sont répartis dans des colonnes D0 à D5 qui décrivent les niveaux de dommages selon la terminologie EMS-98, aidant les investigateurs à savoir quelle procédure adopter vis-à-vis d'un bâtiment (cf. Figure 1.1). Les bâtiments classés D0 sont intacts, ceux classés D1 à D2 n'ont pas besoin de travaux immédiats mais ont subis des dommages non-structurels. Les bâtiments D3 ont subis des dommages structurels et ont besoin d'une inspection détaillée pour savoir s'ils sont encore habitables. Les bâtiments D4 sont partiellement effondrés et ne peuvent plus être habités, tout comme les bâtiments D5 qui sont complètement effondrés.

Le bilan humain estimé est exprimé en terme de niveau de priorité dans des colonnes P0 à P4 : blessés légers (P1 et P2 respectivement sans et avec hospitalisation), blessés graves (P3) et

personnes décédées (P4). La colonne SA complète le bilan en indiquant le nombre de personnes se retrouvant sans-abris, leur domicile ayant été détruit.

Cette classification des dommages a été présentée aux sapeurs-pompiers, qui nous ont expliqué quels indicateurs leur étaient utiles. D'une part, concernant les dommages aux bâtiments, ils souhaitent connaître le nombre de bâtiments effondrés, soit la somme des bâtiments avec des dommages de type D4 et D5. Ce nombre permettra d'estimer directement le nombre d'équipes USAR à envoyer. D'autre part, les secours à la personne les plus urgents concernent les blessés à hospitaliser, nous avons donc retenu les colonnes P2 et P3 pour les aider à dimensionner les besoins capacitaires en PMA (Postes Médicaux Avancés) et en ambulances.

Après avoir pris en main Vigirisks, il a fallu trouver un scénario qui permette de mettre en avant les avantages de mon zonage. Je décris dans la partie suivante le processus de sélection de ce scénario et l'adaptation des fichiers résultats Vigirisks au zonage.

#### **3.1.b. Choix du scénario et estimation des dommages**

Il existe deux approches pour établir un scénario de risque (Molina-Palacios 2007): une approche probabiliste qui observe les événements passés, et dont l'étude statistique donne une indication sur le lieu et la probabilité d'occurrence d'un séisme, et une approche déterministe qui s'appuie sur une donnée d'entrée (généralement un événement s'étant déjà produit) pour en observer les conséquences générales. C'est cette dernière approche qui a été choisie, car il a été décidé de baser nos estimations sur des scénarios de séismes de scénario (inspirés d'événements historiques), et d'en observer les conséquences vis-à-vis des retours d'expériences décrits dans les archives.

Pour trouver un scénario historique à reproduire et puisque nous avons un partenariat avec le SDIS-06, il était intéressant pour eux de voir les conséquences d'un séisme impactant la métropole de Nice. Ainsi, j'ai regardé dans le catalogue FCAT17 des séismes historiques (Manchuel, et al. 2018) les séismes ayant eu lieu près de Nice et dont l'intensité est assez forte pour causer des dommages considérables. Dans la région niçoise, la faille Ligure se situe au large entre Nice et la côte italienne, et a déjà causé un raz de marée lors du séisme de 1887. Ont également causé des dommages les séismes de 1644 dont l'épicentre a été situé à trente kilomètres au nord de Nice et de 1564 dans la vallée de la Vésubie.

J'ai ainsi sélectionné plusieurs scénarios listés dans le Tableau 3.1, dont on a tiré les cartes d'intensité, et réalisé une estimation des dommages pour voir quel aurait été le plus destructeur avec les données d'enjeux actuels. Après ce travail, j'en conclus que le séisme le plus destructeur est celui des Alpes Niçoises près de Roquebillière du 15 février 1644, avec plus de 240 bâtiments effondrés, contre 150 pour le séisme de 1618, qui avait causé peu de dégâts à l'époque.

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

---

Année	Localisation	Magnitude Mw	Intensité maximale	Profondeur (km)	Estimation du nombre de bâtiments effondrés avec Vigirisks (sur la base du bâti actuel)
1494	Roquebillière	5.4	8	6.5	48
1564	La Bollene-Vésubie	5.5	8	7	58
1618	Coaraze	5.7	8	8.3	150
1644	Roquebillière	6.1	8	11.6	247
1887	Mer Ligure	6.7	9	12.4	20

*Tableau 3.1 – Séismes historiques ayant impacté les Alpes-Maritimes*

Malgré cette constatation, les sapeurs-pompiers ont préféré que je travaille sur un scénario de type « Ligure », qui reproduit le séisme du 23 février 1887 s'étant produit au large de Nice, car ils préfèrent voir les effets d'un séisme sur la métropole (ce qui n'était pas le cas avec le séisme de 1644).

J'ai donc générée les estimations de dommages via Vigirisks pour ce séisme, et me suis penchée dessus pour trouver comment les échantillonner à l'échelle du zonage de répartition des équipes de recherche USAR. Une première solution était de calculer les dommages moyens par unité de surface pour chaque classe de dommages et chaque IRIS, et de multiplier cette moyenne par la surface des zones pour l'USAR. La seconde solution est similaire, mais au lieu de calculer les dommages moyens par unité de surface, ils sont calculés pour chaque bâtiment, et à chaque zone est attribuée la somme des dommages moyens des bâtiments qui la composent, grâce aux données de la BD Topo qui donne l'emplacement des bâtiments.

J'ai implémenté ces deux calculs dans des chaines de traitements sur QGIS, afin de déterminer celle qui distribue le plus fidèlement les estimations. Pour vérifier que ce traitement est fidèle, j'ai regardé le nombre de bâtiments classés D4 et D5 dans chaque zone USAR, et j'ai comparé leur somme par IRIS à l'estimation issue de Vigirisks. C'est ainsi que j'ai vu que la redistribution des dommages par unité de surface appartenant à la zone n'est pas fidèle, car même si les zones ont à peu près le même nombre de bâtiments, elles n'ont pas toujours la même superficie, et cela cause un biais car les surfaces plus grandes ont plus de dommages estimés que celles plus petites dont le bâti est plus dense.

Ainsi, la solution retenue pour échantillonner les dommages calculés par IRIS à l'échelle des zones pour l'USAR est la seconde option, elle est illustrée sur la Figure 3.2 ci-dessous.

**1** Calcul des dommages moyen par bâtiment dans chaque IRIS

$$D_{IRIS} = 7 \\ NB_{BAT}_{IRIS} = 14 \\ D_{MOY}_{IRIS} = 7/14 = 0,5$$

$$D_{IRIS} = 2 \\ NB_{BAT}_{IRIS} = 3 \\ D_{MOY}_{IRIS} = 2/3$$

**2** Application de la formule suivante

$$D_{ZONE} = \sum D_{MOY}_{IRIS_n} \times NB_{BAT}_{ZONE \cap IRIS_n}$$

$D_{ZONE} = 0,5 \times 2 = 1$   
1 bâtiment effondré dans la zone

$D_{ZONE} = 0,5 \times 1 + 0,67 \times 3 = 2,5$   
3 bâtiments effondrés dans la zone

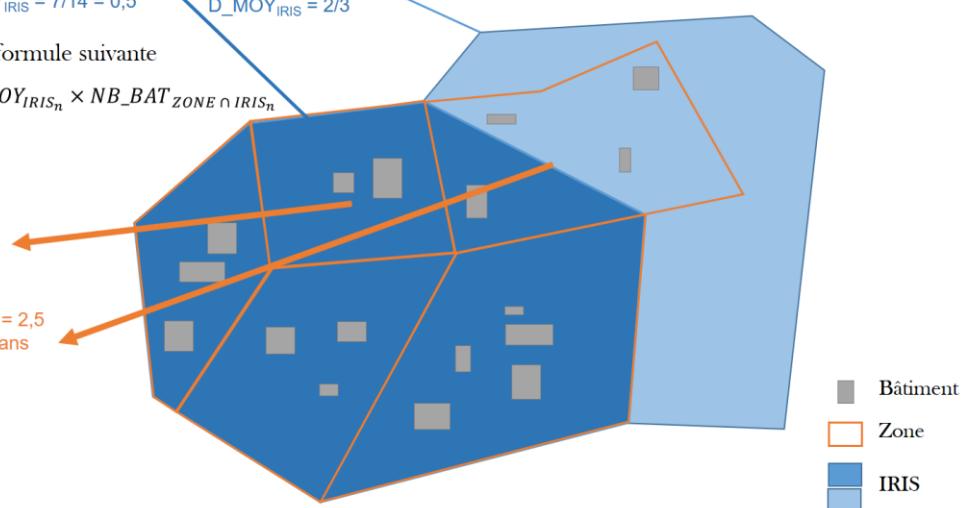


Figure 3.2 – Schéma du calcul des dommages par zone depuis l'estimation des dommages par IRIS

( $D_{IRIS}$  est le nombre de bâtiments endommagés dans l'IRIS,  $NB_{BAT}_{IRIS}$  est le nombre total de bâtiments dans l'IRIS,  $D_{MOY}_{IRIS}$  est le dommages moyen par bâtiment dans l'IRIS).

Suite au calcul Vigirisks et au rééchantillonnage des dommages par zone, on obtient la carte de la Figure 3.3 ci-dessous représentant les dommages moyens par zone de recherche USAR pour un séisme tel que celui s'étant produit en 1887 en mer Ligure.

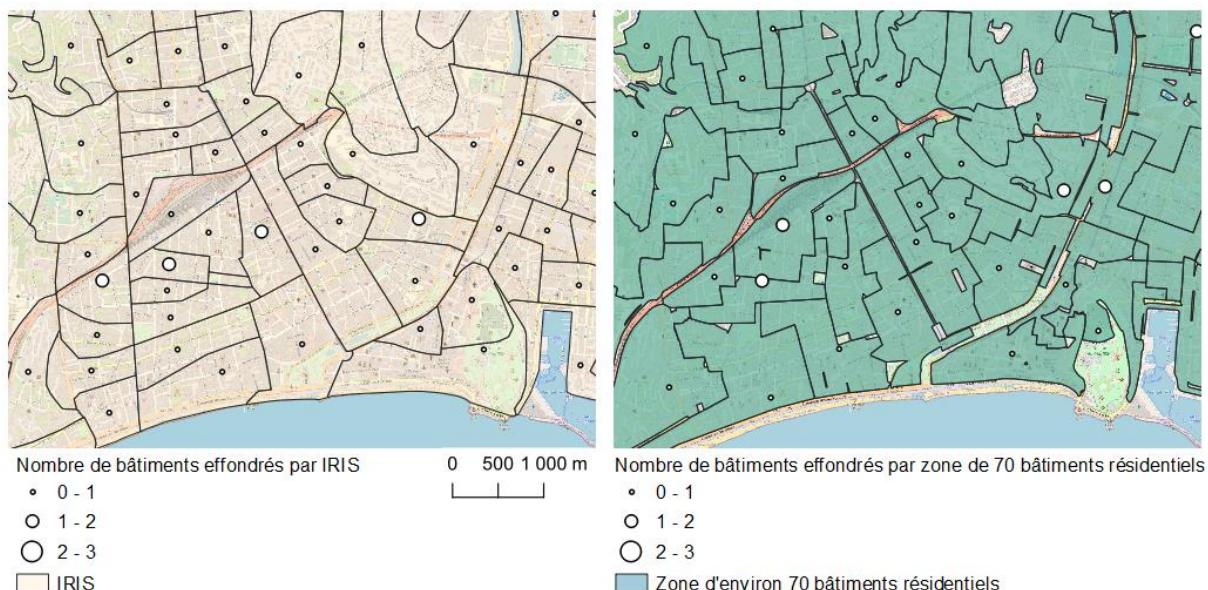


Figure 3.3 – Nombre de bâtiments partiellement ou totalement effondrés par IRIS et par zones de recherche USAR de 70 bâtiments résidentiels pour un scénario de type « mer Ligure »

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

Comme nous pouvons le voir sur la carte, et compte-tenu des caractéristiques propres au séismes de scénario retenu, les zones ne comportent presque pas de bâtiments effondrés, et l'envoi d'une équipe par zone ne paraît pas raisonnable, chacune étant en capacité d'inspecter jusqu'à cinq bâtiments par heure. J'ai donc utilisé le même processus de « distribution » des dommages par IRIS pour calculer les dommages par sous-secteurs établis par le SDIS des Alpes-Maritimes. On obtient alors la carte de la Figure 3.4 ci-dessous qui montre que le nombre de bâtiments effondrés dans les sous-secteurs est assez faible et ne justifie pas de considérer un découpage à plus fine échelle. La solution intermédiaire d'union des zones pour atteindre environ soixante-dix bâtiments effondrés par zone, n'a pas été choisie, car il y a 320 bâtiments estimés effondrés dans le département, ce qui reviendrait à diviser le département en quatre grandes zones de 70 bâtiments effondrés. Cela mènerait à un découpage long à établir et moins performant que celui déjà connu par les sapeurs-pompiers. C'est un calcul à garder en tête pour l'appliquer à un autre scénario.

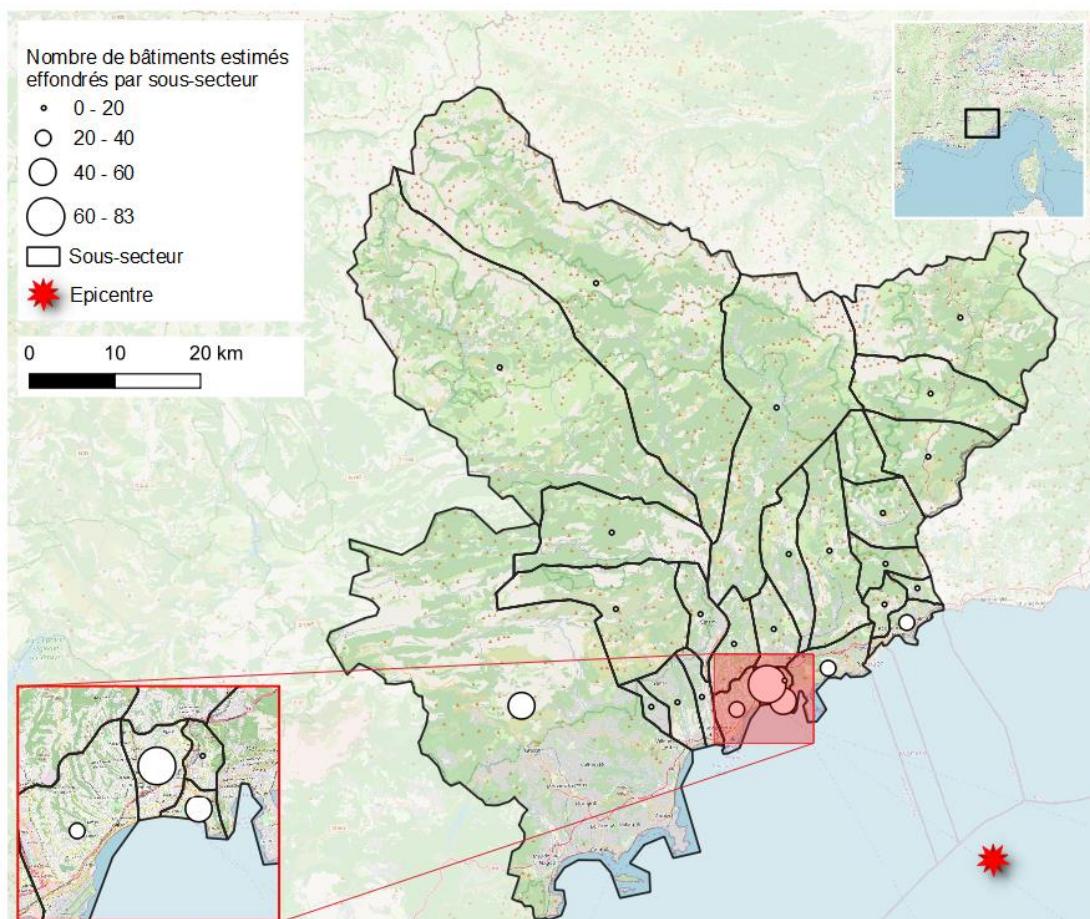
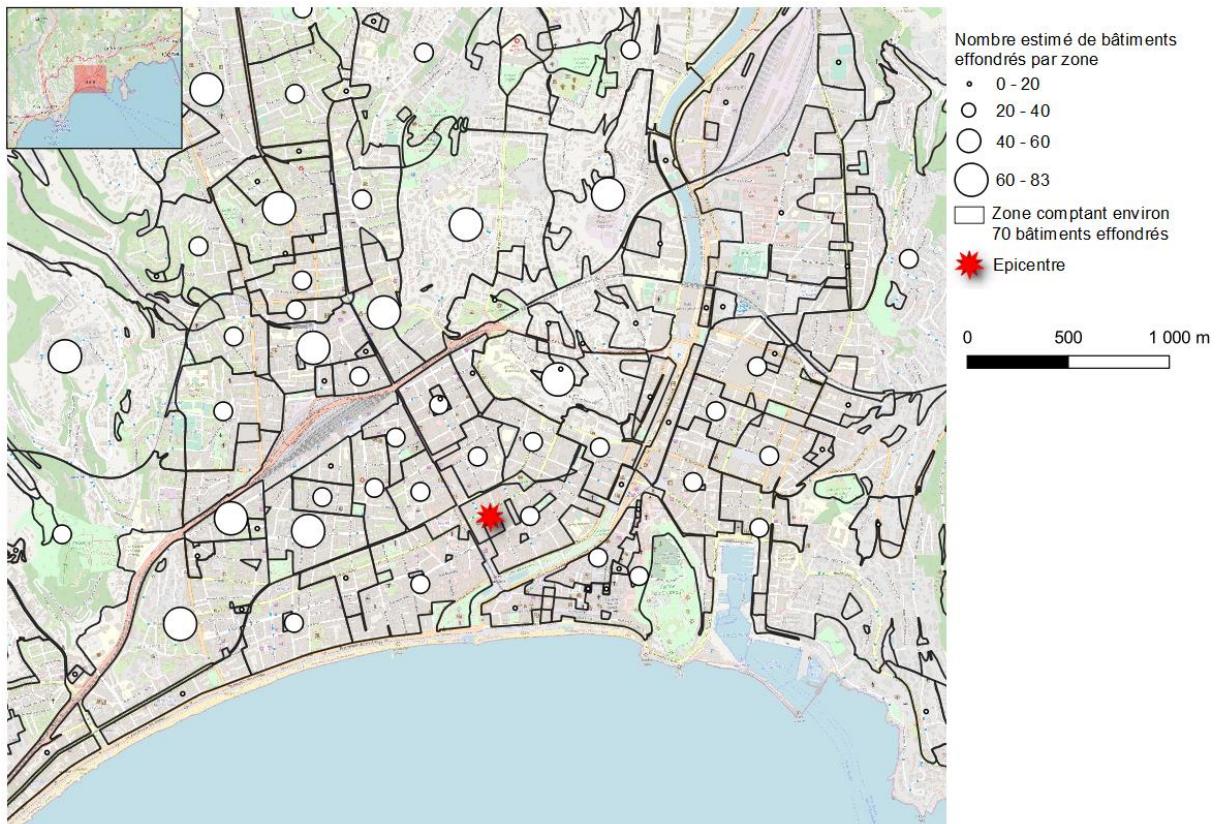


Figure 3.4 - Nombre estimé de bâtiments partiellement ou totalement effondrés par sous-secteurs, correspondant au séisme de scénario « mer Ligure ».

Nous avons donc décidé de ne pas présenter le zonage à fine échelle pour les séismes survenant en mer au large du littoral azuréen, car les dommages ne seraient pas assez concentrés pour justifier un zonage fin appuyant l'envoi de nombreuses équipes USAR. Il est dès lors judicieux de constater que les recommandations émises par le projet BELICE quant à l'établissement de zones d'une cinquantaine de bâtiments s'appliquent pour des séismes survenant à terre avec de fortes valeurs

d'intensité macroseismiques atteintes sur des zones densément peuplées. Pour trouver une application au zonage qui suit ces recommandations, nous avons produit un scénario fictif dans lequel l'épicentre du séisme touche le centre-ville de Nice, dont la magnitude est de 6.5 et la profondeur de 5 kilomètres (donc assez superficiel). Un scénario de ce type est très peu probable de se produire, la ville de Nice ne se situant pas sur une faille, mais il pourrait se produire dans une autre ville du monde plus soumise au risque sismique, et où le zonage serait une grande aide à la gestion de crise. La Figure 3.5 montre le résultat de l'estimation des dommages par zone USAR pour ce scénario, que j'ai regroupées pour obtenir environ soixante-dix bâtiments effondrés par zone.



*Figure 3.5 - Résultat du zonage pour créer des zones de 70 bâtiments estimés effondrés, d'après un scénario fictif touchant le centre-ville de Nice.*

Sur la base de ces estimations, il s'agit désormais de transmettre ces données aux équipes de secours sous forme de cartes de façon à restituer le plus efficacement possible les estimations, et de produire un outil d'aide à la décision efficace, sans pour autant indiquer de manière explicite les décisions à prendre et moyens à déployer.

### **3.2. Construction de la cartographie d'urgence**

#### **3.2.a. Recueil des besoins cartographiques**

Durant ce travail d'élaboration de la cartographie, les échanges avec les sapeurs-pompiers m'ont été particulièrement utiles, pour pouvoir appréhender leurs méthodes d'organisation de la réponse et leur montrer mes résultats. Etant novice dans le milieu de la gestion de crise, ma première compréhension du besoin s'est faite à partir du rapport BELICE, j'ai alors découvert le fonctionnement de la gestion de crise pour des scénarios dont l'ampleur nécessite la mobilisation de l'aide internationale.

Suite à la lecture de ce rapport, j'ai assisté à deux rencontres avec les sapeurs-pompiers, lors desquelles j'ai pu observer la mise en œuvre des secours selon les procédures françaises, différentes de celles internationales. En effet, lorsque plusieurs pays interviennent après une catastrophe, il n'y a pas – pour des raisons diplomatiques – de hiérarchie concernant l'aide internationale. Ainsi l'organisation est très transversale et chaque pays s'occupe d'un secteur, cela multipliant les interlocuteurs de la cellule de crise du pays touché. En France, la sectorisation est réalisée de manière pyramidale pour que la cellule de gestion de crise ait le moins d'interlocuteur possibles et que les communications soient toutes garanties d'un niveau à l'autre.

Pour comprendre ce à quoi devra ressembler la cartographie, j'ai pu observer un exercice de gestion de crise au SDIS d'Isère à Grenoble. Le BRGM leur a fourni l'estimation des dommages pour le scénario sismique de l'exercice, puis les sapeurs-pompiers devaient organiser la réponse avec les ressources dont ils disposaient. En observant les sapeurs-pompiers travailler avec leurs collègues géomaticiens, j'en ai déduit qu'il fallait leur fournir une carte qui montre les enjeux du territoire, avec une sectorisation « priorisée » (i.e. dont on indique clairement quelles zones sont prioritaires par rapport à l'estimation des dommages). Le SDIS de l'Isère ne possède pas de sectorisation préétablie comme leurs homologues des Alpes-Maritimes, ils ont créé une sectorisation qui dépendait de la localisation de l'épicentre et de la topographie avoisinante (par exemple, l'Isère à proximité de l'épicentre risquant de ne pas pouvoir être traversée, la rivière a été placée en frontière de secteur). J'ai également remarqué qu'ils ne disposaient pas de cartographie des enjeux tels que les établissements scolaires, EHPAD, ou aéroports et qu'ils ont besoin de connaître leur localisation ainsi que celle de grands espaces pour accueillir les renforts à l'abris des répliques.

Après cette journée d'observation, j'ai préparé une première cartographie en vue de la présenter lors d'un atelier organisé par mes tuteurs, auquel étaient conviés plusieurs SDIS. Finalement, seul le SDIS des Alpes-Maritimes était présent, ce qui a permis d'approfondir les échanges et de mieux caractériser leurs besoins. Cet atelier avait pour but de présenter aux experts USAR les travaux que plusieurs stagiaires ont réalisés sur le même aspect de la gestion de crise, à savoir l'estimation et la représentation des dommages humains et matériels. Cet atelier s'est déroulé au sein de l'Entente Valabre à Gardanne (13), qui est un établissement public de formation et de mise en commun des compétences et outils des organisations de sécurité civile telles que les SDIS. Cette journée a été une étape importante pour le déroulé de mon stage, car c'était la seule occasion dont je disposais

pour présenter mon travail au SDIS qui va l'utiliser et avoir des retours directs sur les besoins à satisfaire.

J'ai donc préparé de nombreux supports pour avoir leurs avis sur une diversité d'aspects. J'ai notamment utilisé un projet QGIS pour leur proposer plusieurs modes de représentation de l'estimation des dommages et des enjeux, détaillés dans le Tableau 3.2. Le projet QGIS permet d'imiter un portail cartographique, où l'utilisateur peut choisir d'afficher plusieurs couches déjà mises en forme. Un aperçu des couches et représentations présentées à travers le projet QGIS est montré dans la Figure 3.6 ci-dessous. La représentation qui a le plus parlé aux professionnels présents sur place est celle qui montre les dommages aux bâtiments.

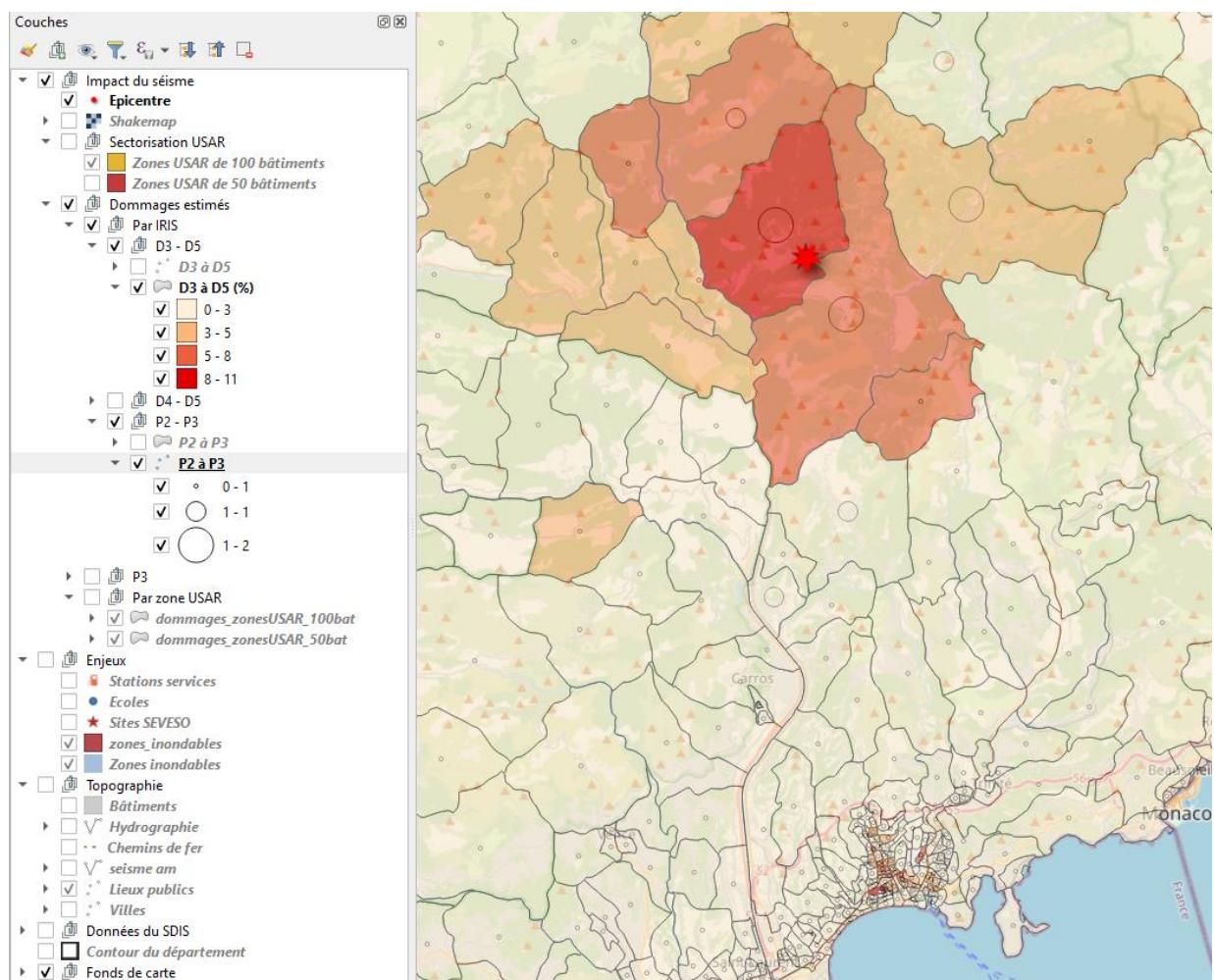


Figure 3.6 – Aperçu du projet QGIS visant à déterminer quelle représentation adopter pour la carte des bulletins (sur la capture, la proportion de bâtiments classés D3, D4 ou D5 est représentée en aplats de couleur faisant varier une teinte, et le nombre de blessés est représenté en cercles proportionnels).

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

---

Dommages	Indicateurs	Métrrique	Mode de représentation
Bâtiments effondrés	D3 à D5	Pourcentage de bâtiments D3 à D5	Aplats de couleurs avec une unique teinte dont la valeur varie
			Aplats de couleur vert/orange/rouge en lien avec la priorité d'intervenir
	D4 à D5	Nombre de bâtiments D3 à D5	Cercles proportionnels
			Aplats de couleurs avec une unique teinte dont la valeur varie
		Nombre de bâtiments D4 à D5	Aplats de couleur vert/orange/rouge en lien avec la priorité d'intervention
		Cercles proportionnels	
Blessés	P2 et P3	Pourcentage de blessés P2 et P3	Aplats de couleurs avec une unique teinte dont la valeur varie
			Aplats de couleur vert/orange/rouge en lien avec la priorité d'intervention
		Nombre de blessés P2 et P3	Cercles proportionnels

Tableau 3.2 – Propositions de représentations des conséquences d'un séisme

Il en ressort que l'expert du SDIS-06 présent à l'atelier privilégie une représentation des zones en aplats de couleurs, chaque couleur indiquant l'urgence d'intervenir dans une zone, calculée selon le nombre d'équipes à envoyer dans la zone. Le calcul du nombre d'équipes à envoyer se base sur le nombre de bâtiments à inspecter : il faut une heure pour réaliser l'inspection de cinq bâtiments, donc il faut  $\frac{nb\_batiments}{3h \times 5 \text{ bâtiments}/h} = nb\_batiments/15$  équipes par zone (cf. Figure 2.1). Concernant les données quantitatives, il a été estimé que les cercles proportionnels qui renseignent sur le nombre de bâtiments à inspecter ou de blessés sont superflus, et qu'un tableau ou des graphiques placés sur le côté de la carte seraient plus parlants.

La mise en page que je proposerai ne doit pas contenir d'informations superflues, telles que la localisation des enjeux, et doit se concentrer sur l'estimation des dommages aux bâtiments uniquement. En résumé, la mise en page doit être focalisée sur une carte des dommages potentiels, en indiquant clairement comment répartir les équipes USAR à déployer pour la phase d'ASR2, et qui donne aussi un aperçu des dommages et blessés grâce à des infographies accompagnant la carte.

#### 3.2.b. Création de la maquette

Ayant pris connaissance de la cartographie à fournir, j'ai créé une maquette qui permet de valider la mise en page du rapport qui sera généré. Pour aider la prise de décision à tous les niveaux de

commandement, j'ai choisi de faire quatre rapports, dont le contenu est détaillé dans le Tableau 3.3 ci-dessous.

Emprise de la carte	Résolution de la représentation de l'estimation des dommages	Echelle de restitution des graphiques
Département	Secteur	Secteur
Secteur	Sous-secteur	Sous-secteur
Sous-secteur	Sous-secteur	Tableau des dommages par zone
Zone	Zone	Tableau détaillé des dommages de la zone

Tableau 3.3 - Contenu des rapports

Chaque page présente un bandeau qui résume les caractéristiques du séisme (j'ai repris l'exemple des bulletins SEISAid existants), une carte priorisée de chaque secteur/sous-secteur/zone (comme décidé lors de l'atelier), accompagnée d'un graphique et d'un tableau décrivant les besoins en équipes USAR et le nombre de blessés potentiels.

L'outil *Mise en page* de QGIS s'est révélé être la solution la plus adéquate pour créer les mises en page, étant donné la présence d'une carte dont j'avais déjà travaillé le style sur QGIS. De plus, la fonctionnalité de création d'un atlas s'est révélée particulièrement utile pour créer des cartes de chaque secteur, sous-secteur ou zone de façon automatique. L'atlas parcourt les attributs d'une couche source entrée en paramètre, et actualise la carte en zoomant sur la géométrie de chaque attribut, il génère donc une mise en page par attribut, et chaque mise en page dépend de l'entité courante. En plus de cela, il est possible de paramétriser des textes de la mise en page pour qu'ils affichent la valeur d'un certain champ, ils sont actualisés pour afficher celle de l'entité courante de l'atlas. En particulier, la mise en page peut s'actualiser selon le scénario, car elle dépend de la couche entrée en paramètre de l'atlas, et les textes s'adaptent aux valeurs figurant dans la table attributaire de la couche. J'ai également utilisé le plugin DataPlotly pour créer les graphiques, qui actualise automatiquement les graphiques selon l'entité courante de l'atlas.

Les mises en page ont été présentées aux personnes avec lesquelles nous avons fixé les besoins à Valabre, elles ont proposé de rajouter une notion de pourcentage des bâtiments à inspecter dans chaque zone, afin que les services de secours puissent gérer les situations dégradées en ressource en calculant le nombre d'équipes à envoyer en fonction du nombre d'équipes à disposition. La cartographie et les graphiques ont été validés sans besoin de corrections. Un exemple de mise en page validée par le SDIS-06 est illustré ci-après sur la Figure 3.7, les mises en page validées sont toutes présentées de l'Annexe B-1 à l'Annexe B-4.

### 3. Cartographie de l'estimation des dommages par zone

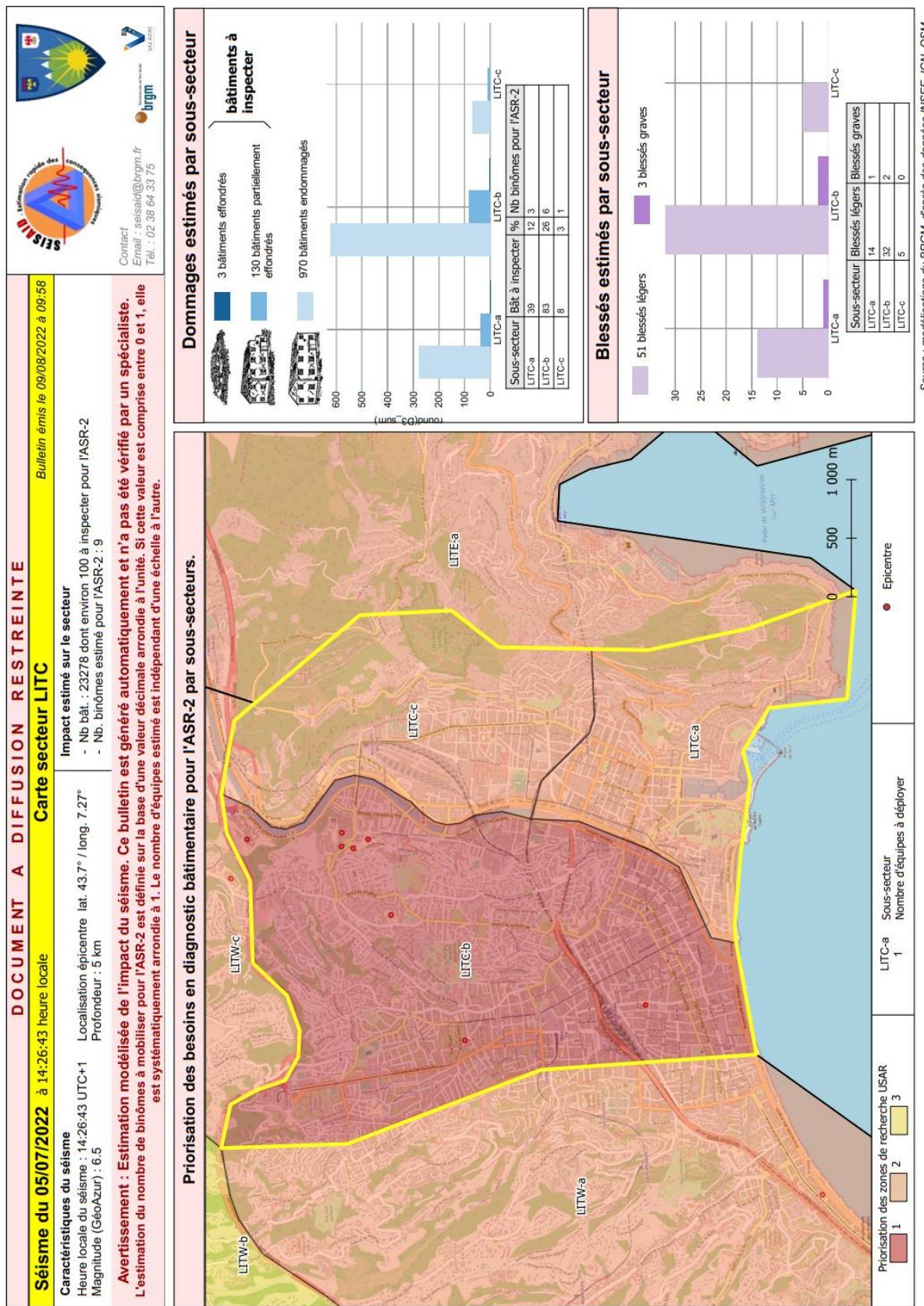


Figure 3.7 – Mise en page du rapport retenue pour la représentation par secteurs.

A la suite de ce travail, l'utilisation du zonage sur lequel je travaillais depuis quelques mois devenait plus concrète, et je suis passée à l'étape d'automatisation de la mise à disposition des mises en page. Pour ce faire, la solution la plus simple est la création d'un plugin QGIS, puisque j'avais déjà créé les modèles de traitements pour le zonage et les mises en page avec ce logiciel.

### **3.3. Création d'un plugin QGIS pour la mise à disposition des rapports**

Le plugin permet de rendre accessibles les traitements sur les données géographiques, bien que je les ai automatisés dans des chaînes de traitements, la création d'un plugin permet d'ajouter plus de fonctionnalités et se révèle être indispensable pour la création de la mise en page à partir des données en entrée. En effet, jusqu'alors tous les traitements pour créer la cartographie étaient automatisés dans des chaînes de traitements exécutées tour à tour, qui faisaient appel à des fonctions PostgreSQL pour automatiser les requêtes PostGIS. J'avais également sauvegardé les modèles de mises en pages définitifs pour gagner du temps lors de l'élaboration des rapports.

Cependant, ces modèles ne s'adaptent pas à de nouvelles couches, notamment lorsque je souhaitais réaliser des rapports pour un scénario différent que celui pour lequel les modèles avaient été créés. De plus, il me fallait à peu près une heure de travail pour générer le zonage, l'estimation des dommages, et adapter la mise en page en fonction de chaque nouvelle estimation.

Ainsi, le plugin permettra d'effectuer des traitements à la chaîne et de proposer une interface à des utilisateurs qui ne sont pas familiers avec l'utilisation de QGIS. Le plugin doit donc créer, à partir d'une estimation de dommages en entrée, des rapports à plusieurs échelles selon la maquette approuvée par le SDIS-06, en plus de la création du zonage et du calcul de dommages par zone déjà implémentés dans les modèles de traitement.

En premier lieu, j'ai créé le squelette du plugin brut grâce à l'extension *Plugin Builder*, qui permet de créer les fichiers nécessaires au fonctionnement d'un plugin QGIS. Après la création des fichiers, j'ai exporté les modèles de traitement que j'avais créés via le modeleur graphique de QGIS en script Python. Ces derniers sont conçus pour être utilisés tels quels dans un plugin de type « Processing Provider », qui utilise un provider pour appeler le code de façon autonome, et peut être exécuté depuis le modeleur graphique de QGIS. Malgré le fait que ce type de plugin soit rapide et facile à développer, il ne laisse pas de place à la personnalisation et à l'appel à d'autres librairies Python. C'est pourtant un critère déterminant puisque j'aimerais personnaliser et automatiser le processus d'élaboration des rapports au maximum, et j'aurai besoin de pouvoir appeler des librairies Python externes à QGIS depuis le plugin, pour reprendre les méthodes de réception des notifications de séisme dont dispose SEISAid par exemple.

J'ai donc choisi de créer un plugin sans provider, et ai adapté les codes de calculs issus de mes modèles de traitement afin de réaliser ces traitements dans le plugin, grâce à la librairie *QgsProcessing*. Après ce travail, le plugin peut créer de manière automatique le zonage brut, l'attribution des dommages au zonage brut, et l'union des zones de façon à ce qu'il y ait environ soixante-dix bâtiments partiellement ou totalement effondrés par zone. Comme certains calculs ont besoin d'être exportés en base de données, l'appel à la librairie Psycopg2 permet de créer ou de

réinitialiser la base de données, et de la peupler avec les fonctions. Ces dernières seront exécutées depuis un traitement de la librairie *QgsProcessing*.

Ensuite, j'ai exporté les styles qui ont été validés pour les couches qui représentent les sectorisations, et je les ai importés dans le plugin, de façon à ce que ce dernier charge automatiquement les couches avec le style qui leur correspond dans le projet.

J'ai également réalisé des traitements supplémentaires pour rendre compte des secousses ressenties sur la carte, en extrayant les lignes de niveau d'une ShakeMap entrée en paramètre au format raster. J'ai extrait et stylisé les lignes qui délimitent les intensités III et VI, qui correspondent respectivement aux zones de secousses ressenties et aux zones de dommages potentiels. Ces lignes seront affichées sur la carte départementale.

Enfin, j'ai utilisé la classe *QgsLayout* pour créer de manière automatique la mise en page du rapport. Cette classe offre toutes les fonctionnalités de l'outil de mise en page propre à QGIS, je l'ai utilisée pour ajouter la carte, les textes et leurs cadres, les logos, et les tables attributaires dans une mise en page créée lors de l'exécution du plugin. Le plugin *DataPlotly* ne peut pas être utilisé avec la classe *QgsLayout*. Donc pour afficher les graphiques, j'ai fait appel à la librairie Python *Matplotlib*, dont les graphiques sont sauvegardés au format .png pour pouvoir être ajoutés dans la mise en page en tant qu'images.

Le plugin exporte en un dernier temps et de manière automatique les bulletins dans un répertoire choisi en entrée par l'utilisateur, grâce à la fonctionnalité d'atlas implémentée dans le plugin. Contrairement à la carte et aux textes, les tables attributaires et les graphiques ne s'actualisent pas en fonction de l'entité courante de l'atlas, j'ai donc utilisé des filtres pour que ces derniers affichent les sous-secteurs dont le nom correspond à celui du secteur/sous-secteur affiché dans l'atlas.

Comme les bulletins sont légèrement différents d'une échelle à l'autre, j'ai adapté les fonctions du plugin pour qu'elles affichent les graphiques et tables attributaires à l'échelle des secteurs ou des sous-secteurs, selon l'échelle des bulletins (cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

En fin de compte, le plugin permet d'effectuer tous les traitements en 5 à 10 minutes, la partie de génération des bulletins étant la plus longue. Ce temps peut être réduit à 2 minutes si l'utilisateur choisi de générer les bulletins selon des géométries qu'il a entrées en paramètre, ce temps d'exécution étant proportionnel au nombre de bulletins à générer. L'étape d'élaboration du zonage selon un certain nombre de bâtiments entré en paramètre sera ignorée.

L'interface du plugin est figurée en Annexe C-1.

## 4. Difficultés rencontrées et perspectives

### 4.1. Difficultés rencontrées

Tout au long du stage, j'ai basé mes réalisations sur des recommandations théoriques, sans avoir forcément de retours réguliers du milieu opérationnel, futur utilisateur de l'outil. Cela a causé des périodes de battement en attendant leurs recommandations, pendant lesquelles j'avais du mal à envisager la suite de mes travaux. De plus, en ayant leurs retours tardivement, j'ai réalisé des travaux inutiles, comme la division des zones trop grandes lors de l'établissement de la sectorisation automatique, ou la collecte de données dont ils n'ont pas besoin, choses qu'il était difficile d'appréhender sans leurs avis. J'ai pourtant beaucoup apprécié avoir leurs retours qui m'ont permis de m'immerger dans le monde de la gestion de crise, et qui ont été indispensables à mon travail.

### 4.2. Pistes d'amélioration sur le contenu de la cartographie

Les améliorations à prendre en compte concernent principalement l'estimation de dommages. Premièrement, des approximations ont été faites lors du calcul des dommages par zone, en distribuant les estimations de dommages effectuées au niveau des îlots IRIS à une échelle plus fine. J'ai essayé plusieurs méthodes pour avoir des résultats les plus fidèles possibles, mais une solution plus pérenne serait de modifier les traitements de Vigirisks pour que ce dernier renvoie les dommages calculés par zone directement. Mais il faut pour cela bénéficier de la distribution des typologies des bâtiments à une échelle plus fine, qu'il n'est pas possible d'obtenir pour le moment. Cela engendrerait également une lourdeur de calculs en multipliant le nombre de géométries à prendre en compte.

De plus, les fichiers de description des typologies des bâtiments sur lesquels se base l'estimation des dommages ne comptent pas le même nombre de bâtiments que celui de la BD Topo : j'ai également fait une approximation en ré-échantillonnant le fichier d'enjeux pour qu'il corresponde à la BD Topo, dont je me sers pour redistribuer les dommages des IRIS aux zones d'intervention. L'établissement de ce fichier étant réalisé d'après les données INSEE, il faudrait revoir les méthodes de calcul du nombre de bâtiments pour avoir des résultats en accord avec la réalité du terrain.

Sur un autre aspect, la prise en compte de la population dans le modèle de pertes et limité à la population résidente, et ne prend pas en compte les mobilités journalières et saisonnières. Des travaux ont été réalisés par une autre stagiaire du BRGM pour prendre en compte cet aspect dans les modélisations, et il serait intéressant de pouvoir inclure ses conclusions dans les traitements du plugin développé.

Plus généralement, l'outil prend en compte la population résidente, et ne distingue pas les types de bâtiments (Etablissements Recevant du Public, résidentiels, écoles...) : ceci peut causer un biais dans la priorisation des zones d'intervention, car la présence d'une école ou d'un hôpital pour un séisme en journée n'est pas envisagée par l'outil.

Bien que nous ayons considéré pour la validation des maquettes, un séisme de scénario ayant de faibles chances de se produire en France, l'outil demeure pertinent pour le SDIS-06, de sorte à

pouvoir réagir à tout type de séisme qui surviendrait sur le territoire des Alpes-Maritimes. Cependant, l'appui à la sectorisation USAR pour l'ASR-2 présente son plein intérêt dans le cadre de séismes majeurs nécessitant une intervention massive, plus fréquent sur des théâtres étrangers qu'en France. Il faut donc pouvoir adapter les données utilisées au contexte international : cela ne pose pas de problèmes pour les routes et cours d'eau OSM, et la BD Topo pourra être remplacée par les données OSM, qui sont similaires et peuvent également fonctionner telles quelles pour le zonage. Le souci majeur concernant cette approche internationale est que les fichiers d'enjeux dont la plateforme Vigirisks a besoin pour estimer les dommages ne sont aujourd'hui disponibles qu'en France.

Pour finir, la plupart des échanges menés sur mon travail ont été réalisés avec le SDIS-06, or le plugin que j'ai développé peut s'appliquer partout en France, et donc être utilisé au profit d'autres SDIS. Cependant, les méthodes de préparation au risque sismique étant différentes d'un département à l'autre, tous les SDIS ne disposent pas d'une pré-sectorisation comme les Alpes-Maritimes, que j'utilise dans l'outil mis en place. Cela peut les inciter à préparer ce genre de cartographie, en lien avec les conseils publiés lors du projet BELICE.

### 4.3. Développements supplémentaires pour le plugin

L'écriture de ce rapport intervenant avant la fin de mon stage, cette partie permet de décrire les développements futurs considérés pour le plugin.

En premier lieu, certains développements peu conséquents sont envisagés à court terme. D'une part, pour améliorer l'interface utilisateur, la boîte de dialogue du plugin pourra proposer des options pour adapter la carte aux besoins de l'utilisateur, comme le choix des indicateurs à représenter sur la carte notamment.

D'autre part, pour améliorer l'expérience de l'utilisateur, il est aussi envisagé d'ajouter une barre de progression pour afficher l'avancement de la génération des cartes, et d'exécuter les tâches dans un autre fil d'exécution que celui de l'interface utilisateur, pour garder une interface utilisable par l'utilisateur (notamment lors de la création du zonage qui est un calcul conséquent).

A plus long terme, il serait intéressant de pouvoir se connecter aux bases de données pour renseigner de manière automatique les caractéristiques du séisme dans les rapports. De plus, pour les utilisateurs peu familiers de QGIS, il faudrait améliorer l'interface pour proposer ce qui pourrait ressembler à une application à part entière. Une autre solution à discuter avec les futurs utilisateurs de l'outil serait de créer une application stand-alone, qui pourrait être exécutée en dehors de QGIS grâce à une interface utilisateur codée avec les librairies *TKinter* ou *wxPython*. Cela serait rendu possible grâce à l'import du module *qgis.core*, il faut cependant que l'application QGIS soit déjà installée sur l'ordinateur de l'utilisateur.

En fonction des développements futurs, je mettrai soit une application, soit un plugin à disposition des commanditaires. Pour m'assurer de la pérennité de mon travail au sein du BRGM et dans les

SDIS, j'écrirai une documentation qui explique comment installer et utiliser l'outil. Il faudra notamment préciser quelles données sont nécessaires à son fonctionnement. J'ai également commenté mon code afin qu'il puisse être modifié ou complété si besoin. Ce rapport sera mis à jour en fonction de mon avancée et transmis aux personnes susceptibles d'être intéressées par son contenu.

# Conclusion

## Bilan technique

Durant ces cinq mois de stage, j'ai pu commencer à implémenter une solution de mise à disposition automatique de l'estimation des dommages postseismiques pour les services de secours. Elle se base sur un fichier d'estimation des dommages à l'échelle des IRIS, et crée à partir de ce dernier une cartographie complète des dommages à plusieurs échelles. Pour faire cela, je me suis acculturée avec les processus et recommandations émises par les nombreux acteurs de la gestion de crise. Les différentes cartographies fournies aux utilisateurs ont été conçues pour pouvoir être utilisées par plusieurs acteurs, à tous les niveaux de commandement.

Il reste encore du travail à fournir pour mettre l'application à disposition des équipes de secours, et j'espère grandement pouvoir y parvenir avant la fin de mon stage.

## Bilan personnel

Il a été très intéressant de pouvoir faire naître une solution à partir de recommandations générales, puis de la faire évoluer en fonction des réflexions et retours obtenus. J'ai apprécié participer aux échanges pour pouvoir découvrir le métier des professionnels à qui se destine l'application et réfléchir à la façon dont mon travail pouvait leur servir au mieux.

Sur le plan des connaissances et expertises acquises, j'ai majoritairement utilisé QGIS, dont les algorithmes, les modèles de traitements, et les outils de mise en page automatique n'ont plus de secret pour moi. J'ai pu créer un plugin, une première pour moi, et suis satisfaite du travail réalisé, qui m'a permis de renforcer les compétences acquises lors de mon cursus à l'ENSG. J'ai aussi pu renforcer mes connaissances en gestion de bases de données, et les mettre en application, notamment lors de la création des fonctions et des triggers pour automatiser les traitements PostGIS lors de la création du zonage. Globalement, je suis satisfaite de ce stage, et j'apprécie le résultat obtenu, cela me permet de conclure mon cursus à l'ENSG d'une belle manière.

# Bibliographie

BELICE, Projet. «Guide ASR-1 : Méthode de préparation et évaluation des dégâts sur de larges territoires.» 2019.

BRGM. *Simulation de mouvements forts du sol sur le centre-ville de Nice*. BRGM, 1994.

Grünthal, G, et A Levret. *L'Echelle Macroseismique Européenne 1998*. Conseil de l'Europe - Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 19, 2001.

INSARAG. *INSARAG Guidelines - Volume II : Preparedness and Response, Manual B : Operations*.  
<https://www.insarag.org/wp-content/uploads/2021/06/INSARAG20Guidelines20Vol20II2C20Man20B.pdf>, 2020.

Manchuel, K., P. Traversa, D. Baumont, M. Cara, E. Nayman, et C. Durouchoux. *The French seismic CATalogue (FCAT-17)*. Bulletin of Earthquake Engineering 16(6), 2227-2251., 2018.

Molina-Palacios, S. *State of the art in seismic vulnerability*.  
[https://www.researchgate.net/publication/39437819\\_State\\_of\\_the\\_art\\_in\\_seismic\\_vulnerability](https://www.researchgate.net/publication/39437819_State_of_the_art_in_seismic_vulnerability), 2007.

Sedan, O., C. Negulescu, M. Terrier, A Roulle, T . Winter, et D. Bertil. *Armagedom—a tool for seismic risk assessment illustrated with applications*. Journal of earthquake engineering, 17(2), 253-281., 2013.

Tang, B., et al. *Rapid estimation of earthquake fatalities in China using an empirical regression method*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 41 p. 101306, 2019.

# Table des figures

FIGURE 1.1 - ECHELLE DE DEGATS AUX BATIMENTS EMS-98 POUR LES CONSTRUCTIONS EN MAÇONNERIE ET EN BETON ARME. SOURCE : (GRÜNTHAL ET LEVRET 2001).....	12
FIGURE 1.2 – EVOLUTION DANS LE TEMPS DU TAUX DE CONNAISSANCE DU NOMBRE DE PERSONNES DECEDEES (NOTES « DCD ») – SOURCE : BRGM, A PARTIR DES DONNEES DU SECRETARIAT EQUATORIEN DE LA GESTION DES RISQUES, ET DU MODELE DE TANG ET AL., 2019.....	13
FIGURE 1.3. EXEMPLE DE SHAKEMAP REALISEE PAR GEOAZUR POUR LE SEISME DU 11/11/2019 – SOURCE : GEOAZUR.....	14
FIGURE 1.4. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA MANIERE DONT LE BRGM PROCEDE POUR REALISER UN SCENARIO DE DOMMAGE PAR MODELISATION – SOURCE : BRGM .....	14
FIGURE 1.5. EXEMPLE DE COMMUNIQUE SEISAID REALISE PAR LE BRGM AUX ANTILLES POUR UN SEISME DE SCENARIO REPRENANT LES CARACTERISTIQUES DU SEISME HISTORIQUE DU 29 AVRIL 1897 – SOURCE : BRGM .....	15
FIGURE 1.6 - LIGNES DIRECTRICES DE L'INSARAG : NIVEAUX D'ASR - SOURCE : (BELICE 2019) .....	16
FIGURE 2.1 - DIMENSIONNEMENT DES SECTEURS : NOMBRE MAXIMAL DE BATIMENTS A EVALUER PAR SECTEUR (GUIDE BELICE, 2021) .....	20
FIGURE 2.2 - RESULTAT DE LA SECTORISATION REALISEE AVEC LE PLUGIN BELICE SUR QGIS, POUR LE SEISME DE PETRINJA DU 29/12/2020.....	22
FIGURE 2.3 - REPARTITION DU NOMBRE DE BATIMENTS PAR ZONE A LA SORTIE DU PLUGIN BELICE, POUR LA ZONE EPICENTRALE DU SEISME DE PETRINJA DU 29/12/2020 .....	22
FIGURE 2.4 - SECTORISATIONS EXPERIMENTALES .....	24
FIGURE 2.5 - REPARTITION DU NOMBRE DE BATIMENTS PAR ZONE POUR LES ZONES CREEES DEPUIS LES RESEAUX ROUTIERS, FERRES ET HYDROGRAPHIQUE. .....	24
FIGURE 2.6 - CORRECTION DU ZONAGE EN RETIRANT LES ZONES ISOLEES .....	26
FIGURE 2.7 - FONCTIONNEMENT DE LA FONCTION REGROUPEMENT _VOISINS() DE TRI DES ZONES ADJACENTES..	27
FIGURE 2.8 - SCHEMA DU TRAITEMENT DE CREATION DU ZONAGE .....	29
FIGURE 2.9 - ZONAGE FINAL, COLORE EN FONCTION DU RESPECT OU NON DU CRITERE DE 50 BATIMENTS PAR ZONE .....	30
FIGURE 2.10 - COMPARAISON DU NOMBRE DE BATIMENTS PAR ZONE AVANT / APRES L'EXECUTION DU SCRIPT POSTGIS .....	30
FIGURE 3.1 – SCHEMA DES DONNEES NECESSAIRES AU FONCTIONNEMENT DU WORKFLOW ARMAGEDOM SUR VIGIRISKS, ET DES DONNEES QU'IL GENERE .....	34
FIGURE 3.2 – SCHEMA DU CALCUL DES DOMMAGES PAR ZONE DEPUIS L'ESTIMATION DES DOMMAGES PAR IRIS (D_IRIS EST LE NOMBRE DE BATIMENTS ENDOMMAGES DANS L'IRIS, NB_BAT_IRIS EST LE NOMBRE TOTAL DE BATIMENTS DANS L'IRIS, D_MOY_IRIS EST LE DOMMAGES MOYEN PAR BATIMENT DANS L'IRIS).....	37
FIGURE 3.3 – NOMBRE DE BATIMENTS PARTIELLEMENT OU TOTALEMENT EFFONDRES PAR IRIS ET PAR ZONES DE RECHERCHE USAR DE 70 BATIMENTS POUR UN SCENARIO DE TYPE « MER LIGURE » .....	37
FIGURE 3.4 - NOMBRE ESTIME DE BATIMENTS PARTIELLEMENT OU TOTALEMENT EFFONDRES PAR SOUS-SECTEURS, CORRESPONDANT AU SEISME DE SCENARIO « MER LIGURE » .....	38
FIGURE 3.5 - RESULTAT DU ZONAGE POUR CREER DES ZONES DE 70 BATIMENTS ESTIMES EFFONDRES, D'APRES UN SCENARIO FICTIF TOUCHANT LE CENTRE-VILLE DE NICE. ....	39
FIGURE 3.6 – APERÇU DU PROJET QGIS VISANT A DETERMINER QUELLE REPRESENTATION ADOPTER POUR LA CARTE DES BULLETINS (SUR LA CAPTURE, LA PROPORTION DE BATIMENTS CLASSES D3, D4 OU D5 EST REPRESENTEE EN APLATS DE COULEUR FAISANT VARIER UNE TEINTE, ET LE NOMBRE DE BLESSES EST REPRESENTE EN CERCLES PROPORTIONNELS).....	41
FIGURE 3.7 – MISE EN PAGE DU RAPPORT RETENUE POUR LA REPRESENTATION PAR SECTEURS.....	44



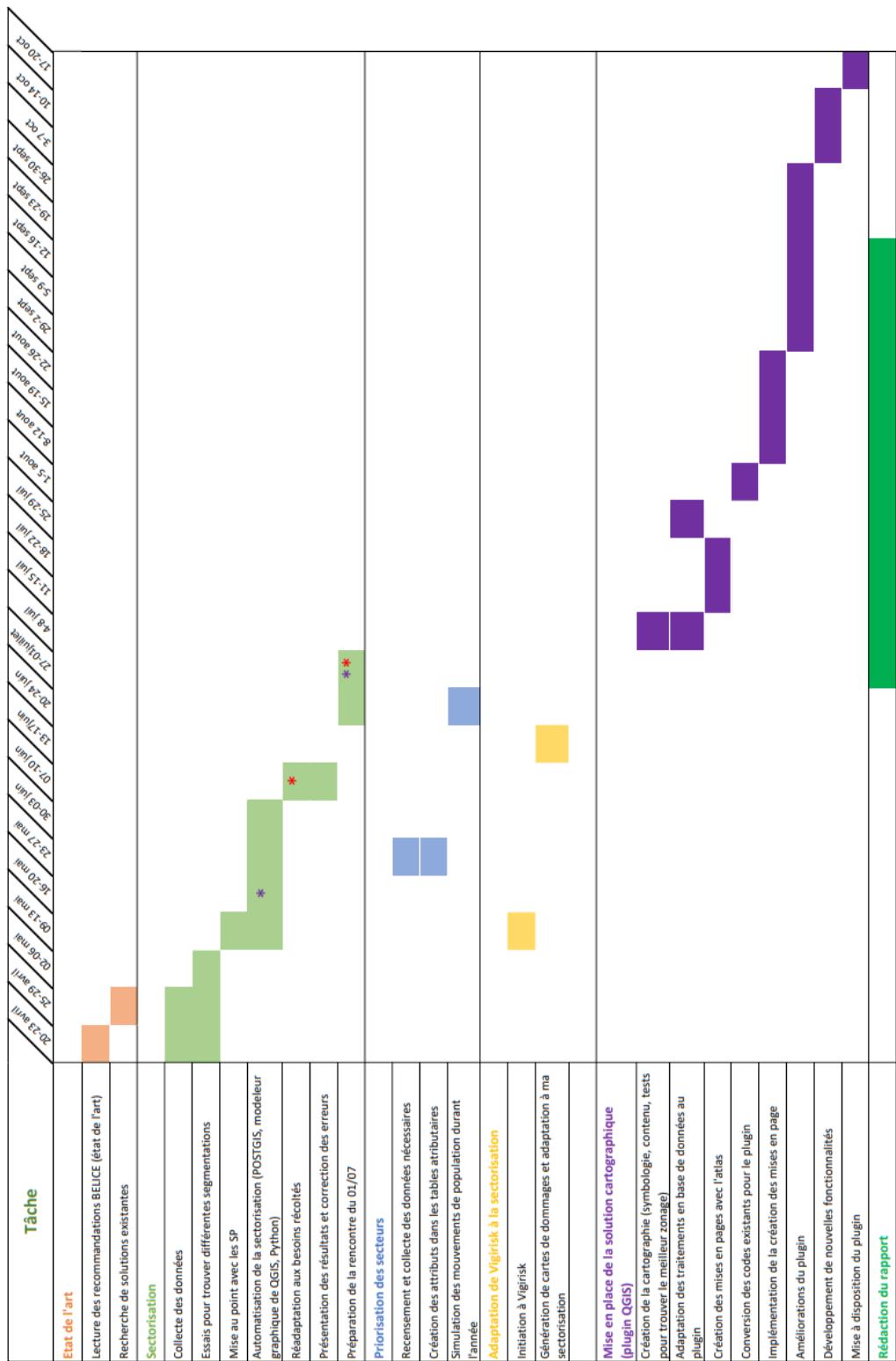
# Liste des tableaux

TABLEAU 2.1 - IMPACT DU SEUIL ENTRE EN PARAMETRE SUR LA QUALITE DU ZONAGE, EN FONCTION D'UN OBJECTIF FIXE .....	28
TABLEAU 2.2 - NOMBRE DE ZONES QUI ONT LE BON NOMBRE DE BATIMENTS EN FONCTION DU CRITERE UTILISE POUR PRIORISER L'UNION DES ZONES AVEC LEUR VOISINE.....	28
TABLEAU 2.3 - COMPARAISON DES PERFORMANCES DU ZONAGE AUTOMATIQUE EN FONCTION DE LA TAILLE DES ZONES.....	32
TABLEAU 3.1 – SEISMES HISTORIQUES AYANT IMPACTE LES ALPES-MARITIMES .....	36
TABLEAU 3.2 – PROPOSITIONS DE REPRESENTATIONS DES CONSEQUENCES D'UN SEISME .....	42
TABLEAU 3.3 - CONTENU DES RAPPORTS .....	43

# Annexes

ANNEXE A-1 – DIAGRAMME DE GANTT .....	56
ANNEXE B-1 – BULLETIN D'ESTIMATION DES DOMMAGES A L'ECHELLE DU DEPARTEMENT GENERE AVEC LE PLUGIN DEVELOPPE AU COURS DE CE STAGE.....	58
ANNEXE B-2 – EXEMPLE DE BULLETIN D'ESTIMATION DES DOMMAGES A L'ECHELLE D'UN SECTEUR, GENERE AVEC LE PLUGIN .....	59
ANNEXE B-3 – EXEMPLE DE BULLETIN D'ESTIMATION DES DOMMAGES A L'ECHELLE D'UN SOUS-SECTEUR, GENERE AVEC LE PLUGIN .....	60
ANNEXE B-4 - EXEMPLE DE BULLETIN D'ESTIMATION DES DOMMAGES A L'ECHELLE D'UNE ZONE DE RECHERCHE, GENERE AVEC LE PLUGIN .....	61
ANNEXE C-1 – PREMIER ONGLET DU PLUGIN.....	62
ANNEXE C-2 – SECOND ONGLET DU PLUGIN : PARAMETRAGE DE LA CREATION DU ZONAGE.....	63
ANNEXE C-3 – TROISIEME ONGLET DU PLUGIN : POUR LE CALCUL ET LA RESTITUTION DE L'ESTIMATION DES DOMMAGES .....	63

# Annexe A. Diagramme de GANTT



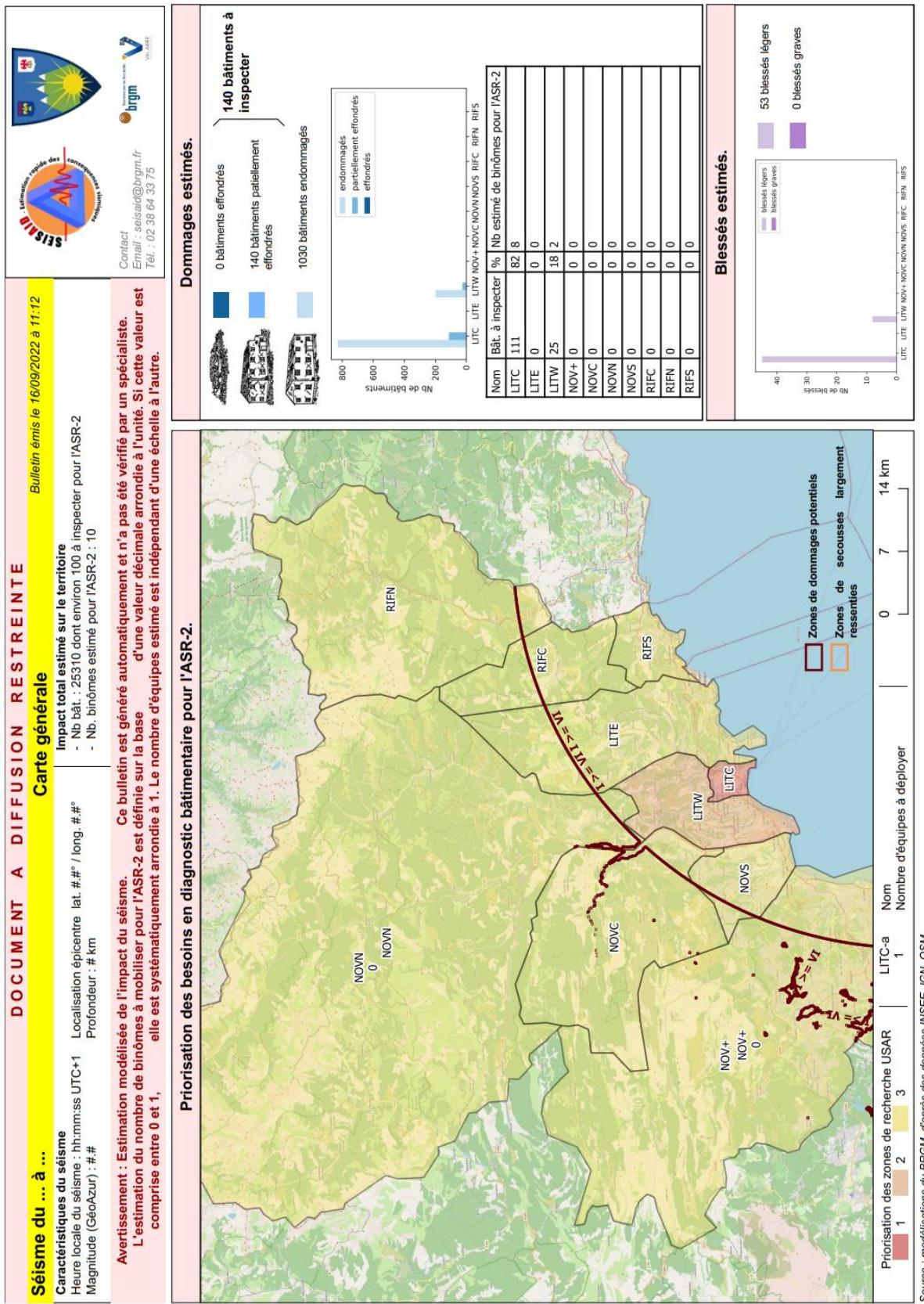
Annexe A-1 – Diagramme de GANTT

- \* : Rencontre avec les sapeurs-pompiers
- \*\* : Point avec le professeur référent

## **Annexe B. Mise en page des bulletins d'estimation des dommages**

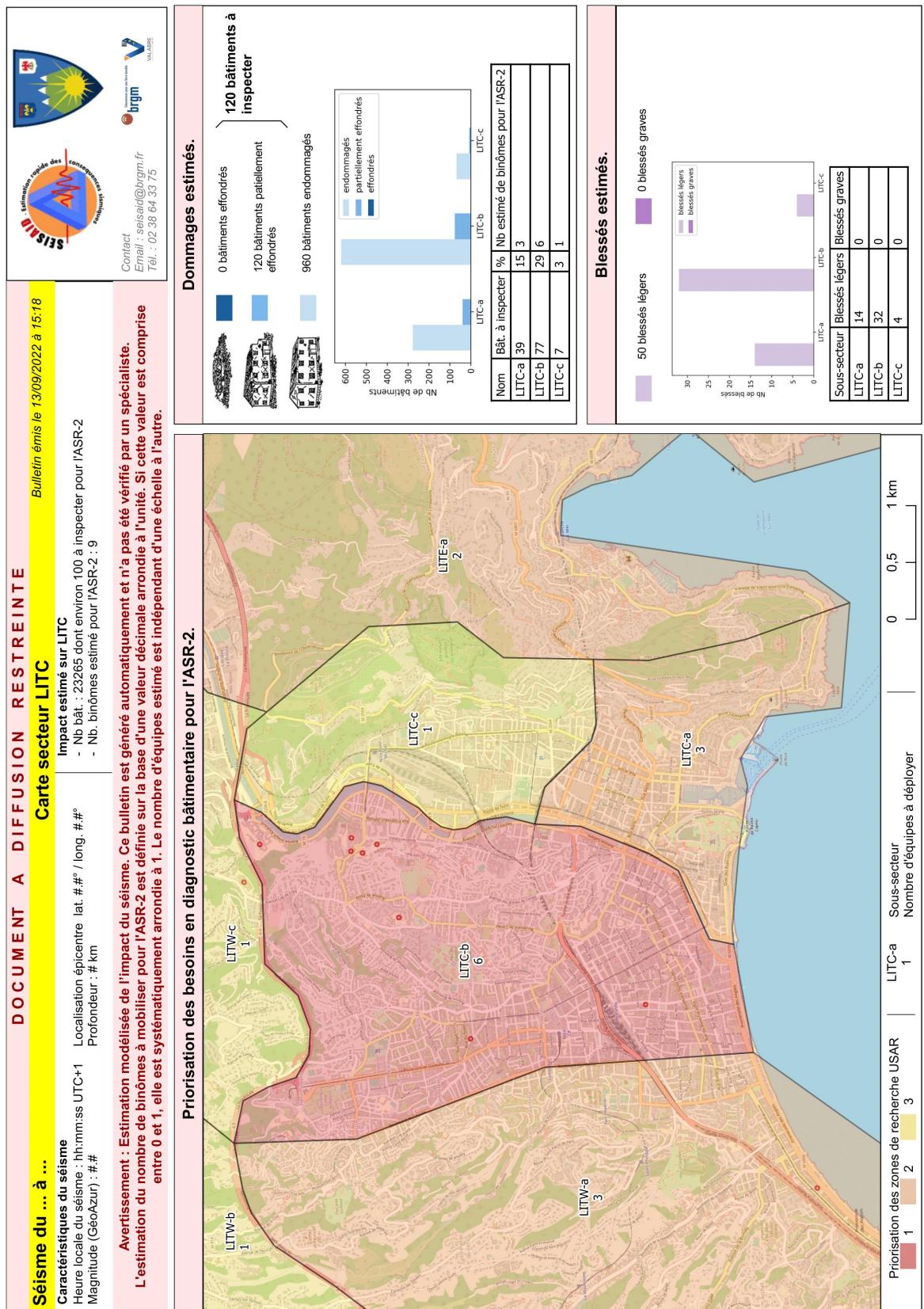
Cette annexe illustre les bulletins générés par le plugin à quatre échelles : départementale, par secteur SDIS, par sous-secteurs SDIS et par zone de 70 bâtiments effondrés.

Le scénario utilisé pour l'estimation des dommages de ces bulletins est celui d'un séisme se produisant au large de la côte niçoise, appelé de type 'Ligure', dont la magnitude est de 6.7, la profondeur de 15 kilomètres, et l'épicentre se situe aux coordonnées (43.52, 7.58).

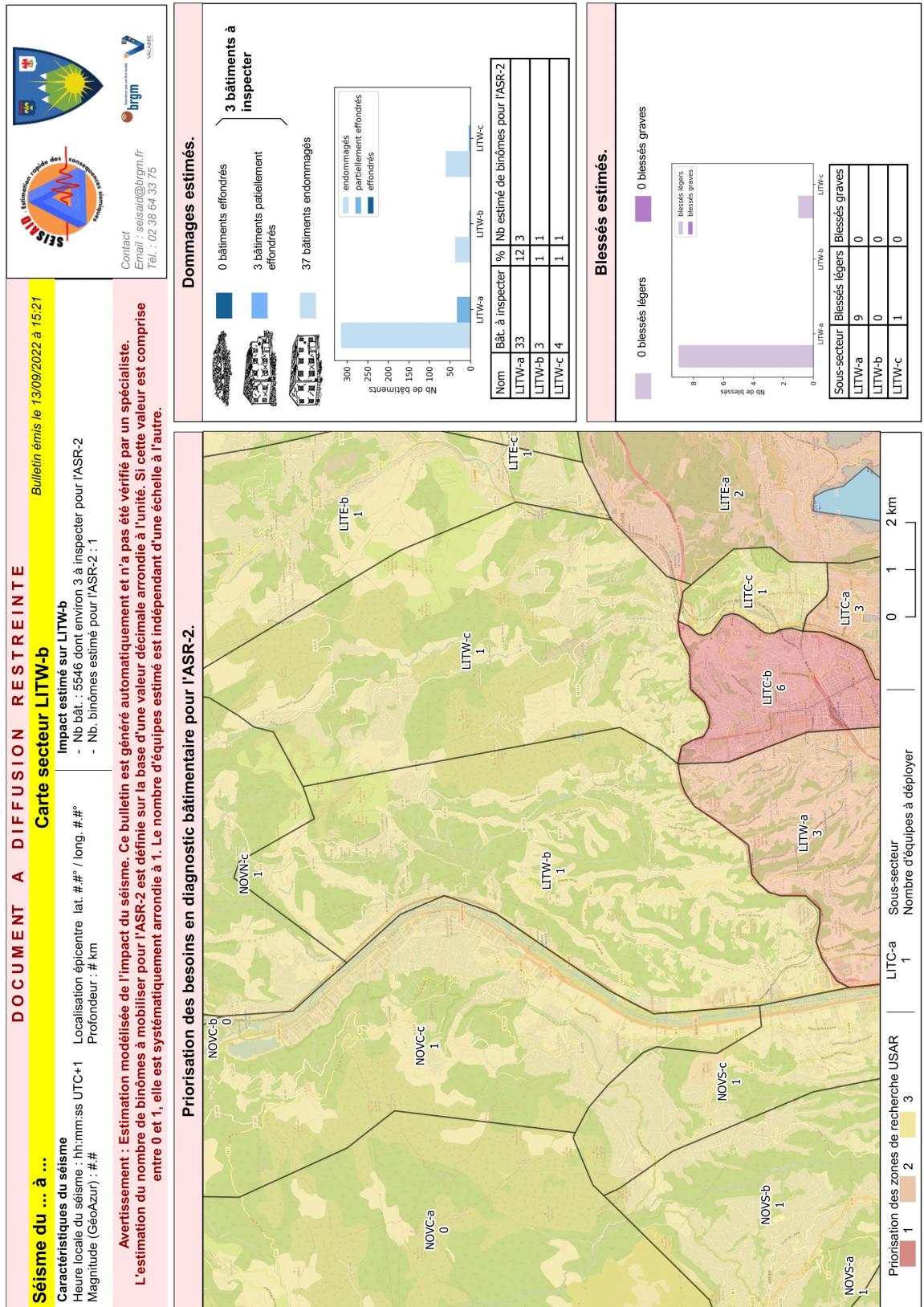


Annexe B-1 – Bulletin d'estimation des dommages à l'échelle du département générée avec le plugin développé au cours de ce stage.

Source : modélisations du BRGM, d'après des données INSEE, IGN, OSM



Annexe B-2 – Exemple de bulletin d'estimation des dommages à l'échelle d'un secteur, généré avec le plugin.



Annexe B-3 – Exemple de bulletin d'estimation des dommages à l'échelle d'un sous-secteur, générée avec le plugin

**DOCUMENT A DIFFUSION RESTREINTE**

**Carte zone 8896**

Bulletin émis le 14/09/2022 à 09:04

Caractéristiques du séisme			Impact estimé sur le sous-secteur		
Heure locale du séisme : 14:26:43 UTC+1	Localisation épicentre lat. 43.52° / long. 7.58°	- Nb bâti : 100 dont environ 20 à inspecter pour l'ASR-2			
Magnitude (Géodazur) : 6.5	Profoundeur : 5 km	- Nb binômes estimé pour l'ASR-2 : 2			

**Avertissement : Estimation modélisée de l'impact du séisme. Ce bulletin est généré automatiquement et n'a pas été vérifié par un spécialiste.**  
**L'estimation du nombre de binômes à mobiliser pour l'ASR-2 est définie sur la base d'une valeur décimale arrondie à l'unité. Si cette valeur est comprise entre 0 et 1, elle est systématiquement arrondie à 1. Le nombre d'équipes estimé est indépendant d'une échelle à l'autre.**

**Détail par zone**

Num	Bâti à inspecter	%	Nb estimé de binômes pour l'ASR-2
8632	37	0	2
8720	36	0	2
8777	17	0	1
8841	17	0	1
8866	42	0	3
8896	22	0	1
8905	47	0	3
8910	22	0	1
8911	20	0	1
8916	21	0	1
9050	17	0	1
9057	17	0	1
9062	23	0	2
9075	27	0	2
9095	22	0	1
9126	16	0	1
9135	22	0	1
9143	20	0	1
9149	26	0	2
9158	19	0	1
9306	21	0	1
9317	27	0	2
9335	20	0	1
9337	17	0	1
9368	34	0	2
9370	29	0	2
9426	17	0	1
13584	25	0	2
13709	15	0	1
13730	18	0	1
13732	16	0	1
13742	22	0	1

**Priorisation des besoins en diagnostic bâtimentaire pour l'ASR-2 par sous-secteur.**

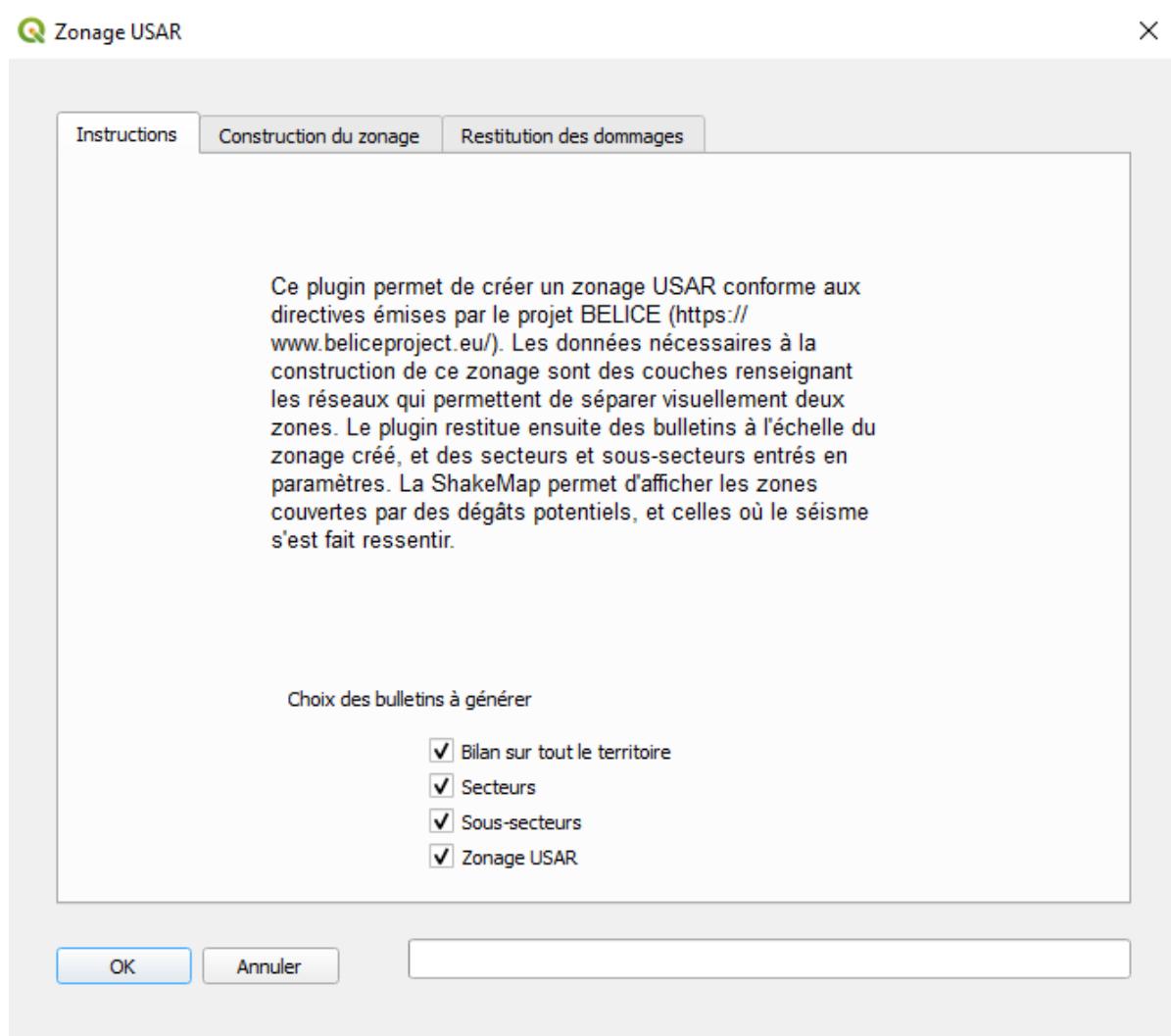
Legend for Prioritization of zones of search and rescue ASR-2:

- 1 (Red)
- 2 (Orange)
- 3 (Yellow)
- 4 (Green)

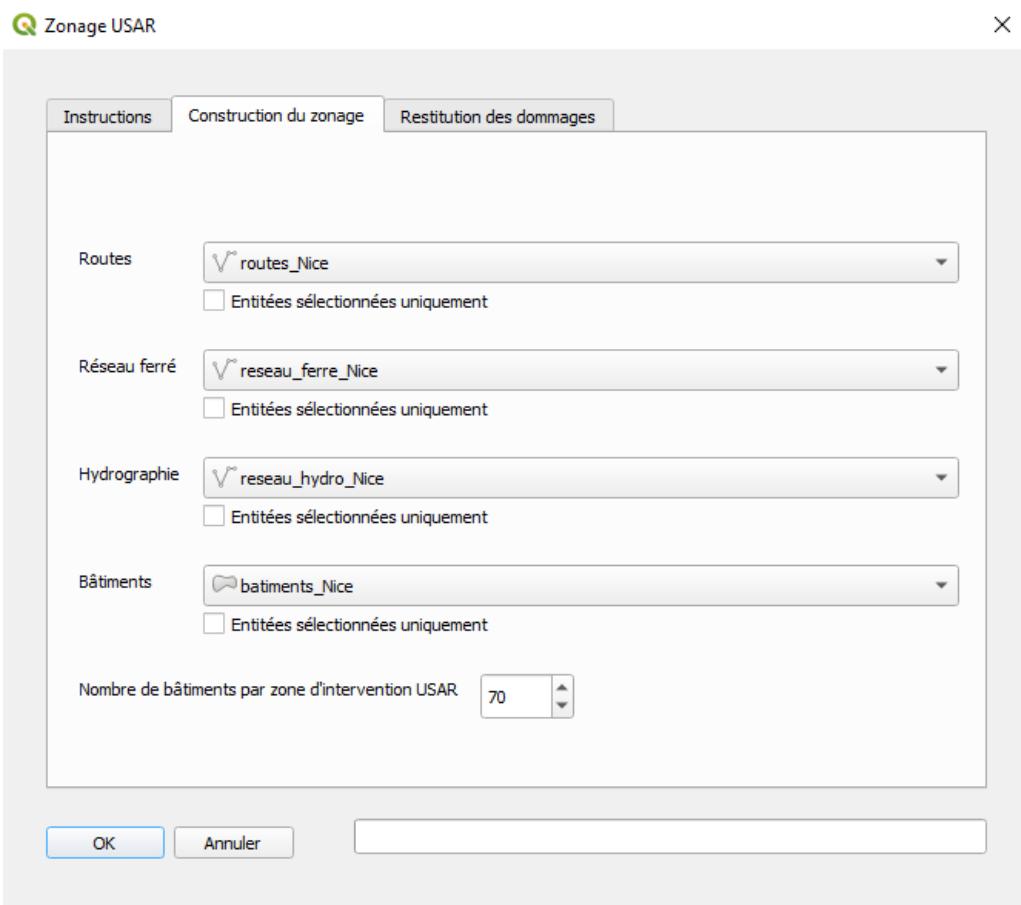
Source : modélisations du BRGM, d'après des données INSEE, IGN, OSM

Annexe B-4 - Exemple de bulletin d'estimation des dommages à l'échelle d'une zone de recherche, générée avec le plugin

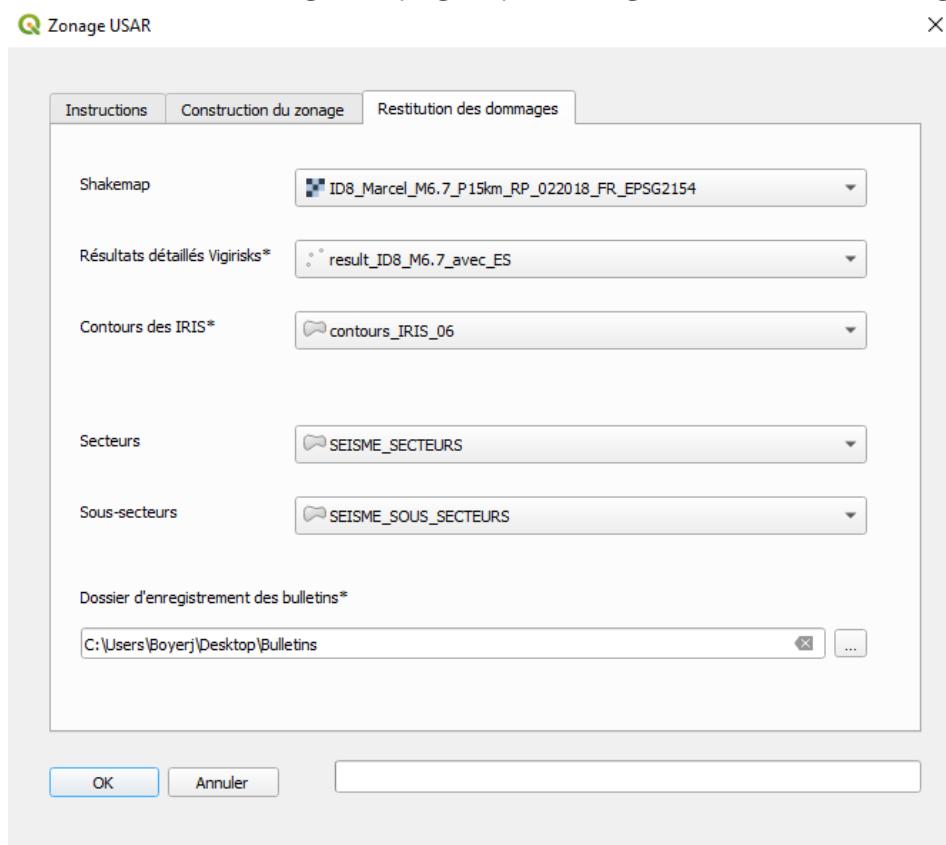
## Annexe C. Interface du plugin



Annexe C-1 – Premier onglet du plugin



Annexe C-2 – Second onglet du plugin : paramétrage de la création du zonage



Annexe C-3 – Troisième onglet du plugin : pour le calcul et la restitution de l'estimation des dommages