HAL
open science

Modélisation et raisonnement spatial flou pour l'aide à la localisation de victimes en montagne

Mattia Bunel

To cite this version:

Mattia Bunel. Modélisation et raisonnement spatial flou pour l'aide à la localisation de victimes en montagne. Géographie. Université Gustave Eiffel, 2021. Français. NNT : . tel-03298717

HAL Id: tel-03298717

https://theses.hal.science/tel-03298717

Submitted on 23 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

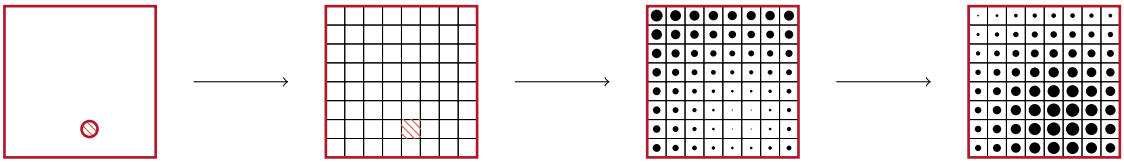
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat

Spécialité : Sciences et technologies de l'information géographique

Mattia Bunel

Modélisation et raisonnement spatial flou pour l'aide à la localisation de victimes en montagne



Soutenue publiquement le 19 février 2021 devant un jury composé de :

Mme Mireille Batton-Hubert, Professeure, École des Mines de Saint-Étienne ..... Rapportrice
Mme Sophie de Ruffray, Professeure, Université de Rouen – Normandie ..... Rapportrice
M. Thomas Devogele, Professeur, Université François Rabelais de Tours ..... Examinateur
Mme Cécile Duchêne, Enseignante-Chercheuse (HDR), IGN (Saint-Mandé) ..... Directrice de thèse
M. Olivier Favre, PGHM de Grenoble ..... Invité
M. Didier Josselin, Directeur de recherche, CNRS – UMR Espace (Avignon) ..... Président du jury
Mme Ana-Maria Olteanu-Raimond, Chargée de recherche (HDR), IGN (Saint-Mandé) ..... Directrice de thèse

Université Gustave Eiffel — École doctorale MSTIC
Institut national de l'information géographique et forestière — UMR LASTIG

Résumé

Plus de 15 000 demandes de secours en montagne sont recensées chaque année, sur le territoire français, en majorité durant les périodes estivales et hivernales. Lorsque ces demandes concernent des interventions à l'extérieur des domaines skiables, elles sont réalisées par des corps spécialisés, comme les Pelotons de Gendarmerie en Haute-Montagne (PGHM). Ces secouristes spécialisés sont chargés de l'opération de secours en tant que telle, mais également de sa préparation, ce qui implique notamment de délimiter la zone d'intervention et donc d'identifier la position de la victime. Cette étape peut s'avérer difficile, car elle nécessite que le requérant décrive le plus précisément possible sa position, malgré la fatigue, la panique ou sa méconnaissance de la région. Grace à la multiplication des téléphones dotés de GPS, des solutions de géo-localisation plus fiables et précises ont été développées, mais les secouristes doivent encore procéder fréquemment à une localisation manuelle, s'appuyant uniquement sur le discours du requérant, leurs connaissances et leur expérience.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode permettant d'assister les secouristes dans la situation où la position du requérant ne peut être identifiée que manuellement. Nous proposons de développer une méthode permettant d'identifier les zones correspondant à une description orale de position (*e.g.* « Je suis à côté d'un lac »), c'est-à-dire permettant de transformer une position exprimée dans un référentiel indirect (une description orale) en une position exprimée dans un référentiel direct, c'est-à-dire décrite par des coordonnées, qu'il est alors possible de cartographier. Le développement d'une telle méthode se heurte à de nombreux verrous scientifiques, comme la prise en compte de l'imprécision inhérente au langage naturel, de potentielles erreurs de description ou l'identification de la sémantique des prépositions utilisées pour décrire une position en milieu montagneux.

Mots clés : Géoréférencement indirect, Logique floue, Analyse spatiale, Fusion d'informations, Raisonnement spatial.

Abstract

More than 15,000 requests for mountain rescue are registered each year, in France, particularly during summer and winter. When these requests concern interventions outside of the ski resorts, they are carried out by specialised rescuers. These rescuers are responsible of the rescue operation, but also of its preparation, which involves, among other things, the delimitation of the intervention zone and the identification of the victim's position. When possible, the location of the victim can be obtained by using geo-locations applications. Nevertheless, there are cases where it is not possible (*e.g.* the victim has not a smartphone, the phone has no signal, etc.) and the rescuers have to locate manually the victims, using their knowledge and experience but also the information given by the victim. This case can be difficult, as it requires the victim to describe her/his position as accurately as possible even in condition of tiredness, panic or lack of knowledge of the region.

The objective of this thesis is to propose a method to help rescuers in the situation where the position of the victim can only be identified manually. We propose to develop a method to identify the corresponding areas of an oral description of a position (*e.g.* "I'm beside a lake"), i.e. allowing to transform a position expressed in an indirect referential (an oral description) into a position expressed in a direct reference referential, *i.e.* described by coordinates, which

can then be mapped. The development of a such a method comes up against many scientific issues, such as inherent imprecision of natural language, the inaccuracies of the potential errors in describing her/his position or identification of the semantics of the prepositions used to describe a position in mountainous environment.

Keywords : Indirect georeferencing, Fuzzy logic, Spatial analysis, Spatial reasoning.

Remerciements

Pour commencer j'aimerais remercier tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer cette thèse. Les discussions que nous avons eues lors de la soutenance ont été très enrichissantes et ont fait émerger de nombreuses pistes de réflexions sur ce travail.

Je souhaite remercier plus particulièrement mesdames Batton-Hubert et de Ruffray d'avoir également accepté d'être les rapportrices de mon manuscrit, et pour leurs remarques et retours qui m'ont été extrêmement utiles.

Je remercie également les membres de mon comité de suivi de thèse, Thomas Devogelle et Bénédicte Fruneau pour tous leurs conseils et suggestions.

Merci à Olivier Favre d'avoir accepté de participer à ce jury et pour m'avoir aiguillé durant la réalisation de ce travail. Le point de vue d'un secouriste professionnel m'a grandement aidé à proposer des solutions en cohérence avec le contexte applicatif de cette thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement Ana-Maria Olteanu-Raimond et Cécile Duchêne pour m'avoir encadré et accompagné durant cette thèse. Votre dévouement et la qualité de votre encadrement m'ont fait aimer chaque instant de notre collaboration.

Merci également à tous les membres projet de recherche Choucas pour toutes ces années de collaboration scientifique et, plus généralement, tous ceux qui auront été mes collègues durant les trois dernières années. Merci plus particulièrement à mes voisins de bureau Nathalie, Laurence, Ibrahim et Marion qui ont dû supporter mes incessantes questions.

Je souhaite également remercier ma famille et à mes amis qui ont toujours été là pour me soutenir et me changer les idées.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement Mélissa pour ses nombreuses corrections, son aide dans tous les domaines, et son soutien de chaque instant.

Table des matières

Introduction générale **1**
Organisation du manuscrit 3

I Le secours en montagne et la question du traitement de positions exprimées dans un référentiel indirect **5**

Introduction de la première partie **7**

1 Contexte applicatif et organisationnel **9**
Introduction 9
1.1 Le secours en montagne 10
1.2 Le projet de recherche Choucas 25
Conclusion 30

2 Contexte scientifique et problématique **33**
Introduction 33
2.1 Problématisation du sujet 34
2.2 Objectifs scientifiques de la thèse 36
Conclusion 45

3 État de l'art **49**
Introduction 49
3.1 *L'imprécision* et sa modélisation 50
3.2 Les *relations de localisation* et leur modélisation 79
Conclusion 99

Conclusion de la première partie **101**

II Définition d'une méthode de construction d'une *zone de localisation probable* à partir d'une description de position **103**

Introduction de la deuxième partie **105**

4 Aspects généraux de la méthode de construction de la *zone de localisation probable* **107**
Introduction 107
4.1 Identification des caractéristiques principales de la méthode 108
4.2 Formalisation des *indices des localisation* 116
4.3 Définition de la méthode 117

Conclusion 128

5 La phase de *décomposition* **129**
Introduction 129
5.1 La décomposition des *relations de localisation* 130
5.2 Définition du contenu de l'ontologie des relations de décomposition 133
Conclusion 143

6 La modélisation des *zones de localisation* **145**
Introduction 145
6.1 Critères de choix de la modélisation 146
6.2 Choix du modèle théorique 148
6.3 Choix de l'implémentation 149
Conclusion 162

7 La phase de *spatialisation* **163**
Introduction 163
7.1 Présentation générale de la méthode de *spatialisation* 164
7.2 La *rasterisation* des *objets de référence* 168
7.3 Le calcul de la *métrique* 173
7.4 La *fuzzyfication* de la *métrique* 177
7.5 Représenter des connaissances *relatives à la spatialisation* 185
Conclusion 187

8 La phase de *fusion* et la modélisation de la confiance **189**
Introduction 189
8.1 Présentation générale de la méthode de fusion 190
8.2 La prise en compte de la confiance 200
8.3 Présentation détaillé des étapes de la fusion 209
Conclusion 213

Conclusion de la deuxième partie **215**

III Applications, résultats et critiques de la méthode proposée **217**

Introduction de la troisième partie **219**

9 Résultats et analyse critique **221**
Introduction 221
9.1 Généralités sur la modélisation des alertes 222
9.2 Première alerte : Grand Veymont 226
9.3 Seconde alerte : le *fil rouge* 253
Conclusion 270

Conclusion générale **285**
Bilan des contributions 285
Perspectives 287

Annexes 293

A Légende du fond de carte topographique 295

B Définition des *relations de localisation* dans l'ontologie ORL 297

C Retranscription de l'alerte : *Grand Veymont* 303

Références 305

Liste des figures 325

Liste des tableaux 333

Introduction générale

Depuis la démocratisation de l'informatique et plus particulièrement de la cartographie sur le web, il n'a jamais été aussi facile de trouver ou de partager une position géographique. On peut désormais facilement connaître les coordonnées, dans un système de référence donné, d'un bâtiment situé à l'autre bout de la terre ou de la rue, ce qu'aucune individu ne pourrait faire. Mais les systèmes permettant une telle précision seraient bien incapables de comprendre une position telle que nous la décrivons à quelqu'un demandant son chemin (*e.g.* « Prenez la première à droite après la boulangerie », « C'est en face du stade »). Pourtant, les coordonnées, comme une description orale d'un itinéraire ou d'un endroit, décrivent tous deux la même chose : une position dans l'espace. La différence entre ces deux approches tient dans la manière dont elles décrivent une position. Les coordonnées définissent un référentiel dit « direct » alors qu'une description orale de position correspond à un référentiel indirect, où la position des objets est exprimée à travers des relations avec d'autres objets. Si l'interprétation d'une position exprimée dans un référentiel direct ne pose que peu de problèmes, une fois le référentiel connu, il n'en va pas de même pour les positions exprimées dans un référentiel indirect.

L'interprétation automatisée de telles descriptions est un sujet de recherche dynamique, puisque c'est la principale manière qu'utilisent les êtres humains pour décrire une position. De nombreux domaines peuvent bénéficier d'une interprétation automatisée de descriptions de positions, par exemple les humanités numériques, qui peuvent exploiter ces techniques pour localiser des événements ou des lieux mentionnés dans des corpus d'archives historiques. Mais de telles possibilités présentent également des intérêts hors du domaine de la recherche. Un des domaines d'application étudiés est l'assistance aux secours ; le domaine d'application de cette thèse. Les secours à la personne sont régulièrement amenés à intervenir dans des zones imparfaitement définies, notamment lorsque aucun témoin n'est capable de donner une description satisfaisante de sa position.

Cette difficulté de localisation des victimes est d'autant plus importante lorsqu'il est nécessaire de localiser des personnes perdues dans des espaces offrant peu de points de repères identifiables sans ambiguïté. C'est, par exemple, le cas pour les unités de secours en montagne (USEM), qui sont régulièrement amenées à secourir des personnes perdues ou blessées en montagne. Pour ces unités le problème de la difficulté de localisation est accentué par ces implications. Les USEM disposant de moyens humains et matériels limités, la focalisation sur une alerte peut impacter aussi bien l'opération de secours en cours, que les potentielles opérations à venir, qui pourraient être retardées.

Pour faciliter la localisation des victimes en montagne, les secouristes du PGHM de Grenoble ont développé une solution, Gend'Loc, permettant de localiser le requérant (*i.e.* la personne appelant les secours) à l'aide du GPS intégré à son téléphone portable. Cette solution a l'avantage de permettre une localisation rapide et assez facile à utiliser pour le requérant, mais elle a l'inconvénient majeur d'être dépendante du téléphone du requérant et de son bon fonctionnement. De nombreux facteurs peuvent rendre cette solution inopérante, notamment lorsque le requérant ne dispose pas d'un téléphone avec GPS, lorsque les secours sont contactés par un tiers ou lorsque la victime n'arrive pas à effectuer la manipulation nécessaire. Dans ces situations,

les secouristes n'ont d'autres choix que d'identifier la position du requérant manuellement, en recoupant les informations qui leur sont données avec leurs connaissances personnelles et les données géographiques qu'ils ont à leur disposition. Le résultat de ce processus est assez variable : si les secouristes peuvent parvenir à identifier très rapidement la position de la victime à l'aide de quelques éléments très discriminants, il est parfois difficile pour la victime de donner des informations qui soient suffisamment claires ou discriminantes pour que les secouristes puissent les interpréter. Dans ces conditions, la phase de localisation peut devenir extrêmement longue et critique.

Le projet de recherche Choucas[1] a été initié dans le but de développer des solutions permettant de faciliter le traitement de ces alertes spécifiques. L'hypothèse première de ce projet est que la géomatique et ses méthodes peuvent aider à identifier les zones correspondant aux informations données par les victimes. En effet, de nombreuses méthodes qui ont été proposées dans le domaine de la géomatique pourraient être employées à cet effet. Par exemple, les travaux autour des questions de visibilité pourraient être exploités pour identifier la position d'un requérant décrivant son champ de vision, les travaux sur la modélisation de trajectoire pourraient être utilisés pour localiser une personne indiquant qu'elle a suivi un itinéraire donné, *etc.* Un tel objectif n'est cependant pas réalisable par la « simple » concaténation de méthodes préexistantes et impose de travailler à l'étude et à l'enrichissement des données utilisables par les secouristes, de définir des solutions leur permettant d'interagir avec les solutions développées au sein du projet, d'étudier les subtilités et les spécificités des descriptions de localisation en milieux montagneux, *etc.*

Notre thèse se rattache spécifiquement à ce dernier point. Plus précisément, notre objectif est de proposer une méthode permettant de construire les zones correspondant aux descriptions de positions données par les requérants. Notre but n'est cependant pas de créer un « secouriste virtuel », réalisant l'ensemble des tâches effectuées manuellement par ces derniers et interprétant automatiquement le discours du requérant, mais de proposer une méthode d'assistance, facilitant l'identification des zones correspondant à une description de position.

Cet objectif induit de nombreuses difficultés, la première d'entre elles étant la taille de l'espace des possibles. Une personne décrivant sa position peut être amenée à utiliser de nombreux éléments, parfois très différents, comme son itinéraire, sa position de départ, son objectif visé, décrire son champ de vision, *etc.* L'identification de la position du requérant impose donc d'être en capacité de pouvoir interpréter une majorité, sinon toutes les informations qu'elle donne. De plus, nous devons être en mesure de combiner ces différentes informations, de manière à identifier la position qu'elles décrivent conjointement.

La seconde difficulté est d'être en capacité d'interpréter les concepts utilisés dans leur discours par les requérants. Si nous ne cherchons pas à interpréter directement le discours du secouriste, celui-ci décrit sa position en employant des concepts issus du langage naturel (*e.g.* « à côté de », « en face de », *etc.*). Or, ces derniers peuvent voir leur signification varier en fonction du contexte, de l'objet auquel ils se réfèrent, *etc.* Nous devons donc être en capacité d'identifier les différents sens que peuvent avoir ces concepts et identifier les situations dans lesquelles ils sont utilisés. Par ailleurs, ces concepts peuvent voir leur signification impactée par le fait que notre cas d'application soit spécifique au milieu montagneux.

Un autre problème lié à l'interprétation de ces concepts est qu'ils peuvent être vagues. Il est, par exemple, difficile de fixer la limite entre ce qui est proche et ce qui est éloigné, et l'on peut s'attendre a ce que deux personnes n'aient pas exactement la même utilisation de ces concepts.

1. Projet ANR-16-CE23-0018.

L'identification de la zone correspondant à une description de position ne nécessite donc pas que d'interpréter correctement les concepts utilisés, mais également de prendre en compte leur imprécision.

Indépendamment de leur imprécision, les informations données par les victimes peuvent également êtres faussées. Il est par exemple possible qu'elles se trompent dans le nom d'un point leur servant de reprère ou qu'elles fassent des confusions. Lorsque ces erreurs sont manifestes, le secouriste peut les identifier et les corriger, mais ce n'est pas toujours possible. Il est donc nécessaire de proposer une méthode qui puisse tenir compte de la fiabilité variable des informations données.

Organisation du manuscrit

Notre mémoire de thèse est organisé en trois parties, totalisant neufs chapitres. Dans la Partie I, nous présenterons le cadre général dans lequel notre travail s'inscrit. Le premier chapitre sera dédié à la présentation du contexte applicatif et organisationnel de cette thèse. Nous détaillerons le rôle et le fonctionnement des secours en montagne, les problèmes soulevés par la localisation des victimes et la manière dont le projet CHOUCAS souhaite y répondre. Le second chapitre est destiné à présenter le contexte de scientifique et la problématisation de notre thèse. Enfin, dans le troisième chapitre, nous dresserons un état de l'art sur les questions principales de ce travail.

La Partie II est destinée à présenter notre méthode de transformation des positions exprimées dans un référentiel indirect en des zones de localisation. Elle est constituée de cinq chapitres. Le premier chapitre de cette partie présente l'organisation générale de notre méthode (chapitre 4). Les chapitres suivants approfondissent des points spécifiques de cette méthode. Dans le chapitre 5, nous détaillerons le fonctionnement de la première phase de la méthode, *la décomposition.* Le chapitre 6 sera quant à lui consacré à la définition d'un modèle permettant la représentation d'objets géographiques imprécis, tels que ceux produits par notre méthode. Dans le chapitre 7, nous présenterons la seconde phase de notre méthode, *la spatialisation.* Le dernier chapitre de cette seconde partie sera consacré à la présentation de la dernière phase de notre méthode, la *fusion.*

Enfin, la Partie III de ce manuscrit présente l'application de la méthode définie à plusieurs alertes réelles. Cette partie ne contient qu'un seul chapitre, le neuvième, où notre méthode est appliquée à la modélisation de deux alertes réelles. Nous y détaillerons la mise en œuvre de notre méthode sur ces alertes et analyserons les résultats obtenus.

Pour finir, nous conclurons classiquement ce manuscrit par un bilan des contributions et des perspectives.

Première partie

Le secours en montagne et la question du traitement de positions exprimées dans un référentiel indirect

Introduction de la première partie

> « Je me suis toujours senti extrêmement fragile face aux éléments : d'un côté, un squelette avec de la chair autour ; de l'autre, les forces auxquelles on se frotte, le rocher, la glace, la tempête. »
>
> — Walter Bonatti

La première partie de cette thèse de doctorat se destine à en présenter le cadre applicatif, scientifique et théorique et à en définir la problématique. Pour ce faire, nous commencerons par présenter la mission régalienne du secours en montagne et leur organisation. Puis nous détaillerons les difficultés auxquelles les *unités de secours en montagne* (USEM) sont confrontées, notamment lors de la phase de localisation des victimes en montagne. Nous présenterons également le projet de recherche dans lequel notre travail s'inscrit, son origine et ses objectifs scientifiques (chapitre 1). Le second chapitre se destine à définir précisément notre sujet de recherche. Nous formaliserons la problématique de notre thèse, en définirons les concepts essentiels, en détaillerons les objectifs scientifiques et présenterons la manière dont ils s'inscrivent dans le contexte scientifique et dans le projet de recherche Choucas (chapitre 2). Enfin, le troisième et dernier chapitre de cette partie dressera un état de l'art détaillé sur les deux domaines scientifiques au centre de notre travail de thèse, la modélisation de l'imprécision et la spatialisation des *relations de localisation* (chapitre 3).

Chapitre 1

Contexte applicatif et organisationnel

Introduction 9
1.1 Le secours en montagne 10
1.1.1 Organisations passées et présentes du secours en montagne français . . . 10
1.1.1.1 De la solidarité montagnarde à la mission régalienne 10
1.1.1.2 L'organisation contemporaine du secours en montagne français 15
1.1.2 La phase de localisation des victimes 20
1.1.2.1 L'identification manuelle de la position des victimes 20
1.1.2.2 L'identification assistée de la position des victimes 21
1.1.2.3 Les limites des méthodes de localisation des victimes 23
1.2 Le projet de recherche Choucas 25
1.2.1 Origine du projet 25
1.2.2 Problématique du projet 26
1.2.3 Objectifs scientifiques du projet 28
1.2.3.1 Structuration des données issues de sources textuelles hétérogènes 28
1.2.3.2 Raisonnement spatial qualitatif flou 28
1.2.3.3 Géovisualisation de données multidimensionnelles et imparfaites pour la prise de décision 29
1.2.3.4 Intégration de sources hétérogènes spatialisables 29
Conclusion 30

Introduction

Comme nous l'expliquions en introduction, cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche pluridisciplinaire dont l'objectif principal est de développer des méthodes et des outils facilitant la localisation de personnes blessées ou perdues en montagne. Notre travail de recherche s'inscrit donc à la fois dans le contexte métier du secours en montagne et dans le contexte organisationnel du projet de recherche Choucas.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter ces deux contextes et leurs spécificités pour permettre au lecteur d'appréhender au mieux ce travail doctoral. La présentation du secours en montagne proposée ici a pour but de présenter son fonctionnement, son organisation actuelle et l'historique de cette activité, mais aussi de décrire la méthode de localisation des victimes utilisée par les secouristes. La présentation du projet de recherche Choucas, insistera, quant à elle, sur les différents objectifs scientifiques du projet et leurs interactions. Cela nous permettra

de distinguer les questions qui seront abordées dans notre thèse de celles qui ne le seront pas, car rattachées à d'autres objectifs de recherche.

Dans la première partie de ce chapitre nous présenterons les secours en montagne et leur organisation. Puis, dans un second temps, nous aborderons la question de l'inscription de cette thèse au sein du projet de recherche Choucas.

1.1 Le secours en montagne

L'objectif de cette première partie est de présenter le contexte métier dans lequel notre thèse s'inscrit, celui du secours en montagne. Nous commencerons par présenter l'organisation de ce service public puis nous nous focaliserons sur la question de la localisation des victimes en montagne, question au centre de notre travail de recherche.

1.1.1 Organisations passées et présentes du secours en montagne français

1.1.1.1 De la solidarité montagnarde à la mission régalienne

L'organisation et le fonctionnement des *secours en montagne* contemporains sont fortement influencés par les structures et les organisations qui les ont précédés. C'est pourquoi il nous a semblé nécessaire de revenir sur l'histoire de ces dernières, afin de décrire la longue mise en place des *secours en montagne* français. Notre objectif n'est évidemment pas d'entreprendre un travail d'historien, très éloigné de nos compétences et de l'objet de cette thèse, mais d'apporter un éclairage, que nous souhaitons le plus complet possible, sur ce service public [1].

Le « proto-secours » en montagne

Si l'histoire du secours en montagne est intimement liée à celle de l'alpinisme et, plus généralement, du tourisme montagnard, on ne saurait l'y réduire. La présence humaine en milieu montagneux, bien qu'impactée par ces activités, y est bien antérieure, et les montagnes jouent, depuis longtemps, aussi bien le rôle de refuges, que de points de passage, de « synapses » (Brunet et al. 1992, p. 337). De fait, les massifs montagneux et notamment les Alpes sont parcourus depuis l'Antiquité et les marchands ou voyageurs en périls sont secourus par les habitants de ces vallées reculées (Mézin 2016).

Cependant, cette forme d'assistance est bien différente du secours en montagne contemporain, d'une part, car les *espaces concernés* sont différents. La haute montagne est, jusqu'au XIXe siècle, *terra incognita,* et ni les voyageurs, ni les locaux ne s'y aventurent. Les secours ne se déroulent donc que le long d'itinéraires traversants et non sur des arêtes effilées ou à flanc de parois exposées. D'autre part, il n'existe aucune forme d'organisation pérenne, les caravanes de secours se forment selon les nécessités et sur la base du volontariat.

Le champ d'action du secours en montagne change avec l'émergence du nouveau divertissement « [d]es grands bourgeois britanniques » (Descamps 2018) : l'alpinisme. L'objectif n'est plus de fuir les massifs les plus denses et les pentes les plus abruptes, mais de les approcher. La difficulté des secours augmente avec l'ambition des ascensions, mais ils sont toujours effectués par des volontaires, comme des guides locaux [2] ou des alpinistes présents sur place,

1. Les événements principaux décrits dans cette partie sont synthétisés par la figure 1.1, page 15.
2. La première des compagnies de guide est créée en 1821 à Chamonix. Il s'agit de la seule compagnie de guides créée avant 1850 (Contributeurs Wikipédia 2020c).

ultérieurement soutenus par les militaires des régiments alpins [3].

Toutefois, l'organisation de ce « proto-secours » en montagne n'est pas exempte de problèmes. Dans le récit d'une opération de secours publié en 1911, Thomas (1911) met en évidence le fait que, sous couvert de solidarité, les motivations des volontaires sont également pécuniaires, ces derniers étant discrètement dédommagés par la victime ou, lorsque les secours n'ont pu aboutir, par sa famille. Cette forme de rémunération, couplée à l'absence d'une institution organisatrice, favorise, selon Thomas (1911), la multiplication de caravanes concurrentes, ce qui favorise les interventions peu préparées et la prise de risque, rendant les secours plus dangereux et moins efficaces. Thomas (1911) conclut son propos par un appel à la rationalisation des secours. Il conseille de recourir à des petits groupes de secouristes préparés et entrainés, plutôt qu'à des caravanes organisées à la hâte et composées de dizaines de volontaires.

Ce problème sera, en partie, résolu avec le développement de regroupements de secouristes, centralisant la prise de décision : les *comité de secours.* Le premier d'entre eux, *les sauveteurs volontaires du Salève,* apparaît en 1897 dans les Pré-Alpes (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020), 14 ans avant l'article de Thomas. Mais cette initiative sera reprise bien plus tardivement dans d'autres régions. Caille (2016) explique cette précocité par la forte pression touristique subie par la région à la fin du xixe siècle. Le second comité de secours en montagne est créé à Grenoble en 1910 (Caille 2016 ; Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020). Quant à la majorité de ces structures, elles voient le jour au tournant des années 1930, avec, notamment, la création d'un comité de secours à Annecy en 1928, à Chamonix en 1929, à Briançon en 1932 ou à Pau en 1936 (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020 ; Devies 1946).

Cette organisation des secours, basée sur l'action de comités locaux et sans réelle coordination entre massifs, perdure jusqu'à l'après-guerre. Durant cette période, l'armée est la seule institution publique à participer activement aux secours en montagne. Son action va même en se renforçant, notamment par le support direct (personnels) et indirect (développement de matériel, formation) de *l'école de haute montagne* (EHM) créée en 1932 à Chamonix (Mézin 2016).

Cependant, Devies (1946) remet en cause cette organisation dès 1946. De son point de vue, les différents comités locaux sont une solution bien insuffisante aux problèmes du secours en montagne, notamment comparé aux solutions mises en place en Suisse ou en Autriche. Devies prône une centralisation de l'organisation des secours, par le biais d'une institution chapeautant les différents comités locaux et subventionnée par l'État.

Le début d'une organisation nationale

Les propositions de Devies aboutissent en 1947, lorsqu'il prend la tête de la nouvelle commission de secours de la Fédération française de montagne (FFM) [4]. L'objectif de cette nouvelle institution est, comme il le proposait en 1946, de fédérer les différents comités locaux pour proposer des réponses plus efficaces aux situations de crise. Cette organisation permet la mise en place de secours d'envergure, comme en 1948, lorsqu'une centaine de secouristes participent au sauvetage de deux alpinistes coincés dans la face sud, d'une verticalité extrême, du Pavé dans le massif des Écrins (Romanaz 2018) ou en 1949 lors du sauvetage de l'Olan (Mollaret 1993). Cette commission dirigea également les secours lors des crashs du *Canadian Pilgrim* sur l'Obiou et du *Malabar Princess* sur le mont-Blanc en 1950 (Centre Fédéral de Documentation

3. Les régiments alpins sont créés en 1888 (Mézin 2016).
4. La FFM est officiellement créée deux ans plus tôt, en 1945.

Lucien Devies 2020 ; Mollaret 1993 ; Societe Dauphinoise de Secours en Montagne 2013).

Cependant, cette organisation semi-professionnelle montre rapidement ses limites, principalement à cause de difficultés de financement [5], de recrutement, mais également à cause de la hausse de fréquentation des massifs alpins (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020). Mais c'est en 1956, avec *l'affaire Vincendon et Henry,* que les autorités prirent conscience des limites de cette organisation bénévole des secours en montagne.

Le 22 décembre 1956 deux étudiants passionnés d'alpinisme, Jean Vincendon et François Henry, entament l'ascension du mont Blanc (Ballu 1997). Les deux hommes cherchent l'exploit, à une époque où l'alpinisme hivernal est encore balbutiant. Ils décident cependant de redescendre vers Chamonix et d'abandonner leur ascension le 24, par crainte du mauvais temps à venir. Cependant, leur rencontre avec la cordée du guide italien Walter Bonatti, déjà auréolé d'ascensions notables comme la première du K2 en 1954 [6] ou l'ouverture en solitaire d'une voie dans la face sud-ouest des Drus en 1955 [7], les incite à reprendre l'ascension. Les deux cordées, fidèles à leur itinéraire initial, se séparent le lendemain. Bien qu'empruntant des itinéraires distincts, les deux groupes se font surprendre par la nuit et bivouaquent sous la tempête. Le lendemain, Bonatti et son client atteignent le refuge Vallot, alors que Vincendon et Henry, épuisés, prennent la décision de descendre directement. Lors de la descente, les deux alpinistes se perdent et se retrouvent coincés sur une vire. Exténués et surchargés de matériel, ils sont incapables de rebrousser chemin et passent une seconde nuit dehors.

Dans la vallée, les secours, prévenus dès le 25 décembre par un proche, tardent à se mettre en place. La société chamoniarde de secours en montagne, regroupant l'EHM, la compagnie des guides de Chamonix et l'école nationale de ski alpin, n'arrive pas à organiser une opération de secours, les guides refusant de s'aventurer en haute montagne en plein hiver et en pleine tempête. C'est finalement l'EHM qui prend la direction des secours. Un premier hélicoptère militaire est envoyé le 27 décembre, sans résultat, mais les alpinistes sont repérés, à la longue-vue, un peu plus tard. La configuration spatiale de l'événement favorise l'effervescence médiatique, les accidentés étant visibles depuis Chamonix. De nombreux médias nationaux, tels que la radio *Europe 1,* nouvellement créée, commencent à couvrir l'événement, et les secouristes doivent opérer sous une pression médiatique alors inédite.

Les victimes ayant été localisées, une opération de secours héliportée est organisée le 28 décembre. Mais l'utilisation d'un appareil inadapté au vol en montagne rend l'approche impossible. Le pilote indique aux alpinistes de se rapprocher d'un plateau, situé en amont, seul endroit où un atterrissage est envisageable. Cependant, la météo empêche tout nouveau vol et le directeur de l'EHM, commandant de fait des opérations, refuse de risquer de nouvelles vies en envoyant une caravane terrestre en pleine tempête. C'est finalement le 31 décembre qu'un nouveau vol sera possible. Les deux alpinistes sont rejoints par un hélicoptère de l'armée, qui s'écrase lors de son atterrissage. Les deux pilotes sont grièvement blessés. Les deux secouristes présents mettent alors Vincendon et Henry à l'abri, dans la carcasse de l'hélicoptère, et prennent la décision de remonter en priorité les pilotes au refuge Vallot, avant de redescendre,

5. Problème que Devies avait déjà soulevé dans son article de 1946 (Devies 1946)

6. Bonatti ne fera cependant pas partie des deux alpinistes ayant atteint le sommet (Contributeurs Wikipédia 2020a).

7. Cette ascension n'est pas la première de la face ouest des Drus, celle-ci ayant été effectuée trois ans auparavant (Contributeurs Wikipédia 2020b). Cependant l'ouverture en solitaire par Bonatti d'une voie au centre de la paroi et considérablement plus exposée est considérée comme l'une des plus importantes réalisations de l'alpinisme, qualifiée « [d']exploit magnifique et inspiré » par Robbins (2000).

le lendemain, pour secourir les deux alpinistes. Cependant, les quatre hommes restent au refuge jusqu'à leur évacuation, le 3 janvier. Ne constatant plus aucun signe de vie, le commandant des opérations décide alors d'abandonner les recherches.

Cette affaire, qui fut un véritable choc pour l'opinion publique, marqua un point de rupture dans la conception française du secours en montagne. Le système de secours basé sur le volontariat avait montré ses limites et fut rapidement remplacé par un système géré par l'État (Ballu 1997).

Le secours en montagne comme service public

> « Il a fallu le spectacle de guides professionnels chamoniards qui laissèrent périr deux jeunes étudiants en perdition faute d'avoir pu s'organiser pour que l'État décide de mettre en place ses propres services [...] » (Descamps 2018)

C'est à partir de 1958, après le choc de *l'affaire Vincendon et Henry,* que les services publics de secours en montagne se mettront en place. Les gendarmes et policiers, auparavant participants occasionnels à des opérations de secours (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020 ; Mollaret 2016), en sont officiellement chargés par la circulaire interministérielle du 21 août 1958 [8]. Deux unités spécialisées dans le secours en montagne sont alors créées, le PGHM [9] et la CRS Montagne (Halle et al. 2007). La formation de ces premiers professionnels du secours en montagne est alors assurée par deux institutions pré-existantes : l'EHM qui a formé les premiers membres du PGHM et le CENAS fondé en 1955, qui forma les premiers membres de la CRS Montagne (Mézin 2016). La mise en place de cette nouvelle organisation des secours ne se fait pas sans heurts, notamment dans la région de Chamonix où la compagnie des Guides et l'EHM tentent de conserver la primauté des opérations de secours (Chandellier 2016).

L'action des deux nouveaux corps de secouristes est régulée au niveau local par des dispositions spécifiques définies dans les plans ORSEC. Ces derniers, préexistants, ont été étendus aux secours en montagne. Dans le département de l'Isère, par exemple, est mis en place, dès 1958, un régime d'alternance. La CRS Montagne et le PGHM sont chargés des secours une semaine sur deux, ce qui permet d'alterner astreinte et entrainement ou repos. Ce régime est par la suite étendu à la majorité des départements alpins, même si de nombreuses spécificités locales existent (Halle et al. 2007). À partir de 1985, un nouveau corps de secours en montagne fait son apparition, les GRIMP, un groupe d'intervention de pompiers spécialisé dans les milieux périlleux (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020). Les modalités de cohabitation entre ces trois corps changent en fonction des départements et des plans ORSEC. Cette cohabitation entre trois corps distincts a cependant pu créer des situations conflictuelles par le passé (Ganser et al. 2012 ; Soulé et al. 2002).

À la faveur de la professionnalisation, les techniques et méthodes de secours en montagne vont connaître une rapide évolution. L'utilisation de l'outil héliporté, maladroite lors de *l'affaire Viencendon et Henry,* est considérablement perfectionnée au cours des années 1960, notamment grâce à l'introduction de l'*Alouette III* en 1962, un hélicoptère parfaitement adapté au vol en montagne, qui fut utilisé jusqu'en 2009 (Elie et al. 2006 ; Lafond 2011b, p. d.). L'utilisation de cet outil va évoluer avec le développement de solutions techniques, telles que le treuil, remplaçant avantageusement les échelles de cordes suspendues sous le fuselage. Cet outil, introduit en

8. Circulaire n° 1272 du 21 août 1958 relative à la mise en œuvre du secours en montagne.
9. Alors le Groupe Spécialisé en Haute-montagne

1965 et utilisé pour la première fois en 1967 lors d'un sauvetage au Grépon (Lafond 2011a), permet dans un premier temps de treuiller des civières, évitant à l'hélicoptère de se poser. Plus tard, des utilisations plus ambitieuses sont envisagées, comme en 1972 lorsqu'un équipage évacue deux alpinistes en difficulté sur la face ouest des Drus (Ministère de l'Intérieur 2013). L'outil héliporté se révèle d'une efficacité remarquable et dès 1972 l'ensemble des zones montagneuses françaises sont à portée d'hélicoptère (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020). Les secours héliportés occupent une place de plus en plus importante dans les opérations de secours en montagne, passant de 50 % des 420 secours de 1965 (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020) à plus de 90 % des secours aujourd'hui (Halle et al. 2007).

Une autre avancée majeure permise par la professionnalisation des secours a été leur médicalisation. Si des alpinistes-médecins ont pu participer aux secours en tant que volontaires, c'est dans le courant des années 1970, avec la création des SAMU (Halle et al. 2007), que la médicalisation des secours s'organise. C'est à cette période qu'apparaissent les premières permanences médicales bénévoles, comme celle mise en place en Isère en 1971 (Rocourt 2014). Parallèlement, l'armée apporte son soutien à la médecine de montagne, en détachant auprès des hôpitaux public des médecins issus des régiments alpins. C'est cependant à partir des années 1980 que la présence des médecins dans les équipages se généralise (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020). Notamment sous l'impulsion de l'article 2 de la loi de 1986 relative à l'aide médicale d'urgence [10] (Rocourt 2014), qui précise que le rôle de l'aide médicale d'urgence est « [d']assurer aux malades […] en quelque endroit qu'ils se trouvent, les soins d'urgence appropriés à leur état. » Aujourd'hui, depuis le désengagement de l'armée en 1992, la médicalisation des secours en montagne est entièrement gérée par le SAMU ou directement par les pompiers si ce sont ces derniers qui interviennent (Halle et al. 2007 ; Rocourt 2014).

Un autre aspect important induit par la professionnalisation des secours est leur gratuité. Les frais d'interventions des PGHM, des CRS Montagne ou des pompiers ne sont pas facturés aux victimes. Ce n'est cependant pas le cas des soins hospitaliers ou pré-hospitaliers liés au secours, qui eux sont facturés, comme toute intervention du SAMU. La gratuité des opérations de secours a cependant souvent été discutée ou nuancée (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020 ; Halle et al. 2007 ; Magne 2017). Notamment par la loi, Montagne, de 1985, qui autorise les communes à déléguer les opérations de secours sur domaine skiable à des structures privées et à demander le remboursement des frais de secours aux victimes. Cependant, la circulaire du 22 septembre 1987, limite cette disposition à seulement deux activités, le ski alpin et le ski de fond. Cette limitation a toutefois été retirée en 2002 [11] (Magne 2017). Cet événement a été interprété par les professionnels comme une remise en cause du principe de gratuité des secours, ce qui a été infirmé par Michèle Alliot-Marie en 2007, alors ministre de l'Intérieur : « La gratuité des secours est l'un des grands principes de solidarité de la vie en montagne » (Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies 2020).

Les dernières modifications conséquentes à l'organisation des secours en montagne français seront faites en 2011 par la circulaire dite Kihl [12, 13]. Cette dernière vise à rationaliser l'orga-

10. L'ordonnance n° 2000-548 du 15 juin 2000 abroge les articles 1 et 2 de la loi n° 86–11 et crée les articles L6311-1 et L6311-2 du code de la santé public de contenu identique.

11. Loi n° 2002-276, relative a la démocratie de proximité.

12. Circulaire du 6 juin 2011 relative aux orientations générales pour la mise en œuvre des moyens publics concourant au secours en montagne et sa formalisation dans le cadre d'une disposition spécifique ORSEC.

13. Cette circulaire abroge la circulaire interministérielle d'aout 1958 (cf. note 8), jusqu'ici texte de référence.

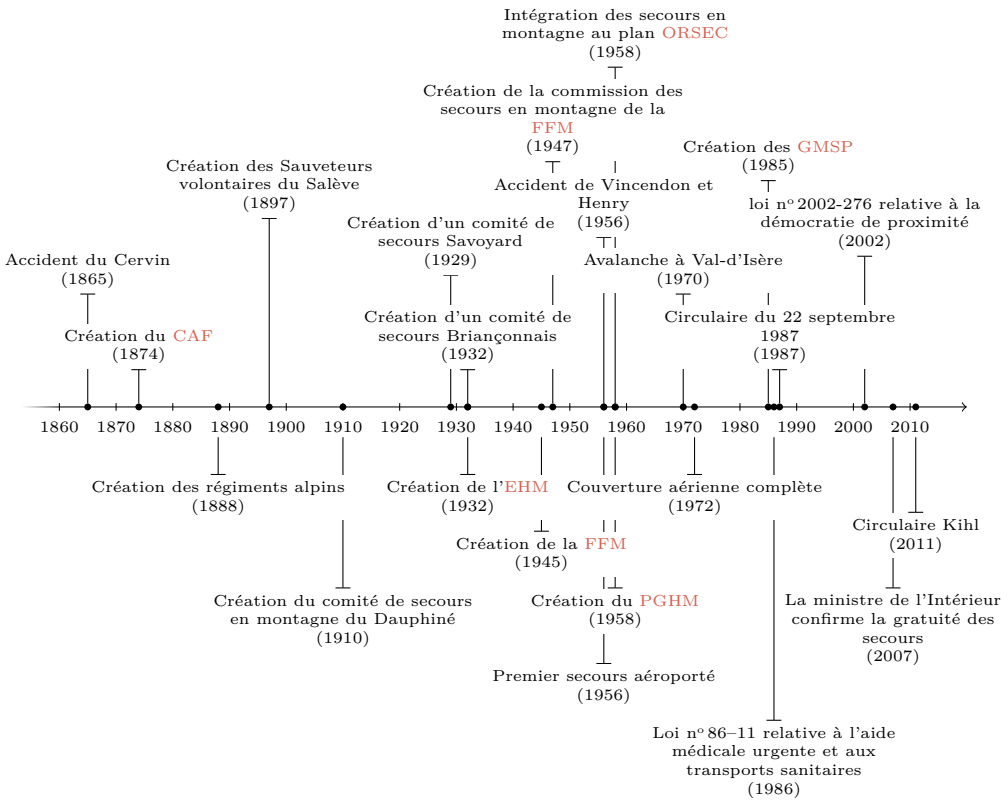


FIGURE 1.1 – Chronologie des principaux événements relatifs à l'histoire française des secours en montagne.

nisation nationale des secours en montagne, notamment en clarifiant les « [...] modalités d[e] coopération normée entre les différentes entités [...] » [14], lesquelles avaient été fortement impactées par l'arrivée des pompiers dans le secours en montagne. Cette circulaire est aujourd'hui le texte de référence quant à l'organisation du secours en montagne.

1.1.1.2 L'organisation contemporaine du secours en montagne français

Si la professionnalisation des secours a permis la mise en place d'un système nettement plus efficace et abouti que ses équivalents historiques, ce système n'en demeure pas moins complexe. D'une part car, tout du moins à l'échelle nationale, il mobilise de nombreux acteurs, rattachés à des administrations différentes mais qui doivent souvent s'acquitter d'une même tâche. D'autre part, car on y retrouve de nombreuses spécificités locales, parfois très importantes, la législation laissant une grande latitude aux préfets quant à l'organisation des secours en montagne. Une présentation du fonctionnement actuel du secours en montagne ne peut donc ignorer ces deux aspects. C'est pourquoi nous commencerons par en présenter les points structurants à l'échelle nationale, avant de présenter les différences départementales. Puis, nous nous attarderons sur le cas de l'Isère, département au centre de ce travail de recherche.

14. *Avant-propos,* pages 2-3 de la circulaire KHIL (cf. note 12).

Échelle nationale

Comme nous l'expliquions précédemment (1.1.1.1), l'organisation des secours en montagne est régulée par les plans ORSEC, dont l'élaboration et l'application est à la charge des préfets de département. Les préfets de département jouent un rôle essentiel dans les secours, car en plus d'être chargés de leur organisation, ils sont également désignés *directeurs des opérations de secours* en montagne (DOS) de leur département. Ce statut ne leur impose pas de participer *directement* aux opérations de secours. Leur conduite incombe au *commandant des opérations de secours* (COS), dont le processus de désignation change en fonction de *la nature de l'opération.*

Les *opérations simples* de secours en montagne sont les plus fréquentes. Il s'agit d'interventions effectuées dans un temps court, un espace peu étendu et n'impliquant que peu de secouristes. Leur commandement est assuré par un *chef de caravane* (CC), qui est nécessairement un secouriste de *l'unité de secours* d'astreinte, présent sur le terrain lors de l'opération de secours. Il s'agit généralement du secouriste le plus expérimenté, qui agit alors sous la responsabilité du chef de son unité.

Lorsqu'une opération de secours prend plus d'ampleur, elle est qualifiée *d'opération complexe.* Ces opérations nécessitent une coordination entre de nombreux acteurs et peuvent se dérouler sur des durées plus importantes que les *opération simple.* Dans ce cas, le COS est directement désigné par le préfet « à partir d'une liste annuelle de cadres issus des unités spécialisées ou détenteurs des compétences spécifiques [...] » [15]. Dans les faits, cette fonction est souvent assurée par le commandant de l'USEM d'astreinte.

Enfin, une opération est qualifiée *d'envergure* lorsqu'elle est d'une importance et d'une complexité telles que le secours en montagne n'en est qu'une composante parmi d'autres. Dans ce cas, c'est le *directeur départemental des services d'incendies et de secours* (DDSIS) qui prend la fonction de COS. Il est alors assisté d'un *chef d'opérations montagne,* responsable de cette partie spécifique de l'opération de secours. Le Tableau 1.1 dresse une synthèse des différentes personnes participant aux opérations de secours.

C'est également au niveau national que sont fixés les domaines d'intervention des USEM. La législation distingue deux espaces différents d'intervention, le *domaine montagne* et les *domaines skiables.* Les seconds sont placés sous la responsabilité des maires, qui, comme nous l'avons déjà indiqué (1.1.1.1), ont la liberté de déléguer les secours à des opérateurs privés, généralement l'exploitant de la station. Le rôle des USEM est d'assurer le secours en *domaine montagne,* ce qui n'exclut pas des interventions dans les *domaines skiables* en cas de nécessité [16].

La législation fait des CODIS de chaque département le point central du traitement des alertes. Ces structures ont à charge la gestion des appels et la coordination des acteurs du secours. Par conséquent, chaque appel de demande d'assistance en montagne fait auprès d'un autre opérateur que le CODIS départemental [17], comme le SAMU ou les USEM [18], est systématiquement transféré au CODIS.

C'est aux CODIS de définir si la demande d'assistance s'inscrit dans le cadre des secours en montagne et ce en fonction des règles fixées dans le département. Si les CODIS centralisent la gestion des alertes, il ne leur incombe pas de prendre unilatéralement les décisions quant à la

15. Section 4.2 page 8 de la circulaire Khil (cf. note 12).
16. Qu'il revient au préfet de définir.
17. C'est-à-dire si le numéro d'urgence composé n'est ni le 112, ni le 18.
18. Les permanences des USEM possèdent des numéros à dix chiffres qui sont parfois utilisés pour contacter les secours. Leur usage est cependant fortement déconseillé, leur validité n'étant que locale.

Hiérarchie fonctionelle	Acteurs
À distance — DOS	Quelle que soit la nature de l'opération, le *préfet* est toujours le DOS
À distance — COS	CC, commandant de l'USEM ou DDSIS, en fonction de la nature de l'opération
Sur le terrain — CC	Secouriste *le plus expérimenté* participant à l'opération
Sur le terrain — Secouristes	USEM désignée par le plan ORSEC. Potentiellement renforcée si l'opération le nécessite
Sur le terrain — Médecin	SAMU — uniquement si le centre 15 a décidé de médicaliser le secours — ou pompiers — si l'USEM est un GRIMP —
Sur le terrain — Pilote	FAG ou GHSC en fonction des départements, uniquement si l'hélicoptère est nécessaire
Sur le terrain — Équipage	

Table 1.1 – Synthèse des acteurs participant aux opérations de secours.

gestion des opérations de secours. En effet, le cadre légal leur impose, dès lors que l'opération a été qualifiée de *secours en montagne,* de mettre en place une conférence avec tous les acteurs concernés par ce type d'opération. La décision de la médicalisation est à la charge du SAMU et celle de l'engagement des moyens héliportés est prise collectivement.

Spécificités locales

Chaque département pouvant organiser les secours avec une certaine latitude, on retrouve quelques spécificités départementales. La principale différence entre les départements sont les unités qui participent aux secours. La plupart des départements alpins ont recours a un système d'alternance hebdomadaire (Tableau 1.2). Ce système n'est pas nécessairement appliqué dans l'ensemble du département. Dans les Hautes-Alpes par exemple, trois cas spécifiques sont définis. Si le secours a lieu en zone de haute montagne ou de moyenne montagne accessible uniquement par hélicoptère, le secours est à la charge de l'USEM de permanence, située à Briançon. Dans le cas où la victime est dans une zone de moyenne montagne facilement accessible, le secours est à la charge du GMSP de Gap. Cette organisation permet d'adapter le dispositif d'intervention à la topographie du département, les zones de haute montagne étant principalement situées dans le briançonnais, au nord-est du département. D'autres départements ont des organisations particulières. Dans les Alpes-de-Haute-Provence par exemple, le secours en montagne est à la charge seule du PGHM de Jausiers. Enfin, pour des raisons historiques, le département de la Haute-Savoie est organisé suivant un régime unique. Dans la majorité du département, les secours sont réalisés par une équipe mixte, toujours composée de secouristes du PGHM et de pompiers du GMSP. Mais les secours dans le massif du Mont-Blanc, où les

Départements	Organisation
Hautes-Alpes (05), Alpes-Maritimes (06), Isère (38), Savoie (73)	Alternance hebdomadaire CRS Montagne, PGHM
Alpes-de-Haute-Provence (04)	PGHM uniquement
Haute-Savoie (74)	Collaboration PGHM, GMSP, sauf dans dans le massif du Mont-Blanc (PGHM uniquement)

Table 1.2 – Corps mobilisés pour le secours en montagne dans les départements alpins.

secours sont à la charge seule du PGHM, acteur historique des secours dans le département (Boillot 2017 ; Halle et al. 2007).

Une autre différence notable entre les départements est la nature des moyens héliportés à la disposition des secouristes. Pour des raisons historiques, les appareils destinés au secours en montagne sont répartis entre deux acteurs, la *sécurité civile* par le biais de son *groupement hélicoptère* (GHSC) et la *gendarmerie* par le biais de sa *force aérienne* (FAG). Cette différence a principalement des conséquences administratives, les *Dragons* et les *Choucas*[19] déployés en montagne correspondant au même modèle d'appareil[20]. La répartition des hélicoptères est fixée au niveau national. Certains départements n'ont accès qu'à un seul appareil, comme les Hautes-Alpes et les Alpes-de-Haute-Provence (appareils des FAG), d'autres à deux, comme l'Isère (deux appareils duispell-regioc GHSC), la Savoie et la Haute-Savoie (avec un appareil des FAG et un du GHSC par département). Dans les cas où les secouristes ne peuvent pas réaliser un secours faute d'hélicoptère (appareil déjà utilisé ou en panne), il leur est possible de demander une assistance à un département voisin. En Isère par exemple, le plan ORSEC préconise de faire cette demande si le délai d'attente pour disposer d'un hélicoptère est supérieur à 30 minutes. Ces modalités d'assistance intra-départementale sont directement fixées par les préfets de départements et non au niveau national. Cependant, la coopération intra-départementale doit toujours s'effectuer sous la coordination du *centre opérationnel de zone* (COZ)[21] qui coordonne les différents CODIS concernés. Par exemple, le prêt de l'hélicoptère du détachement haut-alpin de la FAG (*Choucas05*) doit se faire sous la responsabilité du COZ Sud, dont dépend le département des Hautes-Alpes

Le cas isérois

Dans le cas du département de l'Isère, les dispositions spécifiques au secours en montagne du plan ORSEC datent de 2016 et ont été modifiées pour la dernière fois en 2018.

Comme dans les Hautes-Alpes, plusieurs zones d'interventions sont définies. Le *plan de secours en montagne* (PSM) ne s'applique que dans la partie sud-est du département (Figure 1.2). Les interventions de secours en montagne dans cette zone relèvent de la compétence exclusive des USEM, à l'exception du secours sur *domaines skiables,* conformément à la réglementation

19. *Dragon* et *Choucas* sont, respectivement, les indicatifs radio des hélicoptères du GHSC et de la FAG. Ce dernier est généralement postfixé par le numéro du département de rattachement de l'hélicoptère, *e.g. Choucas 05, Dragon 38.*
20. Des *EC145.*
21. Lequel est placé sous l'autorité du préfet de zone.

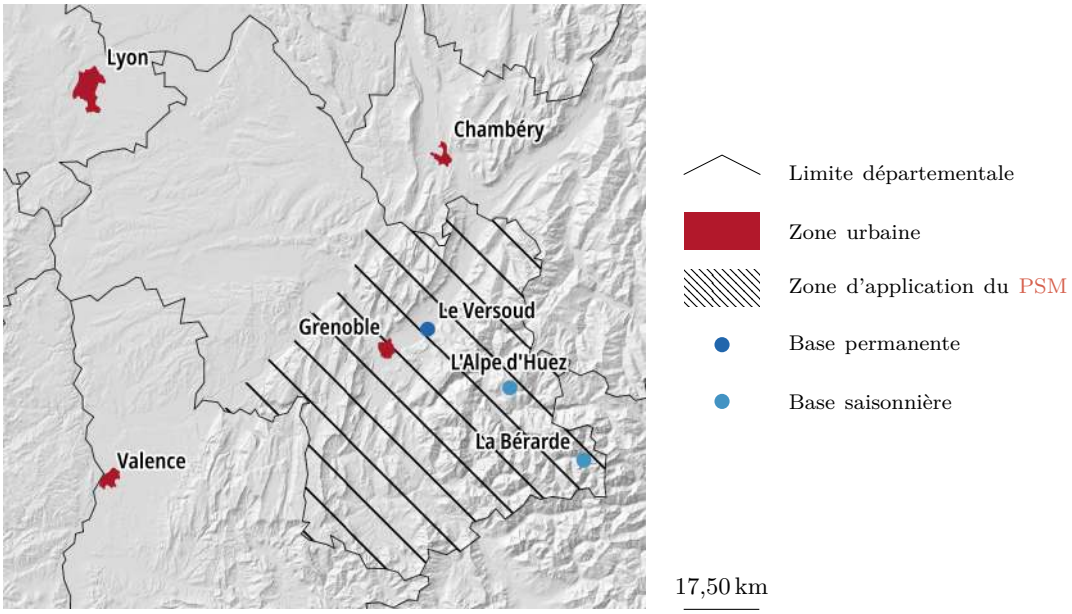


FIGURE 1.2 – Zone d'application des dispositions spécifiques au secours en montagne du plan ORSEC isèrois.

nationale. De plus, certaines formes spécifiques de secours en *domaine montagne*, comme le secours spéléologique [22] ou routier [23], ne relèvent pas des USEM isèroises.

Les seules USEM présentes dans le département sont le PGHM et la CRS Montagne. Ces deux corps fonctionnent selon le principe d'alternance hebdomadaire, commun à beaucoup de départements. Cependant le plan ORSEC départemental n'exclut pas la participation occasionnelle d'autres acteurs, comme les pompiers, les militaires du régiment grenoblois d'infanterie alpine, des unités de la gendarmerie iséroise ou des bénévoles (généralement guides de haute montagne). La compagnie d'hélicoptères privée SAF participe également à des opérations dans le département, notamment pour la station de l'Alpe d'Huez qui fait évacuer certains blessés directement par hélicoptère.

Une autre particularité iséroise est l'adaptation du dispositif de secours aux flux touristiques [24]. L'aérodrome du Versoud, en périphérie de Grenoble, est le point central des opérations de secours. Un hélicoptère et son équipage, une équipe de l'USEM d'astreinte et un médecin du SMUR y sont présents tout au long de l'année. Cette équipe est complétée à la haute saison (été et hiver) par une seconde permanence à l'altiport de l'Alpe d'Huez. Y sont présents, comme pour le Versoud, un hélicoptère et son équipage, une équipe de secouristes et un médecin. Enfin, durant l'été, une troisième équipe est déployée au poste de secours de la Bérarde, point de départ d'un grand nombre de randonnées dans l'Oisans et les Écrins. La mise en place de ces deux permanences de haute-saison est néanmoins contrainte à une disponibilité suffisante des moyens humains et matériels ; si ceux-ci ne sont pas suffisants, le

22. Des dispositions spécifiques au secours spéléologique sont définies dans le plan ORSEC. Contrairement au secours en montagne, ce type de secours est toujours assuré par des bénévoles soutenus par des moyens étatiques.
23. Assuré par le GRIMP isèrois.
24. Il ne s'agit cependant pas d'un cas unique. Un système similaire est également mis en place en Savoie.

bon fonctionnement de la base du Versoud est prioritaire.

1.1.2 La phase de localisation des victimes

Jusqu'à présent, nous avons traité les opérations de secours en montagne comme « un tout », sans en détailler l'organisation. Pourtant, la phase de *traitement de l'alerte* et celle de *l'intervention* répondent à des objectifs et mobilisent des compétences très différentes. C'est durant la phase de traitement de l'alerte que sont fixées les modalités d'intervention, de médicalisation et que la victime et sa position sont identifiées. Or, si toute intervention nécessite de connaître la position de la victime, il n'est pas forcément simple ou rapide de l'identifier. Il s'agit donc d'une étape critique, avec un impact conséquent sur l'ensemble d'une opération de secours. La circulaire KIHL en impose même la vérification systématique. Une erreur peut en effet faire perdre un temps considérable aux équipes de secours et donc impacter, non seulement l'opération de secours en cours, mais également toutes les opérations ultérieures, les moyens nécessaires aux secours étant limités.

Dans le département de l'Isère, ce travail de localisation de la victime est à la charge des USEM. En effet, le plan ORSEC de l'Isère précise que « l'opération de secours [...] englobe la phase de localisation précise de la victime [...] » [25] et que, en vertu du principe de « compétence exclusive » des USEM pour les opérations de *secours en montagne,* la localisation de la victime est à leur charge.

1.1.2.1 L'identification manuelle de la position des victimes

Les secouristes disposent de plusieurs méthodes pour localiser les victimes. Une première manière de procéder, qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de ce travail, consiste à identifier manuellement la position du requérant à partir des informations de localisation données lors de l'appel, *e.g.* « Je suis sur le GR 5 », « Je vois Grenoble » ou « Je suis à côté d'un chalet. » Ces informations peuvent être extrêmement nombreuses et précises ou, au contraire, extrêmement lapidaires. L'identification manuelle d'une position peut donc être un travail difficile, même pour un secouriste habitué à ce travail.

Le processus de localisation d'une victime par les secouristes est unique dans chaque cas, mais on peut identifier certaines récurrences. Lorsque la personne contactant les secours, *le requérant,* est mise en contact avec les secouristes, il lui est rapidement demandé de donner sa position. Quelques fois, le requérant est capable de la donner précisément et sans ambiguïté, par exemple en donnant des coordonnées GPS ou une indication extrêmement claire et discriminante (*e.g.* « Je suis au sommet du Grand Veymont »). Mais dans la majorité des situations, le requérant n'est pas capable de décrire convenablement sa position. Les secouristes doivent donc l'identifier, ou tout du moins l'approximer à partir des informations qu'ils peuvent obtenir. Cette tâche est cependant facilitée par deux éléments importants. D'une part, la phase de localisation se déroule en parallèle de la conversation téléphonique entre le requérant et un secouriste. Ce dernier n'a donc pas à extrapoler le maximum d'informations à partir d'une description figée, au contraire, il a la possibilité de poser des questions, de demander des précisions et donc de tester des hypothèses. Les secouristes peuvent donc procéder par essais-erreurs et adapter leur démarche en continu, en fonction de la situation et des nouvelles informations données par le requérant, ce qui facilite le travail de localisation. Le second point essentiel est que

25. *Les principes du secours en montagne en Isère,* page 5 du plan ORSEC de l'Isère.

les secouristes peuvent s'appuyer sur un nombre conséquent de données pour identifier la position du requérant. En effet, les secouristes ont accès à un ensemble de données cartographiques, que ce soit au format papier ou numérique, qui leur permettent d'identifier des positions, de faire des hypothèses ou de poser des questions discriminantes (*e.g.* « Est-ce que vous voyez des chalets au loin ? »). D'autres sources d'informations sont également disponibles pour les secouristes, comme un ensemble de *topo-guides*[26] de la région, dans lesquels sont parfois les seuls documents à donner une information spécifique, comme un itinéraire recommandé.

Malgré ces atouts, il est parfois difficile pour les secouristes d'identifier avec précision et certitude la position de la victime, notamment lorsque les informations données par le requérant sont peu précises ou vagues. Cela peut se produire lorsque le requérant est un tiers contactant les secouristes suite à une disparition ou lorsque la victime est complètement perdue, paniquée ou gravement blessée.

Le cas spécifique des *domaines skiables*

Il convient de préciser que le processus d'identification des positions est assez différent lorsque les USEM sont amenées à intervenir sur un *domaine skiable.* Dans ce cas, les victimes ne contactent pas directement les secouristes des USEM[27], ce sont les *pisteurs-secouristes* de la station qui prennent contact avec le CODIS pour demander une évacuation héliportée si la situation l'impose.

Dans cette situation, la communication est donc assez différente, puisqu'elle s'effectue entre deux professionnels, qui partagent des connaissances sur la région de l'intervention et qui sont régulièrement amenés à communiquer entre eux. Des solutions techniques ont donc été mises en place pour faciliter et fluidifier ces interactions. D'une part, les secouristes de USEM ont accès à l'ensemble des plans de piste des *domaines skiables* de leur zone d'intervention, complétés par carroyage commun entre *pisteurs-secouristes* et USEM. Ce dernier permet aux pisteurs de communiquer rapidement une position aux secouristes, bien plus qu'avec une description. Les problèmes qui peuvent apparaître lors de la localisation manuelle des victimes sont donc inexistants dans le cas particulier des secours en station de ski ; c'est pourquoi nous ne traiterons pas de ce cas dans notre thèse.

On peut toutefois noter que la solution développée par les secouristes et les pisteurs n'est pas exempte de défauts. Pour des raisons autant pratiques qu'esthétiques, les plans de stations de ski sont fortement déformés, voire peu réalistes pour ceux dessinés manuellement (Gauchon 2014 ; La Porte 2017). Tout carroyage tracé sur ces représentations est donc difficilement transposable dans une représentation azimutale, comme une carte topographique ou un SIG, ce qui impose aux secouristes ou aux pilotes de faire cette transformation mentalement. Au sein du projet Choucas, plusieurs travaux d'étudiants ont été mis en place pour permettre le géoréférencement de ces plans et donc faciliter leur utilisation (Gauer et al. 2019 ; Xi 2020).

1.1.2.2 L'identification assistée de la position des victimes

Lorsque la victime contacte directement les secours (ou que le requérant est présent sur le site de l'accident), le processus de localisation peut être assisté par l'utilisation de solutions permettant une géolocalisation facile, précise et non ambiguë (*e.g.* comme les récepteurs GPS).

26. Guides pour les courses en montagne.
27. Conformément au plan ORSEC les appels adressés au CODIS (112 ou 18) ou au SAMU (15) pour des secours sur *domaine skiable* sont redirigés au service des pistes concerné.

La généralisation des smartphones, généralement équipés de GPS, a fait émerger un marché de solutions de partage de localisation pensées pour le secours. Les applications dédiées, comme *Alpify,* sont peu à peu supplantées par les solutions directement intégrées dans le système d'exploitation des appareils, comme le système *Android Emergency Location Service* (Google 2019). De telles solutions sont certes utiles, mais elles ne sont que des aides occasionnelles, totalement dépendantes de la victime et de sa capacité à les utiliser. Il existe cependant deux solutions que les secouristes peuvent utiliser à leur initiative : l'identification de l'antenne GSM servant à passer l'appel et l'application de géolocalisation *GendLoc.*

L'identification de l'antenne GSM

Les USEM ont la possibilité de localiser le requérant en identifiant l'antenne GSM à laquelle son téléphone est connecté. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est totalement transparente pour la victime. Aucune action de sa part n'est nécessaire pour la localiser. Toutefois, c'est le seul avantage de cette méthode, qui n'est ni précise, ni rapide.

D'une part, cette approche ne renseigne les secouristes que sur l'antenne téléphonique de rattachement et sur son angle d'émission. Le requérant peut donc se situer n'importe où dans la zone couverte par l'antenne. Or, lorsque le maillage est composé d'un faible nombre d'antennes puissantes, comme c'est généralement le cas en dehors des milieux urbains, la zone couverte par l'antenne peut devenir très importante (*i.e.* atteindre plusieurs centaines de km^2) et donc ne pas permettre une localisation suffisamment précise. À cela s'ajoute le fait que la zone couverte par une antenne peut varier sensiblement, notamment en fonction des conditions météo, ce qui renforce l'imprécision de la localisation par ce biais (Fen-Chong 2012 ; Olteanu-Raimond et al. 2012). À la faible précision de cette méthode s'ajoute sa lenteur. Pour des raisons légales, les secouristes ne peuvent obtenir cette information des opérateurs qu'avec une réquisition judiciaire. La demande de cette réquisition n'est pas automatique, il est donc nécessaire de faire une demande manuellement, d'attendre sa validation avant de contacter l'opérateur du requérant qui renverra l'information demandée. L'ensemble de ce processus peut donc prendre plusieurs dizaines de minutes, ce qui, dans un contexte d'urgence et de ressources matérielles limitées, est considérablement long.

Dans les faits, l'identification de l'antenne GSM utilisée par le requérant n'est que rarement employée par les secouristes. Les secouristes ont généralement recours à cette solution lorsque aucune des informations données par le requérant n'est suffisante pour le localiser, que la phase de localisation prend beaucoup de temps et que l'application *GendLoc* n'est pas utilisable.

La solution *GendLoc*

Pour disposer d'une aide à la localisation plus rapide, précise et efficace que l'identification de l'antenne GSM utilisée, les secouristes du PGHM de Grenoble ont développé, à partir de 2013, l'application *GendLoc*[28] . Contrairement à une application pour smartphone — comme celle[29] proposée par la Garde aérienne suisse de sauvetage (REGA) — *GendLoc* ne demande pas un téléchargement et une installation préalable. Le principe de fonctionnement de *GendLoc* consiste à envoyer, par SMS, une URL au requérant. Cette dernière conduit à une page web *ad hoc,* qui demande, par le biais du navigateur web, la localisation du téléphone. Si la victime valide l'opération, la position du téléphone est automatiquement renvoyée aux secouristes,

28. *GendLoc* a principalement été développé par M. Olivier Favre (Muscat et al. 2015).
29. Cette application, qui s'appelait auparavant *IRera,* porte aujourd'hui le nom de *Rega.*

qui peuvent l'afficher directement à l'aide d'une interface cartographique *ad hoc.* Avec cette solution, les secouristes peuvent connaître rapidement et précisément la position de la victime, sans qu'il soit nécessaire de passer par une autorité judiciaire, ce qui facilite grandement les opérations de secours (Muscat et al. 2015). Un second avantage de cette solution, est qu'elle offre la possibilité de guider des personnes perdues, mais non blessées, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer une intervention. En effet, *GendLoc* permet de générer un plan centré sur la position de la victime et de le lui transmettre. Cela permet généralement à la victime de retrouver son chemin (Muscat et al. 2015).

Bien qu'extrêmement efficace, cet outil ne peut pas apporter de solution satisfaisante à toutes les situations. Son principal défaut est sa dépendance aux smartphones et à leur GPS intégré. Si la majorité des Français possède aujourd'hui ce type de téléphone [30], cette répartition présente une forte hétérogénéité inter-classes d'âge [31]. Par conséquent, une part, sans doute minoritaire, mais non négligeable des requérants n'a pas accès à un GPS, ce qui rend leur géolocalisation impossible à l'aide de *GendLoc* [32]. De plus, il est indispensable que la victime ait une connexion mobile d'assez bonne qualité pour pouvoir accéder à internet et donc ouvrir la page web transmisse par *GendLoc.* Enfin, il est nécessaire que la victime puisse réaliser l'ensemble des manipulations nécessaires [33]. Or, la victime peut être dans un état de semi-lucidité ou de panique qui l'empêche de les réaliser convenablement. Les secouristes du PGHM de Grenoble nous ont, par ailleurs, indiqué qu'ils choisissaient fréquemment de ne pas utiliser *GendLoc* dans ces conditions, préférant rester en contact avec la victime, quitte à identifier sa position manuellement.

Malgré ces défauts, la solution *GendLoc* est massivement utilisée et est rapidement passée d'un prototype développé au sein du PGHM de Grenoble à un outil utilisé par la plupart des USEM de France (Muscat et al. 2015). Cette solution a permis de réduire le recours à la localisation manuelle des victimes, ce qui permet de limiter le temps consacré à la phase de localisation et donc la charge des moyens d'intervention.

1.1.2.3 Les limites des méthodes de localisation des victimes

Il existe cependant certaines situations où, malgré les outils présentés, la localisation des victimes est délicate. C'est par exemple le cas d'une opération de secours en montagne qui s'est déroulée en août 2014, dans la région de *Bourg-d'Oisans,* en Isère (Figure 1.3). Ce jour-là, un randonneur polytraumatisé suite à une chute, contacte les secours et est mis en relation avec le PGHM de Grenoble. Son état étant assez préoccupant, le secouriste en fonction l'estime incapable d'utiliser *GendLoc.* Les secouristes décident donc d'identifier sa position manuellement, par recoupement d'informations.

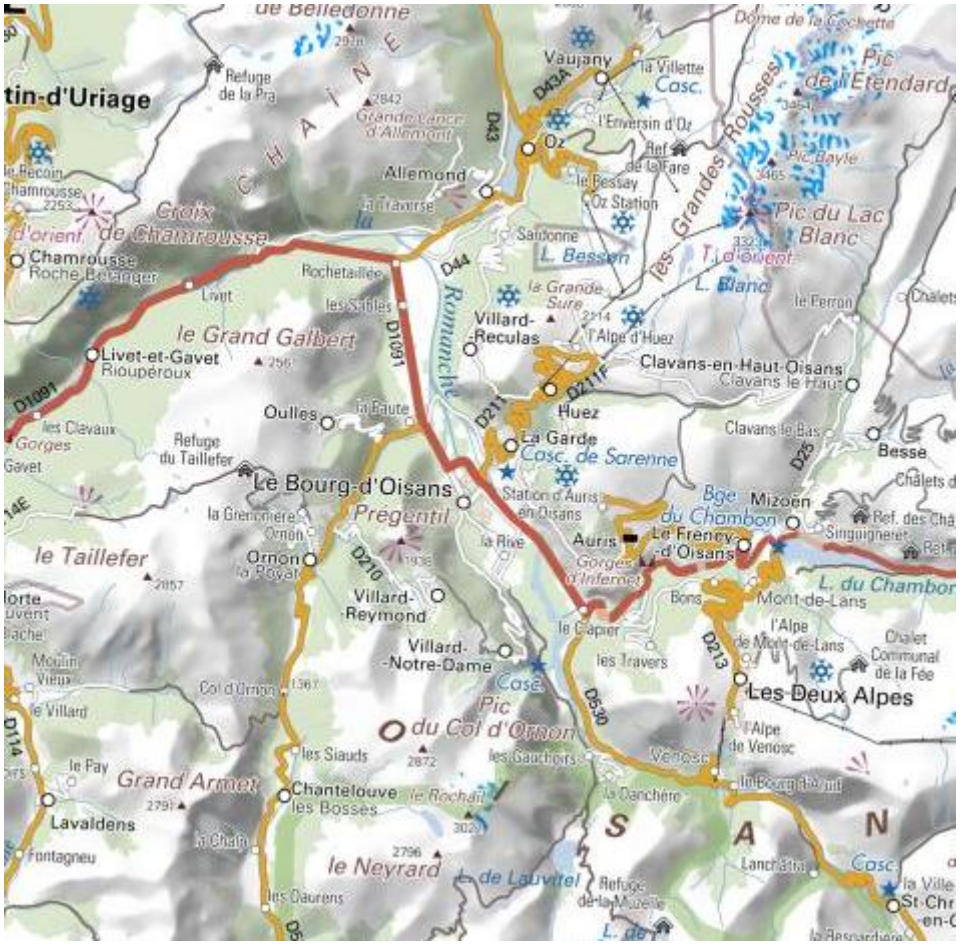
À cause de ses blessures, la victime n'est pas toujours lucide et les informations que les secouristes arrivent à obtenir en quarante minutes de conversation, sont peu nombreuses et imprécises. Au cours de la conversation, les secouristes obtiennent de la victime les informations suivantes :

30. Plus précisément 77 % en 2019, selon le baromètre de l'ARCEP (2019).

31. 86 % des 12-17 ans possèdent un *smartphone,* contre 98 % des 18-24 ans, 95 % des 25-39 ans, 80 % des 40-59 ans, 62 % des 60-69 ans et 44 % des 70 ans et plus, selon le baromètre de l'ARCEP (2019).

32. À cet égard, la solution proposée par *GendLoc* est moins flexible que l'identification des antennes GSM. En effet, cette solution de permet connaitre la position de n'importe quel téléphone portable, qu'il ait un GPS ou non.

33. (1) Ouvrir le lien donné par SMS, (2) allumer le GPS du téléphone, (3) autoriser le navigateur à transmettre la position du GPS, et (4) valider le partage de la position sur la page web *GendLoc.*



Source : Géoportail, SCAN régional IGN, 2020. 2,50 km

FIGURE 1.3 – Carte topographique de la région de Bourg-d'Oisans

— Elle est partie de Bourg d'Oisans, à pied, sur chemin, en direction d'une station de ski.

— Elle a marché plusieurs heures.

— Elle a chuté de plusieurs mètres.

— Elle voit une partie de plan d'eau.

— Elle est sous une route et entend des véhicules.

— Elle est sous une ligne électrique 3 brins.

— Elle vient de passer du soleil à l'ombre.

La particularité de cette alerte est que toutes les informations données par le requérant sont imprécises et donc difficilement utilisables. Le seul lieu nommé (et donc facilement identifiable) est le point de départ de la victime. Les autres éléments donnés par la victime la localisent par rapport à un type d'objet, pouvant correspondre à de nombreuses instances. Ainsi, on sait que la victime s'est dirigée vers une station de ski, mais sans savoir laquelle. Par conséquent, toutes les stations de la région sont potentiellement la station à laquelle le requérant se réfère (Figure 1.3). De plus, toutes les informations qui permettraient d'identifier la position actuelle à partir du point de départ (*i.e.* Bourg-d'Oisans) sont imprécises : « quelques heures », « plusieurs mètres », *etc.* Dans ces conditions, quel est le temps de marche à considérer ? 2, 3 ou 5 heures ? À cause de l'imprécision des informations et du grand nombre de possibilité, plusieurs zones de la région de Bourg-d'Oisans peuvent correspondent à cette description.

En raison de la durée de la phase de localisation et confrontés à l'échéance du crépuscule, les secouristes finissent par demander une réquisition judiciaire, leur permettant de savoir que le téléphone de la victime est connecté à une antenne « GSM SFR située à la chapelle St-Philomene située à *Villard-Reymond* (38 520) et orientée à 90° » (Olteanu-Raimond et al. 2017). Cette nouvelle information permet de réduire suffisamment la zone de recherche pour que les secouristes prennent la décision d'envoyer un hélicoptère pour chercher la victime de visu, avant que le soleil ne se couche.

La victime fut finalement repérée par l'équipage de l'hélicoptère en vol. De l'aveu même des secouristes, la réussite de cette opération de secours tient beaucoup à la chance et leur difficulté à résoudre ce cas les a amenés à réfléchir à de nouvelles pistes d'amélioration de leur méthode de localisation d'une victime.

1.2 Le projet de recherche Choucas

1.2.1 Origine du projet

L'alerte présentée ci-dessus a mis en évidence les limites de la méthode de localisation des victimes utilisée par le PGHM et le risque qu'elles font courir aux victimes. Dans le cas où la solution *GendLoc* n'est pas utilisable, les secouristes doivent opter pour une localisation manuelle qui, si elle fonctionne la plupart du temps, peu être inefficace et conduire a la perte d'un temps précieux — comme c'est le cas ici. Une réflexion a donc été amorcée au sein du PGHM du Grenoble pour trouver des solutions permettant d'améliorer la gestion de ces cas, qui bien que minoritaires, sont problématiques. Une des voies suivies a été d'organiser des collaborations avec des laboratoires de recherche pour mettre en place une réflexion autour de ces questions.

Une de ces collaborations a abouti à la création du projet de recherche pluridisciplinaire Choucas[34], au sein du quel notre travail de thèse s'inscrit. Ce projet de recherche implique quatre institutions partenaires : (1) Le *laboratoire en sciences et technologies de l'information géographique* (LASTIG)[35] de *l'institut national de l'information géographique et forestière* (IGN), qui regroupe des chercheurs spécialisés dans la modélisation, la qualification, l'enrichissement et la visualisation des données géographiques ; (2) l'équipe *probabilités et statistiques* du *laboratoire de mathématiques et de leurs applications*[36] (LMAP) de l'université de Pau, dont les membres sont spécialisés dans la recherche autour des modèles probabilistes et de l'inférence statistique ; (3) L'équipe STeamer[37] du *laboratoire d'informatique de Grenoble* (LIG), travaillant à la conception d'outils et de méthodes destinés à la construction de systèmes d'information spatio-temporelles ; et (4) du PGHM de Grenoble qui est à la fois un contributeur et l'utilisateur final des résultats du projet Choucas (Choucas 2020).

1.2.2 Problématique du projet

L'objectif premier du projet Choucas est de développer des méthodes et des outils permettant aux secouristes de localiser plus facilement, rapidement et efficacement des victimes en montagne et ainsi éviter de reproduire la situation de l'alerte présentée ci-dessus, où la victime n'a été retrouvée que par chance. De part son statut de « déclencheur » du projet de recherche Choucas, mais surtout en raisons de ses spécificités qui en font un cas d'école (sous-sous-section 1.1.2.3), cette alerte occupe une place centrale dans le projet Choucas, au point d'être baptisée « *fil rouge* » (Olteanu-Raimond et al. 2017).

À la suite de l'alerte *fil rouge,* un processus de réflexion, visant à identifier les lacunes du processus de localisation des victimes, a été mis en place. Ce dernier a permis d'identifier plusieurs problèmes. Le premier d'entre eux est qu'il est difficile, voire impossible, de traiter une partie des informations données par le requérant. Les raisons peuvent être multiples. Par exemple, le requérant peut donner une information qui pourrait se révéler discriminante, mais qu'il est très difficile d'exploiter manuellement. C'est par exemple le cas lorsque, dans le *fil rouge,* la victime indique voir « une partie de plan d'eau ». Si relativement peu de positions correspondent à cet énoncé, il n'est pas exploitable lors d'une localisation manuelle, puisqu'il serait nécessaire d'arriver à construire manuellement des zones de visibilité. Un autre problème se pose lorsque le requérant décrit sa position à l'aide d'un objet non nommé, mais défini par son type ou sa nature. C'est par exemple le cas lorsque la victime indique être « sous une ligne électrique » ou être « partie [...] en direction d'une station de ski ». Dans ce cas, de très nombreuses positions peuvent correspondre à une même description et il est difficile pour un opérateur humain de toutes les identifier et les vérifier. Un autre problème est que les requérants peuvent décrire une position en utilisant des termes très vagues, par exemple lorsque, dans le *fil rouge,* la victime indique avoir marché « plusieurs heures ». Les secouristes ne peuvent qu'approximer la distance qu'a pu parcourir la victime : s'agit-il de quelques kilomètres ? Auquel cas la victime aurait marché deux ou trois heures, ou beaucoup plus ? Bien entendu ces différents problèmes peuvent se combiner. C'est par exemple le cas lorsque la victime indique être « sous une route et entend des voitures ». Dans ce cas, le « sous » est imprécis (*i.e.* on ne sait pas s'il s'agit de quelques mètres ou de beaucoup plus), l'objet est inconnu (*i.e.* il

34. http://choucas.ign.fr/
35. https://www.umr-lastig.fr/
36. https://lma-umr5142.univ-pau.fr/
37. http://steamer.imag.fr/

peut s'agir de n'importe quelle route) et il est impossible de traiter une partie de l'information manuellement (*i.e.* « entendre des véhicules »).

Un autre point problématique, bien que moins critique que le précédent, est qu'il est difficile pour les secouristes de traiter différentes hypothèses de localisation de la victime en parallèle, surtout lorsque ces dernières sont complexes. Les secouristes ont donc tendance à se focaliser sur une même hypothèse, celle qui semble la plus probable. Toutefois, cela peut conduire à se focaliser sur une hypothèse fausse, d'autant plus que, comme l'indique Bachelard (1934) : « À l'usage, les idées se valorisent indûment ». Il serait donc préférable que les secouristes puissent disposer d'un outil leur permettant de traiter plus facilement et confortablement plusieurs hypothèses en parallèle.

Une solution à cet ensemble de problèmes[38] peut être apportée par le développement de méthodes et d'outils informatiques *ad hoc,* destinés à assister le secouriste procédant à la localisation. Les différents objets correspondant à la description donnée par le requérant peuvent être identifiés automatiquement à l'aide d'un outil d'interrogation des données. Les informations inexploitables manuellement (*e.g.* les notions de visibilité) peuvent alors être transformées à l'aide d'un outil permettant de passer d'une description de position (*e.g.* « la victime voit une partie de plant d'eau ») à une zone, dont les coordonnées sont connues, et permettant de prendre en compte l'imprécision des descriptions et les situations où plusieurs objets peuvent correspondre à la description. Enfin, ces deux outils peuvent être combinés dans un outil d'aide à la décision permettant de définir plusieurs hypothèses et de les traiter indépendamment. Le développement d'une telle solution pourrait apporter un réel support aux secouristes durant la phase de localisation. Cependant, il nous semble nécessaire que cette solution ne soit pas conçue pour se substituer aux secouristes (*e.g.* en interprétant directement la discussion téléphonique et en cherchant à modéliser la description donnée par le requérant), mais qu'elle s'intègre dans leur cadre de travail.

Une seconde catégorie de problèmes, liés aux premiers, concerne spécifiquement l'exploitation des données. Pour localiser les requérants, les secouristes ont à leur disposition de nombreuses données, comme des bases de données géographiques, des cartes et des plans, des *topo-guides, etc.* Une grande partie de ces données existent uniquement sous format papier, ce qui rend leur utilisation difficile, notamment lorsque les secouristes cherchent une information sans connaitre le document dans lequel elle se trouve. Les secouristes sont donc confrontés à un autre problème : l'interrogation des données. Une solution pour faciliter l'exploitation de ces données consiste à travailler à leur intégration et à proposer des outils d'interrogation des données. Toutefois, même en considérant toutes les données à la disposition des secouristes, quel que soit leur format, il reste des descriptions qu'il est impossible d'interpréter, faute de données. Ce peut être le cas lorsqu'il se réfère à un objet qui n'est pas saisi dans les bases de données géographiques, soit parce que l'objet n'entre pas dans les spécifications de la base de données utilisée, soit car il est trop récent. Il est également possible qu'un objet existe dans la base de données géographique utilisée, mais que le requérant s'y réfère d'une manière telle que l'objet n'est pas identifiable ; par exemple, en utilisant certaines caractéristiques qui ne sont pas présentes dans la base de données. Prenons pour exemple le cas où une victime indique être sur un « pentu », « en lacets » ou encore « en balcon ». Il est fort probable que le chemin auquel elle se réfère soit présent dans la base de données géographique utilisée, mais il ne sera pas

38. C'est-à-dire :(1) Impossibilité d'identifier les positions correspondant à certaines descriptions, (2) difficulté à considérer l'ensemble des cas possibles lorsque le requérant se réfère par rapport à un objet sans le nommer, (3) difficulté à prendre en compte l'imprécision et (4) difficulté de traiter des hypothèses en parallèle.

qualifié de « pentu », « en lacets » ou « en balcon », il n'est donc pas possible d'identifier ce chemin à l'aide de ces qualificatifs, à moins d'être en mesure de les construire. Une solution consiste à *enrichir* les bases de données géographiques en y ajoutant toutes les informations jugées nécessaires, comme les qualificatifs « pentu » ou « en lacet » s'il s'agit d'un chemin.

1.2.3 Objectifs scientifiques du projet

Pour répondre à ces problèmes, quatre objectifs principaux ont été définis et répartis entre les partenaires du projet Choucas :(1) la structuration des données issues de sources textuelles hétérogènes, principalement traitée au sein du laboratoire LMAP ; (2) le raisonnement spatial qualitatif flou, réalisé par les membres du LASTIG ; (3) la géovisualisation de données multi-dimensionnelles et imparfaites pour la prise de décision, traitée par le LIG et (4) l'intégration de sources hétérogènes spatialisables, impliquant des membres du LMAP et du LASTIG. Une synthèse des objectifs du projet Choucas est présentée par la Tableau 1.3, à la fin du chapitre.

1.2.3.1 Structuration des données issues de sources textuelles hétérogènes

Comme nous l'expliquions précédemment, les bases de données géographiques ne contiennent pas l'ensemble des objets pouvant être utilisés pour décrire une position en montagne. Si on y trouve la plupart des sentiers et des sommets, il est moins fréquent de trouver des représentations de *barres rocheuses,* ou de *vires,* alors qu'il s'agit de points de repères saillants et donc régulièrement utilisés pour décrire des positions dans notre contexte. L'ajout de ce type d'objet dans la base de données utilisées par les secours permettrait d'affiner ou de faciliter la localisation des victimes. Le premier objectif scientifique du projet, « la structuration des données issues de sources textuelles hétérogènes », consiste à enrichir les bases de données à la disposition du PGHM par l'analyse de sources textuelles et plus spécifiquement de descriptions textuelles d'itinéraires de randonnée. En effet, la majorité des informations disponibles sur les itinéraires de randonnée est présentée (et diffusée) sous forme de texte, notamment par le biais de *topoguides,* de sites collaboratifs [39], ou encore de blogs. Les itinéraires y sont généralement présentés sous la forme d'un texte décrivant principalement les points de bifurcation et les objets permettant de les repérer (*e.g.* « prendre à droite à la bifurcation située au niveau d'un gros rocher ») et sont parfois (notamment sur les sites tels que *camp2camp*), complétés par une trace GPS. La présence de ces deux informations complémentaires permet d'envisager d'identifier les positions correspondant à certaines descriptions, et inversement. Or, comme certains des objets décrits et utilisés comme points de repère dans le récit peuvent être absents des bases de données géographiques, il devient possible de les enrichir (Medad et al. 2018 ; Moncla et al. 2019).

1.2.3.2 Raisonnement spatial qualitatif flou

Le second objectif scientifique du projet Choucas est l'élaboration de méthodes permettant d'identifier les zones correspondant à des descriptions de positions (*e.g.* « la victime est sous un chemin »), dans le but de faciliter l'interprétation de descriptions difficiles, voire impossibles à traiter manuellement (*e.g.* « la victime voit une partie de plan d'eau ») ou nécessitant d'étudier de nombreux cas, notamment lorsque l'objet utilisé comme point de référence n'est pas nommé et donc directement identifiable (*e.g.* « la victime est sous une route »). Le principal verrou

39. Comme le site web *camp2camp.*

scientifique de cet objectif est qu'il impose d'être en mesure de prendre en compte l'imprécision inhérente à ce type de description. Comme nous l'avons déjà énoncé, il peut être difficile d'interpréter une description telle que : « la victime est sous une route et entend des véhicules », sans savoir à quel point la victime est « sous » la route (s'agit-il de quelques mètres ou de beaucoup plus ?) ou si le son fait par les véhicules est fort ou faible. À cela s'ajoute le fait qu'une même description peut être utilisée dans des contextes différents ou pour décrire des positions qui le sont tout autant. Il est donc nécessaire de prendre cet aspect en considération et d'adapter la méthodologie pour qu'elle puisse prendre en compte l'imprécision. Un second verrou est que les descriptions données au sein d'une même alerte peuvent être très différentes. Par exemple, dans le *fil rouge,* la victime se repère en utilisant un indice visuel, mais aussi en décrivant son trajet. La modélisation d'une telle alerte nécessite donc d'être en mesure de traiter des informations de nature très différente, tout en prenant en considération leur imprécision et la possibilité que l'objet utilisé pour décrite la position ne soit pas nommé (*e.g.* « une station de ski », « une route », *etc.*). C'est dans cet axe que s'inscrit notre travail doctoral et nous détaillerons donc cet objectif dans les chapitres suivants.

1.2.3.3 Géovisualisation de données multidimensionnelles et imparfaites pour la prise de décision

Le troisième objectif scientifique du projet de recherche Choucas est la conception et la réalisation d'une interface d'aide à la décision permettant aux secouristes de visualiser des données géographiques utilisables pour la localisation de la victime, de formuler leurs hypothèses sur la localisation de la victime et d'interagir avec l'ensemble des solutions qui sont élaborées au sein des autres objectifs scientifiques du projet. L'interface d'aide à la décision est centrale dans le projet, puisqu'elle constitue le point d'entrée et d'interaction avec toutes les solutions élaborées au sein du projet Choucas. Cette interface a également pour objectif de permettre la visualisation et l'interaction avec les zones correspondant à des descriptions de positions qui seront produites par les méthodes développées au sein du précédent objectif. L'interface d'aide à la décision doit donc permettre la visualisation de données prenant en compte l'imprécision, comme celles qui seront produites lors de notre travail de thèse (Viry et al. 2019b).

1.2.3.4 Intégration de sources hétérogènes spatialisables

Enfin, le dernier objectif scientifique du projet Choucas consiste à travailler à la structuration et à l'interrogation de l'ensemble des données géographiques qui permettraient de localiser la victime : sommets, itinéraires, *etc.* Comme nous l'avons précédemment expliqué, les secouristes disposent d'un important corpus de données, provenant de sources hétérogènes telles que les données institutionnelles (*e.g.* données produites par l'IGN), les données collaboratives (*e.g.* données issues de CamptoCamp ou *d'openStreetMap*) ou des données produites par le projet Choucas. Il est, par conséquent, difficile de trouver une information utile au processus de localisation sans savoir où chercher. La structuration de ces données offrirait la possibilité de les interroger conjointement et ainsi de disposer d'un maximum d'informations, ce qui améliorera le processus de localisation.

Le premier verrou scientifique de cette tâche est d'arriver à combiner des sources de données potentiellement différentes et pouvant être contradictoires (*e.g.* deux sources différentes placent un même sommet à des endroits différents), avoir une précision géographique et sémantique différente (*e.g.* une base de donnée distingue les sentiers des chemins et une autre non) et décrire

un même territoire à des dates différentes. La mise en commun de telles sources nécessite donc d'être en capacité de réaliser un appareillement, pouvant se révéler complexe, de données géographiques (Van Damme et al. 2019).

Le second verrou est la définition d'un architecture permettant l'indexation et l'interrogation de ces données. L'architecture étudié pour cet objectif se repose sur un *médiateur* qui interrogera le catalogue de service et dirigera les requêtes vers différentes sources de données. Par exemple, si l'utilisateur souhaite récupérer les limites de l'objet « le lac Blanc », le système interrogera les sources de données qui possèdent des lacs et renverra toutes les instances correspondant à cette description (Halilali et al. 2018).

Conclusion

Comme nous l'avons vu au cours de ce chapitre, notre thèse s'inscrit à la fois dans le contexte métier du secours en montagne et dans le contexte organisationnel du projet de recherche Choucas.

Parmi tous les points critiques auxquels les secouristes sont confrontés dans l'exercice de leur métier, nous nous intéressons à ceux apparaissant lors la première phase des opérations de secours, la localisation de la victime. En effet, malgré le développement récent de la solution de géolocalisation *GendLoc,* il est quelquefois difficile pour les secouristes de localiser une personne perdue ou blessée en montagne, notamment lorsque la victime ne dispose pas de smartphone ou que les secouristes ne l'estiment pas capable de réaliser les manipulations adéquates. Dans ces conditions, les secouristes procèdent à la localisation manuelle de la victime, en interprétant les informations qu'elle peut donner sur sa position, ce qui est moins précis et plus lent qu'une localisation par *GendLoc.* Or, la rapidité d'un secours est un facteur déterminant pour la survie de la victime, mais également pour l'efficacité du système de secours en montagne dans son ensemble, une perte de temps sur le traitement d'une alerte pouvant impacter les alertes suivantes. Le projet Choucas a été construit pour aider les secouristes, en premier lieu ceux du PGHM de Grenoble, à traiter ce type d'alertes. L'objectif de ce projet est, plus précisément, de développer des méthodes et des outils destinés à assister les secouristes durant la phase de localisation de la victime. Notamment en proposant des outils d'aide à la décision, de géovisualisation et en proposant des méthodes permettant d'enrichir les bases de données utilisées par les secouristes avec des données métier utiles, telles que certaines formes spécifiques du relief (*e.g.* vires, barres rocheuses, *etc.*).

Au sein de ce projet, notre rôle est de travailler à la conception de méthodes d'aide au raisonnement spatial, permettant de transformer une description de position (*e.g.* « je suis sous une cascade ») en une zone y correspondant, nous parlons alors de « spatialisation ». Les détails de cet objectif et de son contexte scientifique serons présentés dans le chapitre suivant.

Objectif scientifique	Verrous scientifiques	Apports envisagés
Structuration des données issues de sources textuelles hétérogènes	— Annotation, catégorisation et désambiguïsation des entités nommées — Extraction et interprétation des relations sémantiques	— Définition d'une méthode d'annotation des entités nommées — Définition d'une méthode permettant l'interprétation des relations sémantiques
Raisonnement spatial qualitatif flou ⟶ Chapitre 2	— Spatialisation des indices de localisation — Modélisation des objets géographiques imprécis	— Définition d'une méthode de spatialisation — Définition d'une méthode de prise en compte de l'imprécision des objets géographiques
Géovisualisation de données multidimensionnelles et imparfaites pour la prise de décision	— Définir des méthodes permettant d'assister le secouriste dans sa prise de décision — Visualisation de données imprécises	— Construction d'une interface d'aide à la décision — Définition de méthodes permettant de prendre en compte l'imprécision lors de la visualisation
Intégration de sources hétérogènes spatialisables	— Structuration d'un référentiel de données métier — Appareillement de données hétérogènes	— Définition de méthodes d'appareillement — Construction d'un référentiel de données métier

Table 1.3 – Synthèse des verrous et des apports attendus pour chaque objectif scientifique du projet Choucas

Chapitre 2

Contexte scientifique et problématique

Introduction . . . 33
2.1 Problématisation du sujet . . . 34
2.1.1 Définition des termes du sujet . . . 34
2.1.2 Présentation des concepts du sujet . . . 35
2.2 Objectifs scientifiques de la thèse . . . 36
2.2.1 La *spatialisation* des *indices de localisation* . . . 37
2.2.1.1 Contexte scientifique . . . 37
2.2.1.2 Verrous scientifiques . . . 38
2.2.2 La modélisation de *l'imprécision* des *indices de localisation* . . . 39
2.2.2.1 Contexte scientifique . . . 40
2.2.2.2 Verrous scientifiques . . . 42
2.2.3 La modélisation de *l'incertitude* des *indices de localisation* . . . 43
2.2.3.1 Contexte scientifique . . . 43
2.2.3.2 Verrous scientifiques . . . 43
2.2.4 La *fusion* des *indices de localisation* . . . 44
2.2.4.1 Contexte scientifique . . . 44
2.2.4.2 Verrous scientifiques . . . 45
Conclusion . . . 45

Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cette thèse s'inscrit dans le projet de recherche Choucas, dont l'objectif principal est d'élaborer des solutions destinées à aider les *unités de secours en montagne* (USEM) et plus spécifiquement le PGHM de Grenoble, à localiser des personnes perdues en montagne. Parmi toutes les problématiques abordées dans ce projet (chapitre 1), notre travail s'inscrit dans celle visant à développer des méthodes et des outils permettant de transformer une description de position (*e.g.* « Je suis en face de la Meije ») en une zone, dont les coordonnées sont connues et donc moins ambiguës que la description y correspondant.

La présentation qui a été faite de cette problématique a été, volontairement, assez évasive. Nous n'en avons pas présenté, ni le détail, ni la manière dont cette thèse s'y intègre. Ce chapitre se destine à clarifier ces points, notamment en détaillant la problématique de cette thèse (section 2.1) et en présentant les différents objectifs scientifiques de ce travail (section 2.2).

2.1 Problématisation du sujet

La construction d'une zone à partir de la description qui en est donnée par le requérant est une tâche complexe, qui nécessite de prendre en compte de nombreux éléments que nous n'avons pas abordés lors de la présentation des objectifs scientifiques du projet Choucas. De plus, durant le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons fait emploi de nombreux termes, inhérents au projet, sans pour autant les définir. Nous allons à présent clarifier ces différents termes (2.1.1), avant de détailler les concepts généraux de cette thèse (2.1.2)

2.1.1 Définition des termes du sujet

Jusqu'à présent, nous avons abondamment employé le terme « d'alerte » pour désigner à la fois une opération de secours donnée, sa phase de localisation et l'ensemble des éléments décrivant une position donnée par le requérant. Dans cadre du projet Choucas, ce terme prend une définition plus restrictive, qui est formalisée dans *l'ontologie d'alerte Choucas* (OAC, Viry et al. 2019a). Dans l'ontologie OAC, le terme « alerte » est défini comme l'ensemble des *indices de localisation* à la disposition des secours pour identifier la position d'une victime donnée, pour une opération de secours donnée. Une alerte est donc caractérisée par un ensemble *d'indices de localisation,* mais également par sa temporalité et l'identité de la *victime* (et du *requérant,* s'ils sont différents). L'objectif de cette thèse est de construire les zones correspondant à la position de la victime à partir de la description qui en est faite dans une alerte donnée, *i.e.* à partir des différents *indices de localisation* qui la composent.

Un *indice de localisation* correspond à un élément donné par le requérant pour décrire une position. Par exemple, « je suis sous une route » ou « il était à La Grave » sont deux *indices de localisation,* bien qu'ils soient très différents. En effet, le premier exemple décrit la position actuelle du locuteur (« je »), alors que le second décrit la position d'un tiers (« il ») à un instant révolu. On pourrait, dès lors, penser que le second exemple n'est pas représentatif des *indices de localisation* apparaissant dans les alertes traitées, leur objectif commun étant a priori de décrire la position d'une victime (et non d'un tiers) au moment de l'appel (et non il y a plusieurs heures) et tout autre élément pourrait sembler, au mieux, inutile. Pourtant, il n'est pas rare que le requérant soit amené à décrire la position de la victime à partir de la sienne, donnant un ensemble d'indices de localisation de la forme : (a) « Je suis dans un refuge », (b) « la victime est en face de moi, sur le versant opposé ». De plus, des *indices de localisation* décrivant des positions passées peuvent s'avérer utiles, comme dans le cas du *fil rouge* où de nombreux *indices de localisation* décrivent des positions passées (*e.g.* « La victime est partie de Bourg-d'Oisans », cf. 1.1.2.3). Le nombre *d'indices de localisation* présents dans *une alerte* est très variable. Le *fil rouge*, par exemple, en contient une dizaine. S'il est théoriquement possible qu'une alerte ne contienne qu'un seul indice de localisation, ce n'est jamais le cas en pratique : les secouristes disposent toujours de plusieurs *indices de localisation,* même si l'un d'entre eux est extrêmement précis et sans ambiguïté, comme des coordonnées GPS.

Les *indices de localisation* sont eux-mêmes des objets composés de plusieurs éléments : (a) un *sujet* (*e.g.* « je », « il », « la victime »), qui est l'élément dont la position est décrite ; (b) un *objet de référence* (*e.g.* « une route », « La Grave »), qui est l'élément à partir duquel est définie la position du *sujet* et (c) une *relation de localisation* (*e.g.* « à », « sous », « sous ») qui définit la relation entre *sujet* et *objet de référence*[1]. C'est en interprétant ces trois éléments que l'on

1. Des termes alternatifs existent dans la littérature pour qualifier *le sujet,* la *relation de localisation* et *l'objet de référence.* Ces termes serons détaillés ultérieurement (3.1).

peut construire la *zone de localisation* correspondant à une description de position, processus que nous nommons *spatialisation.*

2.1.2 Présentation des concepts du sujet

À cause de la nature composite des *alertes,* la construction de la *zone de localisation* correspondant à une description de position ne peut se faire directement. Il est nécessaire de procéder en deux étapes, la première destinée à *spatialiser* les différents *indices de localisation* et la seconde combinant les résultats des différentes *spatialisations* pour aboutir à la *zone de localisation* finale, c'est-à-dire la *fusion* des résultats de la *spatialisation.* On est donc amené, pour une même alerte, à définir plusieurs[2] *zones de localisation,* une pour chaque *indice de localisation,* auxquelles s'ajoute une dernière zone, construite par la *fusion* des résultats de la *spatialisation.* L'ontologie OAC (Viry et al. 2019a) fait donc la distinction entre les *zones de localisation compatibles* (ZLC), construites par la spatialisation des *indices de localisation* et la *zone de localisation probable* (ZLP), qui résulte de leur *fusion.*

Le processus de *spatialisation* d'un *indice de localisation* est illustré par la figure 2.1. Dans cet exemple, *l'indice de localisation* « je suis proche d'une maison » est *spatialisé* à l'aide d'une zone tampon. On considère donc que la zone « proche d'une maison » correspond à toutes les positions situées à moins d'une distance fixée de *l'objet de référence.* La *zone de localisation compatible* résultante est donc un disque. Cette *spatialisation* est simple, voire simpliste, et il ne faut pas voir cette illustration comme une représentation de la méthode qui sera effectivement utilisée pour *spatialiser* cet indice, mais plutôt comme une illustration du processus de *spatialisation.*

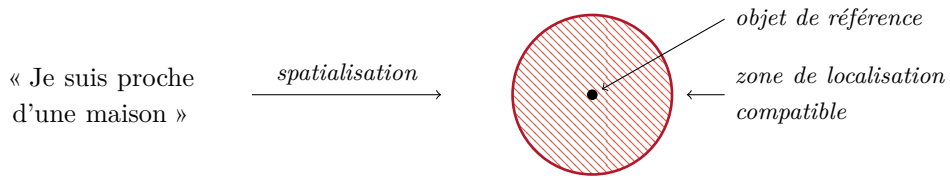


Figure 2.1 – Illustration du processus de *spatialisation* d'un *indice de localisation.*

La spatialisation est une étape qui doit être répétée pour tous les *indices de localisation* donnés par le requérant. On dispose ainsi d'autant de *zones de localisation compatibles* que d'indices. Chacun d'entre eux donne une information sur la position de la victime. Si l'on exclut le cas où certains indices sont faux, la position de la victime se situe dans une zone où tous les *indices de localisation* sont vérifiés, autrement dit la *zone de localisation probable* est située à l'intersection de toutes les *zones de localisation compatibles.* Prenons pour exemple une version simplifiée du *fil rouge* (1.1.2.3), composée de seulement deux *indices :* « la victime voit une partie de plan d'eau » et « elle vient de passer du soleil à l'ombre. » La *zone de localisation probable* correspondant à cette description est, à la fois une zone à partir de laquelle on peut apercevoir une partie de plan d'eau (*i.e.* le premier *indice de localisation* est vrai), mais aussi une zone qui vient de passer du soleil à l'ombre (*i.e.* le second *indice de localisation* est vrai). Par conséquent la *zone de localisation probable* correspond à l'intersection des deux *zones de localisation compatibles* leur correspondant. La Figure 2.2 illustre ce processus pour des ZLC

2. À l'exception du cas, déjà mentionné, où le requérant ne donne qu'un seul *indice de localisation.* Toutefois, c'est un cas que l'on ne rencontre pas en pratique.

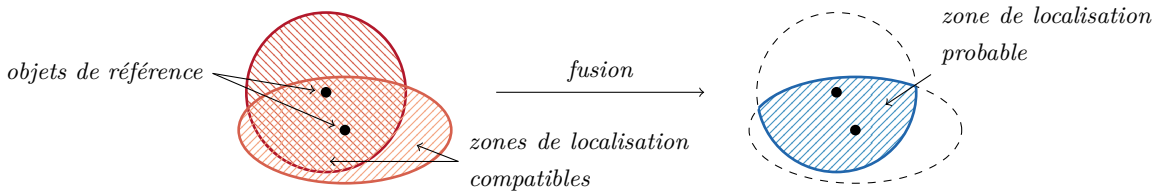


FIGURE 2.2 – Illustration du processus de construction de la *zone de localisation probable* par la *fusion* des *zones de localisation compatibles.*

construites par un processus de spatialisation similaire à celui présenté par la Figure 2.1 [3]. Deux *zones de localisation compatibles* y sont représentées, lesquelles sont produites par un processus de *spatialisation* semblable à celui décrit par la Figure 2.1. La méthode de *fusion* combine ces deux zones pour en construire une seule, la *zone de localisation probable,* correspondant à l'intersection des deux *zones de localisation compatibles.* Toutefois, comme pour la figure 2.1, cette représentation est grandement simplifiée et le processus de fusion des *zones de localisation compatibles* peut aboutir à la construction de ZLP de formes plus complexes, voire fragmentées [4].

La *spatialisation* des *indices de localisation* en des *zones de localisation compatibles* et leur *fusion* en une *zone de localisation probable* sont les deux étapes majeures nécessaires à la transformation d'une description de localisation en une *zone de localisation* et sont, par conséquent, au cœur des deux objectifs principaux de cette thèse, à savoir le développement de méthodes de *spatialisation* et de *fusion* qui soient adaptées à notre contexte applicatif. En effet, les deux exemples schématiques présentés ignorent tous les problèmes que l'on peut rencontrer dans des cas réels, comme la possible fausseté des *indices de localisation,* le fait que ces derniers ne soient pas connus de manière concomitante, la difficulté d'interpréter la sémantique des *relations de localisation* ou de constuire une ZLC aux contours nets, *etc.* Les méthodes de *spatialisation* et de *fusion* devront donc prendre en compte ces différents enjeux pour être applicables à notre contexte.

2.2 Objectifs scientifiques de la thèse

La nécessité de concevoir des méthodes de *spatialisation* des *indices de localisation* et une méthode de *fusion* des *zones de localisation compatibles* qui soient adaptées aux contraintes de notre contexte applicatif nous a conduit à identifier quatre objectifs scientifiques pour cette thèse : (1) la spatialisation des indices de localisation ; (2) la modélisation de l'imprécision des indices de localisation ; (3) la modélisation de l'incertitude ; et (4) la fusion des indices de localisation. Cette partie se destine à présenter ces différents objectifs. On trouvera une synthèse des objectifs scientifiques, ainsi que de leurs verrous et des contributions attendues, dans le Tableau 2.1 page 47.

3. La spatialisation des indices de localisation « la victime voit une partie de plan d'eau » et « elle vient de passer du soleil à l'ombre » aboutirait à un résultat considérablement plus complexe.

4. Il convient de préciser que, même dans ce cas, nous parlerons de *zone de localisation probable* au singulier, considérant qu'il existe qu'une seule ZLP, le résultat de la *fusion.*

2.2.1 La *spatialisation* des *indices de localisation*

La construction d'une *zone de localisation compatible* nécessite de définir des méthodes de *spatialisation* permettant de traiter des *indices de localisation* aussi différents que : (a) « la victime est sous une route », (b) « je vois une montagne », ou (c) « j'ai marché plusieurs heures ». Comme nous l'avons expliqué, les *indices de localisation* sont composites. La position du *sujet* est donnée par la *relation de localisation,* par rapport à *l'objet de référence.* L'élaboration d'une méthode de *spatialisation* présuppose donc de travailler à l'identification de la sémantique des *relations de localisation* et d'en proposer une modélisation formelle.

Comme notre objectif est de proposer des solutions de *spatialisation* et de *fusion* s'intégrant dans la démarche actuelle des secouristes, nous pouvons envisager d'exploiter leur expertise pour réaliser certaines actions, comme l'écoute et l'analyse du discours du *requérant,* qui seraient difficilement automatisables par ailleurs. En effet, il n'est ni nécessaire, ni souhaitable, d'automatiser entièrement le processus de localisation de la victime, ce qui nécessiterait, par ailleurs, de développer des solutions d'analyse automatisée du langage oral. Cependant, cette étape ne concerne pas notre travail et ne sera donc pas abordée ici, puisque nous choisissons de confier cette tâche de « sémantisation » de la description orale d'une position au secouriste. Notre travail se limitera donc à identifier les « types » de descriptions utilisés dans notre contexte, de les exprimer dans un vocabulaire controlé, puis d'en proposer une modélisation à même d'en permettre la *spatialisation.*

2.2.1.1 Contexte scientifique

La question de la *spatialisation* d'une position décrite en langage naturel peut sembler être un sujet dont les applications sont limitées à des cas très spécifiques, comme l'est notre contexte applicatif. Cependant, en cherchant à améliorer le traitement de données géographiques exprimées en langage naturel, ces travaux œuvrent à faciliter la communication entre machines et êtres humains. En effet, comme l'illustre le concept de *Naive geography*, proposé par Egenhofer et al. (1995), la représentation informatique de positions et plus généralement, d'objets géographiques, est assez éloignée de la façon dont les hommes et les femmes conçoivent l'espace et leur localisation. Pour des raisons techniques, il est beaucoup plus simple, pour un ordinateur, d'identifier et de manipuler les coordonnées d'un point à la surface de la terre avec une précision submétrique, que d'identifier la position correspondant à la description : « le café sous ma maison », tandis que cette dernière est pourtant beaucoup plus compréhensible pour un être humain (Duchêne et al. 2019). L'interprétation de ce type de description se heurte, en effet, à plusieurs problèmes. Tout d'abord, il est difficile d'identifier la sémantique des termes utilisés, celle-ci étant dépendante du contexte. Reprenons l'exemple du « café ». Vous aurez très certainement compris en lisant cet énoncé que « le café » était un lieu. Toutefois, pour en arriver à cette conclusion, il a fallu comprendre qu'il s'agissait d'une métonymie et, par conséquent, que le terme « café » désigne ici un lieu et non une boisson psychotrope ou le moment où on la consomme, ou les grains du caféier. C'est le contexte d'utilisation, où le mot « café » est couplé à une *relation de localisation,* qui permet de comprendre qu'il s'agit d'un objet géographique et donc, que l'interprétation la plus vraisemblable est que l'on parle ici d'un bar. De la même manière, le terme « ma maison », peut être interprété comme un synonyme d'« habitat individuel » ou comme une nouvelle métonymie désignant « mon foyer ». Dans ce cas, c'est l'adjectif possessif « ma » qui permet de trancher. Comme le montrent ces deux exemples, bien qu'il soit assez facile pour un être humain d'interpréter ces deux phrases, il est nécessaire de

prendre en compte beaucoup d'éléments pour permettre à un ordinateur de les interpréter. Cet exemple porte sur l'interprétation automatisée du langage naturel dans le cas général, mais les mêmes problèmes s'appliquent également aux *relations de localisation.* Dans cet exemple, le « café » est « sous » mon domicile, mais comment identifier les positions qui sont effectivement « sous ma maison » ? Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier la sémantique des *relations de localisation* et notamment de celles utilisées dans notre contexte applicatif.

La formalisation des *relations de localisation*

Ce travail d'identification et de formalisation des *relations de localisation* a été entrepris par de nombreux chercheurs, comme Vandeloise (1986), qui a proposé une analyse complète de la sémantique de *relations de localisation* utilisées en français. Ce travail a été consolidé par les travaux de Borillo (1998), qui portent, quant à eux, sur la morphologie des descriptions de position, ou de Aurnague et al. (1993, 1997), qui iront jusqu'à proposer une formalisation logique des *relations de localisations.* Des travaux similaires ont été entrepris pour la langue anglaise, notamment par (Carlson et al. 2005 ; Freksa et al. 2018 ; Kracht 2002 ; Lang et al. 1991 ; Mark et al. 1999 ; Matsakis et al. 2010). En 2010 Bateman et al. (2010), proposerons *l'ontologie* GUM, qui formalise l'ensemble des *relations de localisation.* L'ensemble de ces travaux permet d'avoir de nombreuses connaissances sur la sémantique des *relations de localisation.* Pourtant, de nombreux autres travaux ont eu besoin de spatialiser des *relations de localisation.*

Parmi les applications de spatialisation des *relations de localisation,* on peut retrouver des travaux en analyse d'image (Bloch 1996 ; Hudelot et al. 2008a,b ; Takemura et al. 2012 ; Vanegas et al. 2011), en robotique (Skubic et al. 2004) ou encore en sciences de l'information géographique (Dittrich et al. 2015 ; Du et al. 2016 ; Hall et al. 2015 ; Hornsby et al. 2009 ; Mathet 2000 ; Wolter et al. 2018 ; Xu 2007 ; Xu et al. 2007, 2006).

2.2.1.2 Verrous scientifiques

L'élaboration d'une méthode de *spatialisation* se heurte néanmoins à deux verrous majeurs, l'un intrinsèquement lié à cet exercice, l'autre dépendant de notre contexte applicatif.

Le premier verrou est la grande variabilité sémantique des préposition spatiales. Ces dernières peuvent, en effet, prendre des sens légèrement différents, en fonction du contexte (Bateman et al. 2010). Par exemple, on peut être « sous *un pont* », ce qui implique une notion de recouvrement, ou « sous *une route* », ce qui n'implique pas de recouvrement. Ainsi, une même préposition spatiale peut décrire des relations de localisation différentes, par exemple un « sous avec recouvrement » et un « sous sans recouvrement ». Les méthodes de *spatialisation* développées ne pourront pas directement traiter les prépositions spatiales comme des *relations de localisation,* mais elle devront s'adapter à ces différentes *relations de localisations,* au risque de construire une *zone de localisation compatible* qui ne soit pas représentative de la description donnée par le *requérant.*

Le second verrou est lié au manque d'exhaustivité et à la redondance des *indices de localisation* à notre disposition pour développer et tester nos méthodes de spatialisation. Les seules données dont nous disposons (et pouvons disposer) sont des enregistrements audio d'alertes, traitées par différents PGHM. Or, il existe peu de redondances entre chacune de ces alertes, ce qui rend leur confrontation difficile. Par exemple, nous n'avons pas à notre disposition, deux enregistrements différents, décrivant la même position, avec les mêmes *indices de localisation.*

Nous ne pouvons donc pas estimer la divergence des descriptions d'une même position. De même, les *indices de localisation* utilisés sont si divers, qu'un même *indice de localisation* n'est que rarement utilisé pour décrire des positions différentes, à l'exception notable des *indices de localisation* de la forme : « Je suis *sur* [un chemin, une route, un sentier, etc.] ». Il nous est donc impossible d'élaborer notre méthode de *spatialisation* uniquement à partir de données issues des alertes passée.

Pour répondre à ces verrous scientifiques, nous proposons d'identifier les *relations de localisation* utilisées dans notre contexte applicatif. Nous émettons l'hypothèse que seul un sous-ensemble des *relations de localisation* présentes dans la langue française est utilisé, du moins régulièrement, pour décrire une position en montagne. L'identification de ces *relations de localisation* nous permettra, d'une part, de déterminer les spécificités de la description d'une position en langage naturel dans un contexte montagnard et, de l'autre, de nous concentrer exclusivement sur la modélisation de ces *relations de localisation.*

Ce travail sera complété par un travail d'identification de la sémantique des relations de localisation utilisées dans notre contexte. Il est, en effet, possible que les *relations de localisations* utilisées dans notre contexte, le soient dans un sens particulier, plus réduit que le sens général. Ainsi, nous allons compléter le recensement des *relations de localisation* utilisées dans notre contexte, par un travail d'identification de leur sémantique, dans ce même contexte.

Ce travail de recensement sera également entrepris pour les *objets de référence.* Comme pour les *relations de localisation,* on peut supposer que seule une petite partie des objets pouvant être utilisés comme points de repères, le sont réellement dans ce contexte. On s'attendra, par exemple, à trouver des *indices de localisation* tels que « je suis au niveau *du sommet* » ou « la victime est dans *une combe* », alors que la phrase : « je suis proche *d'un kiosque* », semble peu probable. Comme pour les *relations de localisation,* l'identification et le recensement de ces objets permettront d'avoir, à la fois une meilleure connaissance des descriptions de positions dans le contexte du secours en montagne, mais aussi de focaliser notre travail sur les objets les plus pertinents.

Ces objectifs nous permettront de développer une méthode de *spatialisation* de ces *indices de localisation* et d'en proposer une implémentation fonctionnelle. La méthode mise en œuvre devra être suffisamment générique pour fonctionner avec les différentes *relations de localisation* et les différents *objets de référence* identifiés, tout en prenant en compte leurs spécificités, dans le but de proposer une *spatialisation* précise et adaptée au contexte du secours en montagne, mais suffisamment générique pour être enrichie ultérieurement, voire étendue à des contextes différents.

2.2.2 La modélisation de *l'imprécision* des *indices de localisation*

Le travail d'identification de la sémantique des *relations de localisation* se heurte à un autre problème, celui de l'interprétation du locuteur. En effet, les *relations de localisation* que nous cherchons à sémantiser sont des concepts formulés en langage naturel et donc, soumises à son *imprécision.* Par conséquent, la *limite* entre la zone qui correspond à un *indice de localisation* et celle qui n'y correspond pas, n'est pas nécessairement, voire jamais, une ligne bien identifiée. Les conséquences de ce fait sont multiples. D'une part, cela complique la formalisation des *relations de localisation.* En effet, comment définir formellement un concept, alors que l'on peine à en fixer les limites ? Vandeloise (1986) se montre même particulièrement critique [5] envers les travaux

5. « Aucun mot spatial ne se prête à une description aussi rigide et des contre-exemples peuvent être trouvés à toutes les définitions proposées. » (Vandeloise 1986, p. 18)

proposant une formalisation des *relations de localisation* à l'aide de la logique — classique — du premier ordre. En effet, la logique *classique*[6], repose sur un principe de *bivalence,* qui implique qu'une *proposition* logique est soit « vraie », soit « fausse ». Formaliser des *relations de localisation* à l'aide de la logique classique implique donc de définir une limite claire entre la zone où la *relation de localisation* est vérifiée et celle où elle ne l'est pas. Dans les faits, cette limite ne peut être qu'arbitraire. Prenons pour exemple la *relation de localisation* « proche de » et considérons que la distance, seule, est un critère de modélisation satisfaisant. On pourra dire d'un point adjacent à un bâtiment qu'il en est *proche.* De même, si l'on s'en éloigne un tout petit peu, mettons d'un mètre, cette description reste correcte. En prolongeant ce raisonnement par récurrence, on pourra augurer que toute position, quelle que soit sa distance à *l'objet de référence,* en est *proche.* Ce raisonnement, calqué sur le paradoxe sorite[7], illustre la difficulté à fixer une limite *précise* à des concepts qui ne le sont pas. Pourquoi une position serait-elle proche d'un objet, alors que celle qui en est éloignée d'un pas ne l'est pas ? (Fisher 2000) Bien que courante, cette modélisation est une simplification extrême de la sémantique de la *relation de localisation* « proche de ».

Ces considérations peuvent sembler inutilement complexes, d'autant plus que notre objectif est applicatif, pourtant elles sont indispensables. Ne pas tenir compte de *l'imprécision* des *relations de localisation* pourrait conduire à ignorer des zones pertinentes ou, au contraire, à proposer une modélisation trop laxiste en cherchant à éviter les faux positifs. C'est pourquoi il nous semble indispensable de prendre systématiquement en compte *l'imprécison* lors de la *spatialisation* des *relations de localisation.*

2.2.2.1 Contexte scientifique

Si le paradoxe sorite, déjà présenté, a été formulé au IVème siècle av. J.-C., *l'imprécision* ne fut réellement étudiée qu'à partir de la fin du XIXème siècle (Williamson 1994), avec le développement de la logique mathématique dont la première formalisation est *l'idéographie* du mathématicien Frege (1879)[8]. Ce dernier défend son projet idéographique avec, en 1882, la publication de *Que la science justifie le recours à une idéographie* (Frege 1882)[9]. Dans cet article, Frege soutient que *l'imprécision* du langage naturel est source d'erreurs de raisonnement et d'interprétation et que, par conséquent, les sciences ne peuvent s'en contenter. Elles nécessitent un moyen d'expression plus rigoureux, un langage formel, *l'idéographie.* Cette « méfiance » envers le langage naturel est également partagée par Russell (1923), qui propose une formalisation du concept de *vague,* synonyme *d'imprécision.* Selon sa définition, *l'imprécision* est intrinsèquement liée à la représentation de la réalité par un *système de signes,* quel qu'il soit. Ces derniers ne sont pas *imprécis* dans l'absolu, c'est la relation entre deux *systèmes de signes* qui est qualifiée de *précise* ou *d'imprécise.* Cette dernière est qualifiée de *précise* lorsqu'il existe une bijection entre les deux ensembles de signes, *i.e.* que chaque signe a un seul et unique équivalent. Par conséquent, le passage d'un *système de signes* à l'autre est sans équivoque. Dans le cas contraire, un même signe peut être « traduit » de diverses façon, laissant

6. C'est-à-dire, telle que formulée au début du XIXème siècle, principalement par Frege dans son *Idéographie* (*Begriffsschrift*).

7. Ce paradoxe, formulé par le philosophe Grec Eubulide au IVème siècle av. J.-C., pose deux prémisses. La première est qu'un seul grain de sable ne forme pas un tas de sable. La seconde est qu'ajouter un grain de sable à un non-tas n'en fait pas un tas. Par récurrence, on aboutit à la conclusion, absurde, que, quel que soit le nombre de grains de sable, ils ne peuvent pas former de tas (Hyde et al. 2018 ; Sorensen 2018).

8. Pour une traduction française voir Frege (1999).

9. Voir Frege (2019) pour une traduction récente.

dès lors place à l'interprétation.

Par exemple, la *relation de localisation* « sous » en français a deux traductions en anglais, "*under*" et "*below*", à la sémantique légèrement différente. "*Under*" implique en effet que le sujet soit à proximité immédiate, voire recouvert par l'objet de référence, alors que "below" n'impose pas cette condition : il s'agit d'un « sous » plus large et moins contraint. On dira, par exemple : "The owl is under the bed", car il y a ici une notion de recouvrement, mais "My car is in the street below", car la route n'est pas directement sous la position du locuteur.

Le concept *d'imprécision* est généralement rapproché d'autres concepts. En intelligence artificielle, par exemple, *l'imprécision* est définie comme étant une des composantes de *l'imperfection* avec *l'incertitude,* que nous présenterons ci-dessous et *l'incomplétude,* désignant le manque de connaissances (Bouchon-Meunier 1995, 2007). D'autres typologies existent cependant. Niskanen (1989), par exemple, ne parle pas « *d'imperfection* », mais de « *non-précision* » et découpe cette notion en quatre composantes : *généralité, ambiguïté, imprécision* et *incertitude.*

La modélisation de *l'imprécision*

Divers cadres théoriques ont été développés pour modéliser *l'imprécision.* Si la logique classique n'en reconnaît pas l'existence, d'autres formalisations intègrent directement cette notion dans leur grammaire. C'est le cas des logiques multivalentes, comme la logique de Łukasiewicz ou la logique floue (Sorensen 2018 ; Williamson 1994). Ces logiques alternatives permettent de raisonner sur des valeurs de vérité intermédiaires, entre le « vrai » et le « faux », et permettent de répondre au paradoxe sorite et autres raisonnements jouant sur *l'imprécision* du langage naturel. Pour reprendre notre exemple précédent, si l'on se rapproche peu à peu d'un objet, on finira par pouvoir décrire notre position comme étant « proche » de cet objet. Avec un raisonnement fondé sur la logique classique, on est contraint de définir arbitrairement la limite entre les positions qui sont « proches » de l'objet considéré et celles qui ne le sont pas, alors que les logiques multivalentes permettent de définir un entre-deux, une partie de l'espace où les propositions logiques : « je suis proche » et « je ne suis pas proche » sont toutes les deux fausses ou partiellement vraies, en fonction de l'approche retenue. Tye (1994), par exemple, propose une modélisation basée sur une logique trivalente, dont les valeurs de vérités sont : « vrai », « faux » et « indéterminé ». Avec cette modélisation, la zone située entre celle validant la proposition « je suis proche » et celle ne la validant pas, a une réponse « indéterminée » à cette proposition. Cette approche est assez différente des solutions fondées sur la logique floue, qui considèrent que la proposition « je suis proche » a un degré de vérité qui décroit au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'objet en question. D'autres théories permettent également la prise en compte de *l'imprécision,* comme celle des ensembles approximatifs de Pawlak (1982), qui propose une modélisation trivalente, similaire à celle de Tye (1994) (Pawlak 1991), ou la théorie des fonctions de croyances (Shafer 1976) qui propose une modélisation de *l'imprécision* à travers la composition d'hypothèses singletons représentant un ensemble de solutions à un problème donné.

Imprécision et espace

Les implications spatiales du concept d'*imprécison* ont également été spécifiquement étudiées. Les notions de *limite* ou de *frontière* étant centrales en géographie, l'existence d'objets difficilement délimitables ne va pas sans poser quelques problèmes épistémologiques. Dès la fin des années 1970, des géographes comme Gale (1976) ou Leung (1979) ont travaillé à appli-

quer la logique floue au problème de la *régionalisation.* Toutefois, ces travaux ne nous semblent pas avoir eu un impact durable en géographie et de nouvelles propositions, que nous avons recensées (Bunel 2020), sont apparues au cours du temps. C'est principalement à partir des années 2000 que ces questions théoriques ont été remises au goût du jour. Collins et al. (2000), Smith et al. (2000) et Varzi (2001, 2015) ont, par exemple, travaillé sur la notion de frontière et son lien avec la notion *d'imprécision.* La question de la formalisation et de l'implémentation de modèles théoriques permettant la manipulation d'objets géographiques *imprécis* est, par ailleurs, un champ de recherche assez dynamique en sciences de l'information géographique (Bunel 2020). De nombreux modèles théoriques ont été proposés, qu'ils soient basés sur la théorie des ensembles approximatifs (Clementini et al. 1996 ; Cohn et al. 1996 ; Schneider 1996) ou la théorie des ensembles flous (Schneider 1999). La prise en compte et la modélisation de l'imprécision à travers les formalismes théoriques mentionnés ci-dessus a concerné de nombreux sujets et thématiques, comme la recherche en archéologie (Runz 2008 ; Zoghlami et al. 2016), en architecture (Arabacioglu 2010), en cartographie (Didelon et al. 2009, 2011), en traitement d'image (Brandtberg 2002), pour l'aide à la décision (Griot 2007 ; Makropoulos et al. 2003) ou en appariement de données géographiques (Olteanu 2008). Ces formalismes théoriques ont également été utilisés pour prendre en compte *l'imprécision* lors de la *spatialisation* de descriptions de positions, appliquée à l'interprétation automatisée d'images médicales (Bloch 1996 ; Hudelot et al. 2008b ; Takemura et al. 2012 ; Vanegas et al. 2011).

2.2.2.2 Verrous scientifiques

Le premier des verrous à la prise en compte de *l'imprécision* est l'identification d'une théorie qui permette sa modélisation, tout en étant compatible avec la solution de *spatialisation* des *indices de localisation* retenue. Chaque théorie capable de modéliser *l'imprécision* ayant ses spécificités propres, il sera nécessaire de s'assurer de leur bonne intégration avec la méthode de spatialisation qui doit être définie.

Le second verrou est la question de l'évaluation de *l'imprécision.* En effet, s'il est acquis que les *relations de localisation* — et plus généralement le langage naturel — sont *imprécis,* il reste qu'ils peuvent l'être à des degrés divers. Pour l'illustrer, nous pouvons utiliser les *indices de localisation :* « je suis *proche de* Grenoble » et « je suis *aux alentours de* Grenoble ». Ces deux indices ont une signification semblable : tous deux renseignent sur la proximité du locuteur avec la ville de Grenoble. On aurait toutefois du mal à les considérer comme parfaitement équivalents, la relation de localisation « *aux alentours de* » nous semblant plus vague, c'est-à-dire que l'aire que l'on peut définir comme étant « *aux alentours de* Grenoble » est plus étendue que celle qui en est *proche.* On ne peut pas, pour autant, considérer que la *relation de localisation* « *proche de* » est *précise.* Ces deux relations sont *imprécises,* mais à des degrés divers et, si l'on peut les ordonner selon leur « degré *d'imprécision* », on ne saurait quantifier cet écart et donc leurs différents degrés *d'imprécision.*

Cette quantification est cependant une étape indispensable à la prise en compte de *l'imprécision* des *relations de localisation.* L'analyse de la sémantique des *relations de localisation* devra donc être complétée par une estimation de leur *imprécision* et les méthodes de spatialisation définies devront prendre en considération ces deux aspects.

2.2.3 La modélisation de *l'incertitude* des *indices de localisation*

Si la prise en compte de *l'imprécision* des *indices de localisation* permet d'améliorer la qualité de leur future modélisation, cette solution ne permet pas d'en gérer la plausiblité. En effet, certains *indices de localisation* donnés par le requérant peuvent être faux ou, du moins, sujets à caution et ce indépendamment de toute notion de *précision.* La prise en considération — aveugle — de ce type d'indices ne peut qu'impacter négativement la qualité de la *zone de localisation probable* créée par la *fusion* des *indices de localisation.* Les secouristes sont cependant, grâce à leur connaissance du terrain et à leur expérience, à même d'identifier la plupart de ces erreurs et approximations ou, tout du moins, d'émettre un doute sur la véracité de certains *indices de localisation.* La prise en compte de ces connaissances, exogènes à l'indice, nous semble très importante, en plus d'être un excellent moyen de limiter l'impact d'indices peu plausibles sur la qualité de la spatialisation.

2.2.3.1 Contexte scientifique

La notion *d'incertitude* est fortement liée à celle, précédemment présentée, *d'imprécision.* Comme cette dernière, cette notion qualifie une connaissance. Mais là où la notion *d'imprécision* désigne une caractéristique intrinsèque de la connaissance, *l'incertitude* est liée à l'observateur. Cs'est une caractéristique contextuelle qui qualifie le doute de l'observateur sur la véracité de la connaissance (Bouchon-Meunier 1995, 2007). Ces deux notions sont souvent confondues, notamment dans la littérature anglophone où des objets géographiques *imprécis* sont qualifiés *d'incertains*[10].

La prise en compte de *l'incertitude* n'est pas nécessairement possible avec les mêmes théories que celles utilisées pour modéliser l'imprécision. La logique floue, par exemple, permet la modélisation de *l'imprécision,* mais non de *l'incertitude,* à moins d'être complétée par la théorie des possibilités (Bouchon-Meunier 1995, 2007). Au contraire, la théorie des fonctions de croyances permet de modéliser *l'imprécision* et *l'incertitude* sans adaptations (Bouchon-Meunier 1995, 2007). Enfin, d'autres théories ne permettent que la modélisation de *l'incertitude,* sans prise en compte de *l'imprécision.* C'est par exemple le cas de la théorie des probabilités, du moins dans leur interprétation épistémique (Hájek 2019).

Nous n'avons pas connaissance de travaux portant uniquement sur la modélisation de *l'incertitude* d'objets géographiques. Cette dernière est toujours couplée à une modélisation de *l'imprécision.*

2.2.3.2 Verrous scientifiques

Les verrous à la prise en compte de *l'incertitude* sont identiques à ceux que nous avons identifiés pour la prise en compte de *l'imprécision.* Dans les deux cas, en effet, l'objectif est « d'enrichir » la *spatialisation* des *indices de localisation,* en y apportant la prise en compte de critères qui nous semblent indispensables, à savoir *l'imprécision des relations de localisations* et *l'incertitude* des *indices de localisation.* Dans les deux cas, nous devons veiller — et ce pour les mêmes raisons —, à ce que les théories et les méthodes qui vont être utilisées soient compatibles avec la méthode de *spatialisation,* mais également entre elles.

Le second verrou, également partagé avec *l'imprécision,* est la question de la quantification. En effet, disposer d'une estimation chiffrée de *l'incertitude* de *l'indice de localisation* est

10. Nous reviendrons sur ces points de vocabulaire dans la section 3.2.

nécessaire à sa prise en compte. La question est d'autant plus délicate que *l'incertitude,* contrairement à *l'imprécision,* est contextuelle. En effet, la présence du même *indice de localisation* dans deux alertes différentes n'implique pas qu'ils aient la même *incertitude,* contrairement à leur *imprécision* qui sera identique, car intrinsèquement liée à la sémantique de la *relation de localisation.* Ainsi, l'évaluation de *l'incertitude* devra être faite pour chaque *indice de localisation* d'une alerte donnée, contrairement à l'évaluation de *l'imprécision* qui peut être faire en amont, lors de l'identification de la sémantique des *relations de localisations* (section 2.1).

Le dernier verrou que nous avons identifié est que le processus de localisation de la victime, basé sur l'interprétation par le secouriste d'une description de position, n'offre aucune garantie quant à la *complétude* de cette description. La victime peut, pour de nombreuses raisons, oublier de donner certains détails de sa position qui pourraient être pertinents pour les secouristes. Ces derniers peuvent, bien entendu, poser des questions au requérant ou lui demander des précisions, mais cela ne garantit pas pour autant qu'un *indice* important, voire essentiel, ne puisse pas être oublié. Cette *incomplétude* de la description, que l'on peut aisément supposer systématique, a pour conséquence de rendre impossible la supposition de l'existence d'indices, qui n'ont pas été mentionnés explicitement par le requérant. Par exemple, ce n'est pas parce que la victime ne précise pas qu'elle est en forêt, qu'elle n'est effectivement pas en forêt, *i.e.* qu'un *indice* non connu du secouriste n'est pas nécessairement faux. Par conséquent, il est hasardeux, d'inférer qu'un *indice* est faux car il n'a pas été donné par une *description de position.*

2.2.4 La *fusion* des *indices de localisation*

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la construction de la *zone de localisation probable* nécessite de combiner les *zones de localisation compatibles* au cours d'un processus que nous nommons *fusion.* Son rôle est, en première approche, d'identifier la zone où tous les *indices de localisation* donnés par le requérant sont vérifiés. Cependant, les deux objectifs scientifiques précédents ont montré qu'il était nécessaire de prendre en compte deux éléments principaux, *l'imprécision* des *relations de localisation* et *l'incertitude* des *indices de localisation.* Par conséquent, les *zones* à fusionner, c'est-à-dire les *zones de localisation compatibles* seront *imprécises.* La méthode *fusion* que nous allons élaborer doit donc être capable de prendre en compte ces caractéristiques. Il est donc nécessaire d'identifier une méthode qui soit compatible avec la théorie de modélisation de l'imprécision utilisée pour spatialiser les *indices de localisation* et la théorie de modélisation de *l'incertitude* utilisée.

2.2.4.1 Contexte scientifique

Si le terme de *fusion* qualifie, dans notre travail, une opération très spécifique, qui consiste à combiner plusieurs zones construites en spatialisant des *indices de localisation,* l'usage de termes de *fusion d'imformations* ou de *fusion de données* peut s'appliquer à un grand nombre de méthodes permettant de réduire l'information. Comme l'indique Castanedo (2013), la fusion d'informations peut s'appliquer à de nombreux domaines de recherche. Il s'agit par conséquent d'un sujet abondamment étudié.

Dans un premier temps, des méthodes de classification comme les *k-means* peuvent être considérées comme de la fusion d'information, car elles permettent de regrouper les individus selon un comportement commun. De même, les analyses factorielles permettent également de fusionner des informations multiples, en synthétisant le comportement de différentes variables. Les méthodes de *fusion des données* ne se limitent pas aux modèles statistiques et d'autres

théories, comme la théorie des fonctions de croyances ou celle des sous-ensembles flous, permettent de fusionner des informations provenant de sources diverses. Cette démarche est, par exemple, au cœur du travail de Olteanu (2008) qui a été amenée à fusionner des informations issues de données géographiques et de connaissances métier dans le but d'appareiller les objets issus de bases de données différentes, représentant le même objet du monde réel. Dans ce cas, la fusion des informations est réalisée à l'aide d'un opérateur particulier de la *théorie des fonctions de croyances* (Shafer 1976), utilisée durant tout ce travail pour permettre la modélisation de *l'imprécision* et de *l'incertitude.*

2.2.4.2 Verrous scientifiques

Le processus de *fusion* des indices est une opération qui se déroule après la *spatialisation* des différents *indices de localisation.* Par conséquent, il s'agit d'une opération qui est fortement impactée par les choix méthodologiques effectués en amont, comme, par exemple, celui de la théorie de modélisation de *l'imprécision* des *relations de localisation.*

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus (2.2.2 et 2.2.3), nous souhaitons que la prise en compte de *l'imprécision des relations de localisation* et de *l'incertitude* des *indices de localisation* soit intrinsèque à la méthode de *spatialisation* des *indices de localisation* (2.2.1). Il est, par conséquent, nécessaire qu'il en soit de même pour la méthode de *fusion* des *zones de localisation compatibles.* Or, ces deux composantes sont, par définition, variables. Deux indices issus d'une même alerte peuvent avoir une *incertitude* évaluée différemment par le secouriste. Ce peut être, par exemple, le cas si un requérant décrit sa position comme étant : « proche d'un chalet et probablement au sud du sommet ». Dans ce cas, le premier *indice de localisation* : « je suis proche d'un chalet », serait sûrement, considéré comme plus *certain* que le second : « je suis probablement au sud sommet ». La méthode de *fusion* des *indices de localisation* doit donc être capable de prendre en considération cette différence entre les deux indices, par exemple en les pondérant. De la même manière, des certitudes différentes entre les indices de localisation doivent pouvoir être prises en compte lors du processus de *fusion.*

Un autre point important est que le processus de *fusion* sera potentiellement utilisé plusieurs fois lors du traitement d'une alerte. En effet, les *indices de localisation* sont donnés par le requérant, au fur et à mesure de l'appel téléphonique[11], parfois en réponse aux questions des secouristes. L'ensemble des *indices de localisation modélisés* est donc amené à évoluer, comme la *zone de localisation probable* qui résulte de la *fusion* des ZLC les spatialisant. La méthode de *fusion* doit donc prendre cet aspect en considération et nous devons veiller à ce que les résultats de ce processus ne soient pas impactés par l'ordre de la *fusion.*

Un dernier verrou,x fortement lié à la question de la modélisation de *l'incertitude,* est celui de la gestion des conflits entre indices. Il n'est, en effet, pas exclu que deux indices d'une même alerte se contredisent, rendant dès lors impossible la construction de la *zone de localisation probable.* La prise en compte de *l'incertitude* des indices permet, en partie, de contourner ce problème.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'objectif principal de cette thèse, qui consiste à transformer une description de position en une zone de coordonnées connues. Comme nous l'avons

11. Et donc du processus de localisation.

montré dans la première partie de ce chapitre (2.2.1), cette question se décompose, en réalité, en deux étapes distinctes. La première consiste à construire des *zones de localisation* à partir des *indices de localisation* donnés par le requérant, au cours d'une opération nommée : *spatialisation.* La seconde étape consiste à *fusionner* toutes ces zones pour construire la *zone de localisation probable,* c'est-à-dire la zone qui vérifie tous les *indices de localisation.*

Le développement de ces deux méthodes est fortement contraint par les caractéristiques du langage naturel. Un même mot peut prendre plusieurs sens, difficiles à distinguer. De plus, les *indices de localisation* peuvent être faux, ce qu'il faut également prendre en compte. Les cinq objectifs scientifiques de la thèse visent à répondre à ces problèmes. Le traitement de chacun d'entre-eux fera l'objet d'un chapitre spécifique dans les parties II et III.

Objectif scientifique	Verrous	Apports envisagés

La *spatialisation* des *indices de localisation*
⟶ Chapitre 7
	— Variation sémantique des *relations de localisation*
	— Faible redondance des *indices de localisation*
		— Recensement :
		  — des *relations de localisation*
		  — des *objets de référence*
		— Identification de la sémantique des *relations de localisation*
		— Définition d'une méthode de *spatialisation*

La modélisation de *l'imprécision* des *indices de localisation*
⟶ Chapitre 7
	— Intégration de *l'imprécision* à la *spatialisation*
	— Quantification de *l'imprécision* des *relations de localisation*
		— Définition d'une méthode :
		  — de prise en compte de *l'imprécision* des *relations de localisation*
		  — de quantification de *l'imprécision* des *relations de localisation*

La modélisation de *l'incertitude* des *indices de localisation*
⟶ Chapitre 8
	— Intégration de *l'incertitude* à la *spatialisation*
	— Quantification de *l'incertitude* des *indices de localisation*
		— Définition de méthodes :
		  — de prise en compte de *l'incertitude* des *indices de localisation*
		  — de quantification de *l'incertitude* des *indices de localisation*

La *fusion* des *indices de localisation* ⟶ Chapitre 8	— Compatibilité avec la spatialisation — Gestion des conflits	— Définition d'une méthode de fusion

Table 2.1 – Synthèse des verrous et des apports attendus pour chaque objectif scientifique de la thèse

Chapitre 3

État de l'art

Introduction 49
3.1 *L'imprécision* et sa modélisation 50
3.1.1 Les concepts de *vague* et d'*imprécision* spatiale 51
3.1.1.1 Imprécision et géographie 54
3.1.1.2 L'imprécision spatiale 55
3.1.2 La modélisation de l'imprécision spatiale 61
3.1.2.1 La théorie des sous-ensembles flous 61
3.1.2.2 La théorie des *ensembles approximatifs* 68
3.1.3 Modélisations et implémentations 68
3.1.3.1 Critères de classification 69
3.1.3.2 Modèles basé sur une construction en intension 70
3.1.3.3 Modèles basés sur une construction en extension 76
3.2 Les *relations de localisation* et leur modélisation 79
3.2.1 Éléments généraux sur la localisation par référencement indirect et formalisation d'une relation de localisation 79
3.2.1.1 Les concepts de *sujet* et *d'objet de référence* 79
3.2.1.2 *Relations spatiales et relations de localisation* 80
3.2.1.3 Contexte d'interprétation et cadre de référence 81
3.2.1.4 Modélisation formelle d'un *indice de localisation* 81
3.2.2 Classification et ontologies des *relations de localisation* 83
3.2.2.1 Classification des *relations de localisation* 83
3.2.2.2 Taxonomies et ontologies des *relations de localisation* 85
3.2.3 Travaux sur la modélisation des différentes familles de relations 86
3.2.3.1 Les relations topologiques 87
3.2.3.2 Les relations de distance 91
3.2.3.3 Les relations projectives 96
3.2.3.4 Les relations de visibilité 98
Conclusion 99

Introduction

Ce chapitre se destine à dresser un état de l'art des objectifs scientifiques de la thèse, présentés au chapitre précédent. Nous allons nous concentrer sur deux points principaux, qui

nous semblent être, à la fois les objectifs les plus difficiles à traiter, mais également les plus importants de ce travail de doctorat, à savoir la question de la *spatialisation* des *indices de localisation* et la prise en compte de *l'imprécision* des *indices de localisation.*

La première partie de cet état de l'art présentera la notion *d'imperfection* (également abordée dans le chapitre précédent) et ses trois composantes (*imprécision, incertitude* et *l'incomplétude*). Nous donnerons une définition détaillée de ces concepts et de leurs équivalents spatiaux, puis nous présenterons les différentes théories les formalisant. Enfin, nous nous focaliserons sur *l'imprécision spatiale* et présenterons les modèles proposés dans la littérature pour construire des *objets géographiques imprécis,* dans le but d'identifier une méthode nous permettant de modéliser l'imprécision des *indices de localisation* et des *zones de localisation compatibles* et *probables* en résultant.

La seconde partie de cet état de l'art sera donc consacrée à la notion de *relation de localisation* et aux solutions proposées dans la littérature pour les modéliser. Nous détaillerons les concepts de *sujet, objet de référence* et *relation de localisation,* introduits dans le chapitre précédent. Nous présenterons ensuite les différentes classifications des *relations de localisation* qui ont été proposées dans la littérature. Puis, nous détaillerons les différents modèles qui ont été proposés dans la littérature pour modéliser, interpréter ou spatialiser ces *relations de localisation.*

3.1 *L'imprécision* et sa modélisation

Lorsque George Perec relate sa visite d'une maison usonienne[1] du Michigan, il en décrit le délicat cheminement vers l'intérieur :

> On commençait par suivre un sentier [...]. Peu à peu, [...] sans qu'à aucun instant on ait été en droit d'affirmer avoir perçu quelque chose comme une transition [...], le sentier devenait [...] une allée [...]. Puis apparaissait [...] une toiture [...] pratiquement indissociable de la végétation [...]. Mais en fait, il était déjà trop tard pour savoir si l'on était dehors ou dedans. (Perec 1974, pp. 52-53.)

Les jeux avec l'environnement et les matériaux, relevés par l'écrivain, sont les éléments d'un parcours savamment orchestré par l'architecte pour fondre la construction dans son environnement, trompant le visiteur et l'empêchant d'identifier une délimitation claire entre dehors et dedans ; deux espaces tacitement considérés comme immiscibles. Ainsi, en lieu et place d'une rupture franche, c'est une transition progressive qui les sépare, rendant la définition d'une limite, autre qu'arbitraire, impossible. Or, la délimitation d'espaces cohérents est centrale dans la réflexion géographique et l'existence d'objets spatiaux difficilement délimitables ne va pas sans soulever des questions techniques et épistémologiques (Burrough et al. 1996a), auxquelles de nombreux travaux, comme ceux cherchant à délimiter des espaces à partir de ressentis (Arabacioglu 2010), de descriptions de positions (Bunel et al. 2019a ; Jones et al. 2007 ; Wolter et al. 2018) ou de cartes mentales (Dutozia et al. 2014), ont été confrontés. Ces différents travaux ont pour point commun d'avoir nécessité l'emploi de modèles avancés, permettant la représentation d'objets spatiaux aux frontières mal délimitées. Mais le grand nombre de modèles de ce type et l'absence de consensus pour l'un d'eux rend délicat leur recensement et leur analyse en vue d'une application originale.

1. Néologisme de Frank Lloyd Wright, créé comme synonyme de l'adjectif « américain ». Le terme est aujourd'hui utilisé pour qualifier des petites maisons individuelles, construites en harmonie avec leur environnement, une part importante de l'œuvre construit de l'architecte.

Nous présentons avant tout une catégorisation des différents modèles proposés dans la littérature, mais nous présenterons également le cadre conceptuel au quel ils se rattachent et notamment la notion d'imprécision au centre de ces questions. Les différentes implémentations des modèles présentés seront également abordées. Notre ambition est de traiter tous les aspects du problème, en partant des aspects les plus théoriques et conceptuels (définition des termes et présentation des théories de rattachement), avant d'aborder des points plus techniques (implémentations), en passant par la présentation des différentes modélisations proposées dans la littérature.

Nous ne souhaitons cependant pas proposer une typologie originale des différents concepts, la question ayant déjà été largement traitée (Bouchon-Meunier 1995 ; Devillers et al. 2019 ; Fisher et al. 2006). Nous présenterons également les différentes théories mathématiques permettant la modélisation de l'imprécison, comme l'ont récemment proposé Batton-Hubert et al. (2019), ainsi que les implémentations de modèles proposées. Nous commencerons par présenter plus abondamment ces notions et définir les différents concepts, tels que le vague ou l'imprécision, nécessaires à leur compréhension. Puis nous énumérerons les différentes théories mathématiques permettant de modéliser l'imprécision. Enfin nous présenterons les différentes modélisations de l'imprécision spatiale proposées dans la littérature.

3.1.1 Les concepts de *vague* et d'*imprécision* spatiale

Pour commencer, nous allons définir les notions d'*imprécision* et de *vague* et présenter leurs spécificités lorsqu'elles sont appliquées au contexte spatial. Nous présenterons d'abord les notions dans leur ensemble, avant de nous concentrer sur les liens entre *imprécision* et géographie ; puis, nous définirons *l'imprécision spatiale,* concept qui sera utilisé tout au long de cet état de l'art. L'exercice de définition d'un concept équivoque, tel que le vague, n'est pas une tâche aisée, car l'on est rapidement confronté à l'imprécision sémantique du langage naturel. C'est, en partie, ce constat qui conduisit les philosophes Gottlob Frege (1848–1925) et Bertrand Russell (1872–1970) à travailler sur une formalisation mathématique de la logique, à même d'affranchir le processus de réflexion des ambiguïtés du langage naturel (Williamson 1994). La réflexion contemporaine sur les notions de précision, de vague et d'imprécision remonte, selon Williamson (1994), aux travaux de Russell et plus spécifiquement à la publication, en 1923, de son article *Vagueness* (Russell 1923). Pour Russell (1923), le vague est l'opposé de la précision. Les deux concepts ont pour domaine tout système de signes et ne se limitent donc pas au langage naturel. Ils concernent tout type de représentation (*e.g.* cartes, photographies, mots) et n'ont donc de sens que pour qualifier une relation entre deux systèmes de signes, définie comme précise si bijective, *i.e.* pour un système de signes donné, quel que soit le signe considéré, il ne partage sa signification qu'avec un et un seul signe d'un second système de signes. À l'inverse, la relation entre deux systèmes de signes est vague si une représentation a plus d'un (ou aucun) équivalent dans le second système, laissant dès lors place à l'interprétation. Pour illustrer le concept de vague, Russell prend l'exemple du mot « rouge » décrivant une teinte tacitement connue de tous, mais dont on ne peut qu'arbitrairement fixer les limites. Le travail proposé par Smith (2018) donne une autre illustration de ce phénomène. La figure 3.1 donne les résultats d'un sondage effectué courant 2018 auprès d'un panel d'environ 1000 britanniques [2]. Il était demandé aux sondés de donner la note (entière) relatant au mieux le sens d'un adjectif. Les courbes représentés sur la figure 3.1 représentent la distribution des

2. L'effectif varie en fonction de la question posée. L'effectif minimum est de 1005 sondés et l'effectif maximum de 2194 sondés.

	Anglophone	Francophone
Précis	*Crisp, Sharp, Well defined, Fiat boundaries*	Net
Imprécis	*Fuzzy, Indeterminate, Undefined, Uncertain, Ill-Defined, Unclear, Vagueness, Bona fide boundaries*	Flou, Incertain, Vague

Table 3.1 – Termes utilisés dans la littérature comme synonymes de précis et d'imprécis

notes, pour chaque adjectif. Ces distributions ce distinguent par leur moyenne, qui représente la sémantique de l'adjectif et leur écart-type, qui, en mesurant l'importance de la variabilité des notes, donne une illustration directe de *l'imprécision* de ces concepts, tout du moins dans ce contexte particulier. Ainsi, plus une courbe est « étalée », plus le concept est *imprécis.* À cet égard, la comparaison des adjectifs "*Average*" et "*Not bad*" est particulièrement intéressante. En effet ces deux concepts possèdent une moyenne très proche — aux alentours de 5,10 —, mais leur écart-type est très différent. Là où la plupart des sondés considèrent qu'à l'adjectif "*Average*" correspond la note de 5, les réponses sont plus dispersées pour l'adjectif "*Not Bad*", puisque des sondés ont donné des notes de 3 ou 7. Ainsi on peut constater que, dans ce contexte, l'adjectif "*Not bad*" est moins précis qu'"*Average*". Il est plus difficile d'en fixer les limites. De la même manière, les concepts de lac et île ne sont pas suffisamment précis pour que leur dénombrement soit trivial (Sarjakoski 1996). On pourrait multiplier les exemples à loisir, car, dans la conception russellienne, aucun domaine n'échappe au vague ; toute représentation l'est [3], à des degrés divers, et la précision n'est qu'un idéal, hors d'atteinte.

Dans la littérature, le terme imprécis est régulièrement utilisé comme synonyme de vague, notamment par Zadeh (1965) et dans une grande partie des travaux se rattachant à la logique floue. Par métonymie, le terme flou [4] est également employé dans le sens de vague, imprécis. C'est, par exemple, le cas lorsque Lagacherie et al. (1996) parlent de « *fuzziness* » ou encore quand Brunet et al. (1992, p. 218) définissent le *flou* comme : « la partie d'un système ou d'un espace dont les contours et les limites sont, soit imparfaitement connus ou connaissables, soit instables, soit imprécis […] ». De nombreux autres termes sont ponctuellement utilisés, rendant la terminologie confuse (Tableau 3.1). Pour rendre notre propos le plus clair possible, nous n'emploierons le terme flou que pour qualifier des formalisations fondées sur la théorie des sous-ensembles flous de Zadeh (1965). De plus, pour rester le plus proche possible du vocabulaire utilisé en géomatique nous préférerons le terme imprécis à celui de vague.

La notion d'*imprécision* peut être associée à d'autres concepts, comme l'*exactitude* chez Russell (1923), que l'on retrouve chez Bouchon-Meunier (1995, 2007) sous le nom d'*incertitude.* Ici, l'*incertitude* est entendue comme le doute que l'on peut avoir sur la validité d'une connaissance (Bouchon-Meunier 1995). L'*imprécision* et l'*incertitude* sont foncièrement liées et varient généralement en sens inverse (Russell 1923). Ainsi, si la proposition : (a) « la distance de la Terre à la Lune est de 384 397 km » est plus *précise* que la proposition : (b) « la distance de la Terre à la Lune est d'environ 384 000 km », mais la seconde proposition est

3. Y compris le terme « vague », lui-même (Russell 1923), on parle alors *d'imprécision d'ordre supérieur* ou "*higher-order vagueness*" (Williamson 1994).

4. Ou "*fuzzy*" dans les publications anglophones.

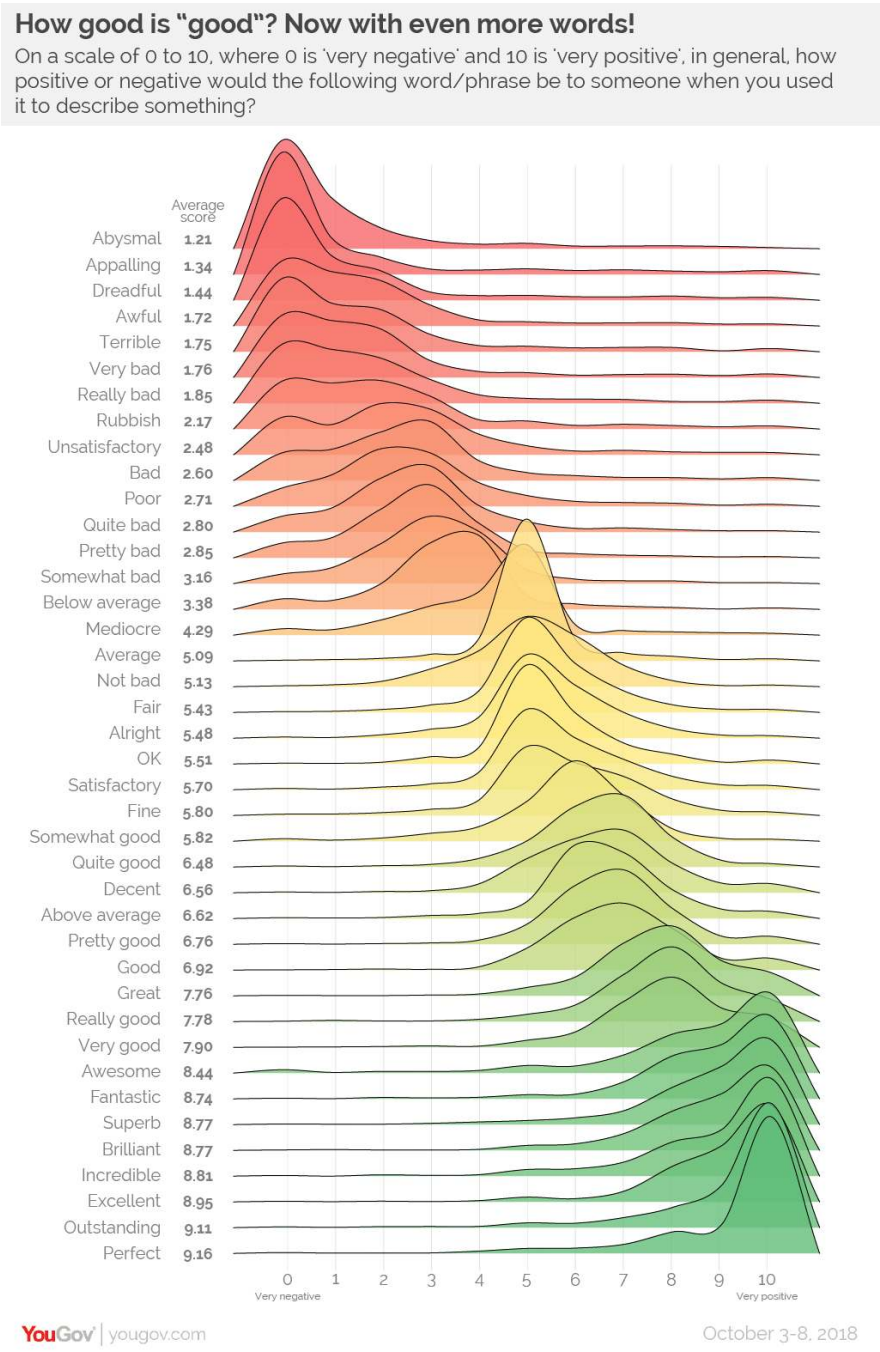


FIGURE 3.1 – *How good is "good"?* Figure réalisée à l'aide d'un lissage par noyau, à partir d'un sondage effectué au près d'au moins 1005 citoyens britanniques (l'échantillon varie pour chaque adjectif). Extrait de SMITH (2018)

plus certaine car, son cadre de validité (la plage de valeurs de la distance Terre-Lune) est plus large. On peut en effet, considérer que la proposition (b) reste vraie pour une distance réelle de 383 500 ou 384 999 km alors que la moindre variation de l'ordre d'un kilomètre suffit à invalider la première proposition (a). Dans certains cas, et notamment lorsque ces notions sont appliquées à des objets spatiaux, il peut être délicat de distinguer ces deux concepts. Cependant, ils sont fondamentalement différents : l'*imprécision* est une caractéristique invariable, alors que l'*incertitude* est contextuelle. Pour reprendre l'exemple précédent, la proposition (b) est imprécise et le restera quel que soit le contexte, alors que sa certitude dépend des connaissances de l'observateur. La véracité des propositions (a) et (b) est, toutes choses égales par ailleurs, invariable, mais la certitude de cette véracité est contextuelle.

L'*imprécision* et l'*incertitude* sont également associées à la notion d'*incomplétude*, qui désigne une connaissance partielle. Ceci est dû au fait qu'un manque de connaissances peut entraîner des *incertitudes*, mais également des *imprécisions* (Bouchon-Meunier 1995, 2007). Pour Bouchon-Meunier (1995) et plus généralement pour la communauté de chercheurs en intelligence artificielle, la composition de ces trois concepts définit la notion d'*imperfection.* Dans la suite de ce document, nous travaillerons à partir de cette typologie, même si de nombreuses autres typologies de concepts ont cependant été proposées, que ce soit dans le domaine de l'intelligence artificielle ou de la géomatique (Devillers et al. 2019 ; Fisher et al. 2006).

3.1.1.1 Imprécision et géographie

Les objets et les concepts géographiques n'échappent évidemment pas à l'imprécision. Ainsi, Russell (1923) mentionnait déjà l'existence d'objets dont la délimitation spatiale est imprécise, tel que le système solaire. De nombreux autres objets spatiaux imprécis ont été identifiés, comme l'illustre l'exercice de définition du *Brownfield*[5], entrepris par Alker et al. (2000) et relevé par Bennett (2001), qui y voit un bon exemple de la difficulté d'identifier une délimitation satisfaisante d'espaces naturels. Le B*rownfield,* tout comme les forêts (Bennett 2001 ; Dilo 2006 ; Fisher et al. 2006), les montagnes (Chaudhry et al. 2008 ; Fisher et al. 2006 ; Varzi 2001, 2015), les vallées (Schneider 2003) ou même le Soleil (Simons 1999), appartiennent à cette catégorie d'objets spatiaux dont on ne peut fixer une limite. Cette énumération pourrait laisser penser que l'imprécision ne concerne pas les artefacts, pourtant l'expérience de Perec (1974) nuance cette affirmation. Comme l'indique Campari (1996), l'identification des frontières d'un artefact, n'est pas aisée puisque dépendante du contexte d'observation. Ainsi, la limite d'une ville ou d'un village est tout aussi vague que celle d'une zone frontalière (Fisher et al. 2006 ; Varzi 2001), comme l'illustre la grande variabilité des définitions du concept de ville. Tous ces objets géographiques, généralement qualifiés de *vagues* (Erwig et al. 1997), *imprécis* (Winter 2000), *flous* (Lagacherie et al. 1996) ou d'objets aux *frontières indéterminées* (Burrough et al. 1996b), s'opposent aux objets dits *nets* (Schneider 2001) ou *précis.* Smith (1995, 1997) et Smith et al. (2000) font usage d'un vocabulaire très différent en opposant les *fiat boundaries* (*i.e.* les frontières précises) qu'ils estiment profondément liées à un processus cognitif, *aux bona fide boundaries* caractérisant les objets spatiaux dont la délimitation est univoque (Varzi 2015). Pour Couclelis (1996), les objets géographiques nets sont d'avantage l'exception que la norme. Ce constat est corollaire de l'avis d'Odd Ambrosetti (1987, p. 200), pour qui « […] il est problématique et généralement arbitraire de tracer des

5. Friche urbaine ou industrielle.

limites [...] » [6], limites qui, selon Brunet (2001, p. 106), sont « [...] indécises, fuyant sans cesse devant l'analyse, et même, localement indécidables ». Dutozia et al. (2014) considèrent, quant à eux, que « [...] l'espace géographique est par essence flou [...] ».

Ainsi, si les concepts présentés jusqu'ici nous semblent actuellement peu utilisés en géographie, de nombreuses notions et objets entrant dans le champ d'étude de la discipline y sont fondamentalement liés. C'est notamment le cas des différents maillages administratifs, comme les régions (Brennetot et al. 2014), mais également les frontières (Brunet et al. 1992), les seuils (Brunet et al. 1992 ; Lévy et al. 2013), les discontinuités (Brunet et al. 1992, 1997), les franges (Brunet et al. 1992), les confins (Brunet et al. 1997) ou encore les fronts pionniers (Brunet et al. 1992), qui, comme tous les concepts dérivant de la notion de *limite* sont généralement définis comme pouvant être graduels ou progressifs (Brunet et al. 1992 ; Lévy et al. 2013), c'est-à-dire foncièrement *imprécis*. La question de la formalisation des objets spatiaux imprécis a cependant été abordée en géographie, avant même le développement des systèmes d'information géographiques (Robinson 2003). Dans les années 1970 où, à la suite de l'élaboration de la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh 1965), plusieurs géographes, rattachés au courant *béhavioriste*, tels que Gale (1972, 1976), Pipkin (1978) ou Leung (1979, 1987) ont identifié les problèmes que l'existence d'objets géographiques aux limites imprécises pouvaient poser à la géographie. Parmi ces problèmes, Gale (1976) a identifié la question de la régionalisation. Cette problématique sera également abordée par Rolland-May (1987, 1996) lors de ses travaux sur la définition de territoires de cohérence. Les travaux béhavioristes aboutiront à la formalisation du concept d'objet géographique imprécis à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous (Leung 1987). Ces travaux n'auront, semble-t-il, pas suffi à inscrire durablement le concept d'imprécision dans le champ de la géographie ; puisque des publications ré-introduisant ce concept en géographie, apparaîtront régulièrement. C'est notamment le cas de Fisher et al. (1988), Collins et al. (2000), qui se fonderont indépendamment sur l'exemple de la définition d'une montagne pour introduire cette notion.

Parallèlement, Rolland-May (1984, 1987) se fondera notamment sur les travaux de Gale (1972, 1976) et Leung (1979) pour développer le concept *d'espace géographique flou*. Cette dénomination qualifie la formalisation, à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous, de l'espace tel que conceptualisé en géographie. Ce travail permettra à Rolland-May de proposer une définition formelle de notions courantes utilisées en géographie, telles que les franges (Rolland-May 1987), définies comme la limite floue d'un espace géographique, ou les discontinuités, décrites comme une configuration particulière d'ensemble flou (Rolland-May 2003). Les différents travaux de Rolland-May autour de la question de l'imprécision en géographie ont permit à différents chercheurs d'aborder différemment des questions géographiques Dutozia et al. (2014), comme, par exemple, de Ruffray et al. (2009), qui feront usage des concepts développés par Rolland-May pour quantifier la cohérence de territoires, ou Didelon et al. (2011) qui emploient la logique floue pour exploiter des cartes mentales.

3.1.1.2 L'imprécision spatiale

Nous proposons d'utiliser le terme d'imprécision spatiale pour décrire l'application du concept d'imprécision aux objets spatiaux. Par ce terme, nous entendons qualifier toutes les situations où un objet spatial, quelle que soit sa nature, voit ses limites difficilement identifiables. Il s'agit donc d'un concept ne portant que sur la dimension spatiale et non sur les autres aspects.

6. «*La realta ci mostra quanto sia problematico e spesso arbitrario tracciare dei confini [...]*» (Odd Ambrosetti 1987, p. 200), traduction personelle.

FIGURE 3.2 – Saisie manuelle de la limite du lac du Chambon. Extrait de BUNEL (2020).

Par exemple, la difficulté de délimitation spatiale d'un objet géographique tel que la forêt entre dans le cadre de l'imprécision spatiale. Ce n'est cependant pas le cas de la difficulté de définition du concept en lui-même, il s'agit dans ce cas d'imprécision sémantique. Ainsi, l'imprécision spatiale n'est qu'un cas spécifique du concept général d'imprécision, précédemment présenté, mais son cadre d'application et les spécificités de la question spatiale justifient la définition d'un nouveau concept. Pour illustrer ce concept, nous allons nous appuyer l'exemple de la définition des rives d'un lac artificiel. La Figure 3.2 est une orthophotographie de la partie ouest du lac du Chambon (Isère) sur laquelle a été dessinée la limite de l'eau. On peut cependant se demander si la limite que nous avons tracée est une délimitation satisfaisante de l'objet lac. En effet, le niveau de l'eau est amené à bouger au cours du temps. L'orthophotographie permet d'identifier ces zones, dépourvues de végétation et situées au-delà de la limite représentée sur la Figure 3.2. On peut donc tracer une seconde limite, celle de la zone atteignable par les eaux (Figure 3.3) et considérer que c'est ce nouveau tracé qui délimite l'objet lac.

Toutefois, aucune de ces délimitations n'est réellement satisfaisante. Peut-on considérer qu'une zone pouvant être découverte appartient autant à l'objet « lac » qu'une zone qui est toujours recouverte d'eau ? À l'inverse, peut-on considérer qu'une zone intermittemment située sous l'eau n'appartient pas au lac de la même manière que la forêt située à plusieurs dizaines de mètres de là ? Cette difficulté de délimitation est liée, comme nous l'expliquions précédemment, à *l'imprécision* de l'objet « lac. » On ne peut en définir une limite précise autrement qu'arbitrairement. Nous avons cependant pu tracer deux limites *précises*[7], celle de la zone recouverte d'eau (Figure 3.2) et celle de l'étendue maximale du lac (Figure 3.3). Ces deux frontières délimitent une aire de transition, entre le lac et son extérieur (Figure 3.4), c'est-à-dire la frontière du lac.

De même que pour l'imprécision, le concept d'incertitude ne voit pas sa définition générale impactée par la prise en compte de la dimension spatiale. Cependant, la multiplicité des termes utilisés dans la littérature, les contradictions entre auteurs et les représentations graphiques utilisées pour présenter les concepts sont sources de nombreuses confusions entre les concepts

7. Si l'on passe outre *l'imprécision* inhérente à la saisie manuelle.

FIGURE 3.3 – Saisie manuelle d'une limite alternative. Extrait de BUNEL (2020).

FIGURE 3.4 – Mise en évidence de la limite imprécise du lac. Extrait de BUNEL (2020).

d'imprécision et d'incertitude spatiale.

Comme expliqué précédemment, l'incertitude qualifie le doute que l'on peut avoir sur une connaissance. On peut donc définir l'incertitude spatiale comme le doute sur la position d'un objet. Ce concept peut être, tout du moins selon Tøssebro et al. (2002), décomposé en deux éléments : l'*incertitude positionnelle* et l'*incertitude morphologique. L'incertitude positionnelle* qualifie un doute sur la position d'un objet spatial. Tøssebro et al. (2008) prennent comme exemple l'estimation par sonar de la position d'un sous-marin. Ce cas offre une bonne opportunité pour distinguer *imprécision* et *incertitude spatiale.* L'objet sous-marin, est, de part sa nature d'artefact, net ; l'identification de ses frontières, à une échelle donnée, ne pose pas de problèmes. Cependant, sa position est mal connue, puisqu'estimée à l'aide d'un outil peu précis qui ne peut qu'estimer une zone de présence. La position de l'objet est donc *incertaine. L'incertitude morphologique* qualifie, quant à elle, un doute sur la forme de l'objet, c'est-à-dire. sur la position de sa frontière. C'est pourquoi on peut considérer que *l'incertitude morphologique* correspond à une *incertitude positionnelle* portant uniquement sur la frontière de l'objet. On peut prendre comme exemple une nappe phréatique, dont l'étendue ne peut être qu'estimée par des relevés terrain. Il est donc possible de savoir si la nappe est présente ou non en un point de mesure, mais non d'en définir la frontière, ce qui se traduit par une *incertitude* sur la position de la frontière, *i.e.* une *incertitude morphologique* telle que définie par Tøssebro et al. (2002, 2008). La proximité des concepts *d'incertitude morphologique* et *positionnelle* peut expliquer pourquoi les autres définitions de l'*incertitude* spatiale, notamment issues des travaux de Clementini (2008), Lagacherie et al. (1996), Freksa et al. (1996) [8] ou Schneider (1999) fusionnent ces deux notions. Dutton (1992), quant à lui, inclut ces deux notions dans sa définition de *l'incertitude positionnelle.*

On peut illustrer la notion *d'incertitude spatiale* en réutilisant l'exemple de la délimitation du lac du Chambon (Figures 3.2 et 3.3). Lorsque nous avons tracé la limite du niveau maximal de l'eau (Figure 3.3), nous nous sommes appuyés sur l'emplacement de la végétation. Cependant, dans certains cas, notamment pour la rive sud du lac, il s'est avéré difficile d'identifier la bonne limite et ce à cause de la présence de certaines poches de végétation. Ainsi, la frontière sud de l'étendue maximale du lac est *incertaine*, son tracé est contestable, mais uniquement à cause de notre manque de connaissances. Il ne s'agit pas d'*imprécision.* La Figure 3.5 représente une zone au sein de laquelle le tracé exact de la frontière est *incertain*, c'est-à-dire qu'au sein de cette zone, tous les tracés sont envisageables [9]. Ainsi, le lac du Chambon, rentre dans la catégorie des objets spatiaux à la fois *imprécis* et *incertains.*

L'incertitude et *l'imprécision spatiales* peuvent cohabiter, comme dans le cas du lac du Chambon. La figure 3.6 donne un aperçu plus théorique de la différence qu'il peut y avoir entre ces deux notions. *L'incertitude spatiale* est représentée par plusieurs frontières, illustrant le doute sur la position de la limite de l'objet. *L'imprécision spatiale* est, quant à elle, représentée par une bande, marque d'une frontière progressive, non réductible à une ligne.

De façon similaire à ce qui a été décrit précédemment, *l'incertitude et l'imprécision spatiales* sont liées. Par exemple, le fait qu'un objet géographique soit *imprécis* complexifie l'identification de sa frontière, ce qui se traduit par une *incertitude morphologique* (Lagacherie et al. 1996). De plus, la *précision* et la *certitude* des attributs d'un objet géographique sont fortement liées à la *précision* et à la *certitude spatiale* de ce même objet et inversement (Mark et al. 1989).

8. Freksa et al. (1996), utilisent le terme *d'incertitude* pour qualifier aussi bien ce que nous définissons comme *l'incertitude spatiale,* que ce que nous définissons comme *l'imprécision spatiale.*

9. Nous aurions également pu faire les mêmes remarques pour le tracé de la limite de l'eau (Figure 3.2). Mais pour éviter les confusions nous avons choisi de nous limiter à l'exemple de la frontière extérieure.

FIGURE 3.5 – Mise en évidence de l'incertitude pour la limite des hautes eaux. Extrait de BUNEL (2020).

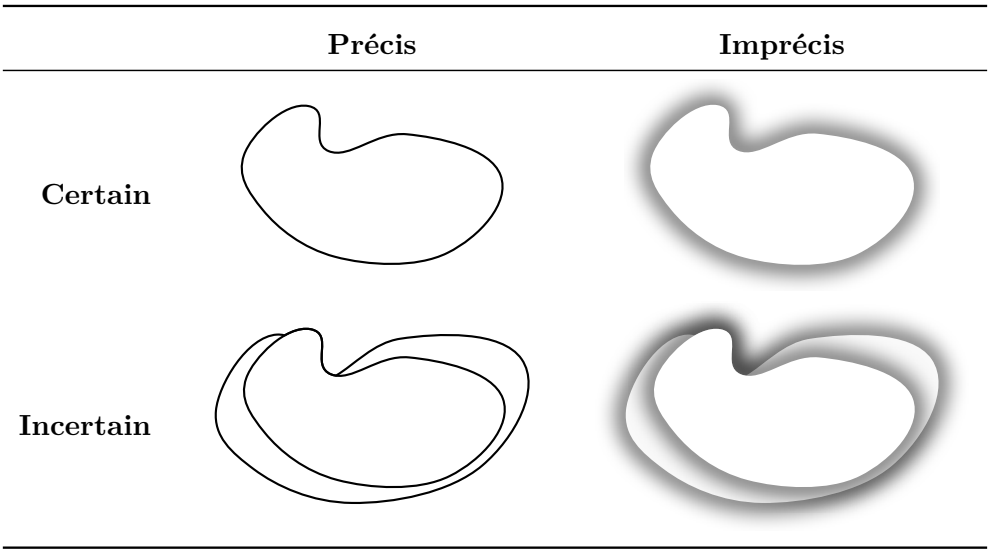


FIGURE 3.6 – Distinction entre les notions d'imprécision et d'incertitude spatiale (pour des raisons de lisibilité seule la frontière de l'objet spatial est représentée). D'après BUNEL (2020).

Ainsi, la définition d'un objet géographique à partir de données imprécises le sera elle-même, et le recueil d'informations au sein d'un objet géographique dont la frontière est *incertaine* ne pourra qu'être une opération qui l'est tout autant.

Différents auteurs ont listé des facteurs expliquant l'apparition de *l'imprécision* et de *l'incertitude spatiales*, comme Dutton (1992) et Freksa et al. (1996) qui identifient quelques facteurs explicatifs. D'autres travaux (Evans et al. 2008 ; Hadzilacos 1996) vont plus loin en proposant une typologie plus poussée de ces différents facteurs. Enfin, des typologies d'objets spatiaux *imprécis,* comme celle proposée par Liu et al. (2019), permettent d'identifier d'autres causes, inhérentes au processus de construction des objets spatiaux.

Une première cause de *l'imprécision spatiale,* correspondant à la majorité des exemples précédents, est liée à *l'imprécision* de la définition. Par exemple, l'objet géographique « montagne », n'est pas (seulement) *imprécis* à cause d'une quelconque difficulté technique limitant la précision des mesures, il l'est car le concept montagne n'est pas suffisamment clair pour permettre la délimitation précise d'une portion d'espace. C'est généralement *l'imprécision du concept* qui rend *l'objet géographique imprécis* (Freksa et al. 1996). *L'imprécision du concept* est à distinguer des *définitions concurrentes,* ce qu'Evans et al. (2008) nomment "*definitional disagreement*". C'est, par exemple, le cas des frontières contestées, nécessairement mutuellement exclusives, qui, même si définies aussi précisément que possible, ne permettent pas de construire une frontière unique, sinon en admettant une part d'incertitude spatiale. Par conséquent, le "*definitional disagreement*", et plus généralement, l'existence de géométries concurrentes pour un même individu (Hadzilacos 1996), sont une source *d'incertitude,* inhérente au choix d'une possibilité parmi l'ensemble des possibles.

Cependant, l'imprécision d'une définition peut être souhaitée. Hadzilacos (1996) parle alors de "*don't care [boundaries]*". C'est, par exemple, un cas que l'on retrouve fréquemment lors de la description en langage naturel d'une position. Un exemple de Bateman et al. (2010), illustre bien cette situation, si pour décrire sa position, une personne dit : « Je suis à la Poste », on ne peut pas en conclure qu'elle est située à l'intérieur d'une agence postale. En effet, si la file d'attente sort du bâtiment, cette description sera toujours valable. La limite de « la Poste » est donc peu précise, mais dans ce contexte, il n'est pas nécessaire qu'elle le soit davantage. L'information que le locuteur cherche à communiquer est sa proximité et son interaction avec une agence postale, et non sa présence au sein du bâtiment.

La dimension temporelle peut également être une source d'imprécision. Hadzilacos (1996) et Liu et al. (2019) mentionnent respectivement l'existence de « time-varying [boundaries] » et de « Dynamic boundary objects » pour qualifier des objets géographiques dont la frontière varie dans le temps. C'est, par exemple, le cas d'un front de mer. Pour ce type d'objets, définir une frontière nécessite de « synthétiser » les différentes évolutions temporelles, ce qui conduit nécessairement à une frontière *imprécise*. Dans ce cas *l'imprécision spatiale* est un artefact, né de la modélisation atemporelle d'un objet qui ne l'est pas.

On peut également relever des aspects plus techniques, comme l'imprécision liée aux instruments de mesure ou au producteur de données (Follin et al. 2019) et plus généralement au processus de production de données (Dutton 1992 ; Evans et al. 2008 ; Follin et al. 2019). D'autres points plus spécifiques peuvent également être identifiés, comme les limites des modèles de représentation des données (Dutton 1992 ; Follin et al. 2019). Il est par exemple impossible de représenter tous les nombres réels informatiquement à cause de la précision finie des nombres flottants utilisés pour les figurer.

Enfin, il convient de noter que *l'imprécision* et *l'incertitude* peuvent « se transmettre » lors de la définition de nouveaux objets à partir de mesures (Dutton 1992) ou d'objets géogra-

phiques imprécis (Follin et al. 2019 ; Liu et al. 2019). On peut, dans ce cas, parler *d'imprécision* et *d'incertitude de second ordre*. C'est ce phénomène que décrivent Liu et al. (2019) lorsqu'ils définissent les « element-clustering objects », des objets spatiaux imprécis construits par l'agrégation d'autres objets (flous ou nets), et les « object-referenced objects », construits par subdivision d'objets spatiaux imprécis.

3.1.2 La modélisation de l'imprécision spatiale

La question de la modélisation de l'imprécision a conduit au développement de plusieurs théories mathématiques, dont la plus connue est la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh 1965). Nous avons choisi de nous centrer sur la présentation de cette théorie, car nous n'avons pas identifié dans la littérature des utilisations de théories alternatives comme la théorie des fonctions de croyances. Quant aux travaux basés sur la théorie des probabilités (Tøssebro et al. 2002, 2008), ceux-ci traitent de la modélisation de l'*incertitude*, c'est pourquoi nous ne les détaillerons pas ici.

3.1.2.1 La théorie des sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous, ou, par abus de langage, théorie des ensembles flous (Bouchon-Meunier 2007), proposée par Zadeh (1965), vise à proposer un cadre théorique permettant de modéliser des appartenances partielles à une classe d'objets. Bouchon-Meunier (1995) présente les sous-ensembles flous comme un « assouplissement » des ensembles « classiques », ici qualifiés de « nets » [10] (Smithson et al. 2006). La possibilité de modéliser des appartenances partielles permet à la théorie des sous-ensembles flous de modéliser l'imprécision des connaissances, ce qui en fait un candidat idéal pour la modélisation d'objets spatiaux imprécis.

Un ensemble flou A est défini comme un couple composé d'un ensemble net X et d'une fonction f_A nommée fonction d'appartenance :

$$A = (X, f_A) \tag{3.1}$$

La fonction f_A, associe à chaque élément de X une valeur comprise dans l'intervalle [0,1], nommée degré d'appartenance. Cette valeur peut être interprétée comme une mesure de l'appartenance d'un élément à X. Par exemple, si l'on définit X comme l'ensemble des personnes de grande taille, le degré d'appartenance qualifie l'appartenance d'une personne à cet ensemble. Une personne mesurant 2,10 m aura un degré d'appartenance de 1, i.e. qu'elle est considérée comme grande. À l'inverse, une personne mesurant 1,75 m aura un degré d'appartenance compris entre 0 et 1 (0,6 par exemple), traduisant une appartenance partielle à l'ensemble des personnes de grande taille, ce qui revient à dire qu'il s'agit d'une personne grande, mais pas totalement.

De la même manière, le degré d'appartenance peut illustrer l'appartenance d'une position à un objet spatial. Par exemple, la figure 3.7 illustre la représentation du lac du Chambon à l'aide d'un sous-ensemble flou, les positions situées dans la zone d'imprécision (Figure 3.4) se voient attribuer un degré d'appartenance inférieur à 1. Ce degré devient nul au-delà de la seconde frontière (Figure 3.3).

10. "*Crisp sets*", par opposition aux "*fuzzy sets*", dans la littérature anglophone.

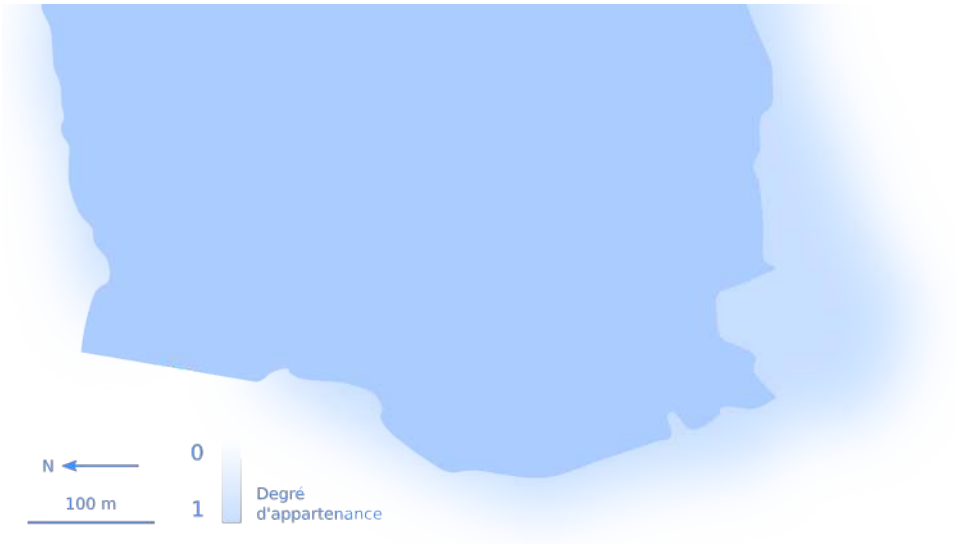


FIGURE 3.7 – Illustration de la modélisation du lac du Chambon à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous. Extrait de BUNEL (2020).

L'ensemble des éléments ayant un degré d'appartenance non nul permet de définir le support S de l'ensemble :

$$S(A) = \{x \in X \mid f_A(x) > 0\} \tag{3.2}$$

Avec X un ensemble net, x un élément de l'ensemble X. Le noyau N de l'ensemble correspond, quant à lui, à l'ensemble des éléments ayant un degré d'appartenance égal à 1 :

$$N(A) = \{x \in X \mid f_A(x) = 1\} \tag{3.3}$$

Si A et B sont deux sous-ensembles flous d'un même ensemble X, A et B sont égaux, si et seulement si, pour tout élément de X, le degré d'appartenance aux sous-ensembles A et B est égal, soit :

$$A = B \ ssi \ \forall x \in X, f_A(x) = f_B(x) \tag{3.4}$$

Un sous-ensemble flou A de X est inclus dans un sous-ensemble flou B de X si et seulement si, pour tout élément x appartenant à X, le degré d'appartenance de x à A est inférieur ou égal à son degré d'appartenance à B :

$$A \subseteq B \ ssi \ \forall x \in X, f_A(x) \leq f_B(x) \tag{3.5}$$

Le complément A^c d'un sous-ensemble flou A de X a pour fonction d'appartenance :

$$\forall x \in X, f_{A^C}(x) = 1 - f_A(x) \tag{3.6}$$

Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, on peut construire le complément de l'ensemble des personnes de grande taille, l'ensemble des personnes qui ne sont pas de grande taille. Une personne de 2,10 m aura un degré d'appartenance nul à ce second ensemble, et une personne de 1,75 m de 0,4.

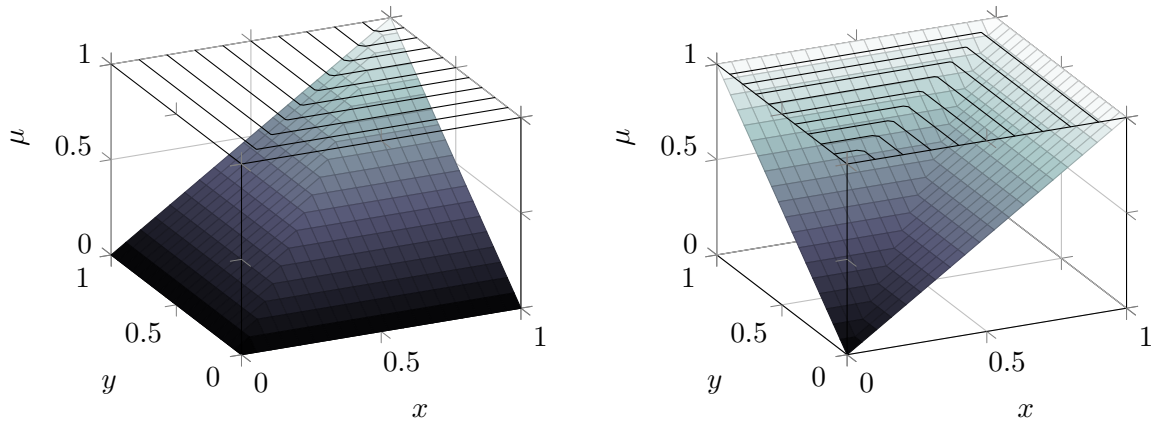
Zadeh (1965) définit l'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X comme le sous-ensemble flou C de X dont la fonction d'appartenance est la suivante :

$$\forall x \in X, f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x)) \tag{3.7}$$

De manière analogue, l'union de deux sous-ensembles flous A et B de X est un sous-ensemble $C \in F(X)$ dont la fonction d'appartenance est :

$$\forall x \in X, f_C(x) = \max(f_A(x), f_B(x)) \tag{3.8}$$

Par exemple, *l'ensemble des personnes grandes et âgées* peut être construit en intersectant *l'ensemble des personnes âgées* avec *celui des personnes de grande taille.* En utilisant les opérateurs proposés par Zadeh (1965), une personne dont le degré d'appartenance à ces deux ensembles est respectivement de 0,8 et 0,5, aura un degré d'appartenance à *l'ensemble des personnes grandes et âgées* de 0,5. La Figure 3.8 propose une représentation graphique du comportement des opérateurs d'union (Figure 3.8b) et d'intersection (Figure 3.8a) de Zadeh (1965), ce qui permet de généraliser le précédent exemple pour toutes les valeurs de degré d'appartenance aux deux ensembles intersectés.



(a) Opérateur d'intersection de Zadeh (*t-norme*, Équation 3.7)

(b) Opérateur d'union de Zadeh (*t-conorme*, Équation 3.8)

Figure 3.8 – Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs de Zadeh (1965) en fonction des degrés d'appartenance x et y.

Bien que les opérateurs d'union et d'intersection proposés par Zadeh (1965), permettant de conserver « presque toute la structure de la théorie classique des ensembles » (Bouchon-Meunier 2007), fassent office de standard, des alternatives, aux caractéristiques diverses, ont été proposés dans la littérature (Bouchon-Meunier 1995 ; Klir et al. 1995). La définition de nouveaux opérateurs d'intersection et d'union nécessite de généraliser les équations 3.7 et 3.8, à l'aide des concepts de *norme* et de *conorme triangulaire.*

Une *norme triangulaire* (*t-norme*) est une fonction, généralement notée $\top$, associant à chaque couple de valeurs, comprises entre 0 et 1, une valeur comprise dans le même intervalle (*i.e.* $\top : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$) et qui, pour tous les x, y et z dont la valeur est comprise dans l'ensemble $[0,1]$ est :

— *Commutative :* $\top(x, y) = \top(y, x)$
— *Associative :* $\top(x, \top(y, z)) = \top(\top(x, y), z)$
— *Monotone :* $\top(x, y) \leq \top(z, t)$ si $x \leq z$ et $y \leq t$
— À 1 pour *élément neutre :* $\top(x, 1) = x$

Comme on peut facilement s'en convaincre, l'opérateur d'intersection (Équation 3.7) proposé par Zadeh (1965) vérifie tous ces points, il s'agit donc d'une *t-norme* (Bouchon-Meunier 2007). N'importe quelle fonction *t-norme* peut être utilisée comme opérateur intersection ensembliste. On peut dès lors généraliser l'équation 3.7, l'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X est un sous-ensemble $C \in F(X)$ dont la fonction d'appartenance est :

$$\forall x \in X, f_C(x) = \top(f_A(x), f_B(x)) \tag{3.9}$$

De façon analogue, une *conorme triangulaire* (*t-conorme*) est une fonction, généralement notée $\perp$, associant à chaque couple de valeurs, comprises entre 0 et 1, une valeur comprise dans le même intervalle (*i.e.* $\perp : [0, 1] \times [0, 1] \to [0, 1]$) et qui, pour tous les x, y et z dont la valeur est comprise dans l'ensemble $[0, 1]$ est :

— *Commutative :* $\perp(x, y) = \perp(y, x)$
— *Associative :* $\perp(x, \perp(y, z)) = \perp(\perp(x, y), z)$
— *Monotone :* $\perp(x, y) \leq \perp(z, t)$ si $x \leq z$ et $y \leq t$
— À 0 pour *élément neutre :* $\perp(x, 0) = x$

Comme pour l'opérateur d'intersection, on peut remarquer que l'opérateur d'union proposé par Zadeh (1965) est une *t-conorme* (Bouchon-Meunier 2007). On peut également généraliser l'équation 3.8, l'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X est un sous-ensemble $C \in F(X)$ dont la fonction d'appartenance est :

$$\forall x \in X, f_C(x) = \perp(f_A(x), f_B(x)) \tag{3.10}$$

Plusieurs couples (*t-norme*, *t-conorme*) ont été proposés dans la littérature. Nous ne présenterons ici que les plus fréquemment utilisés.

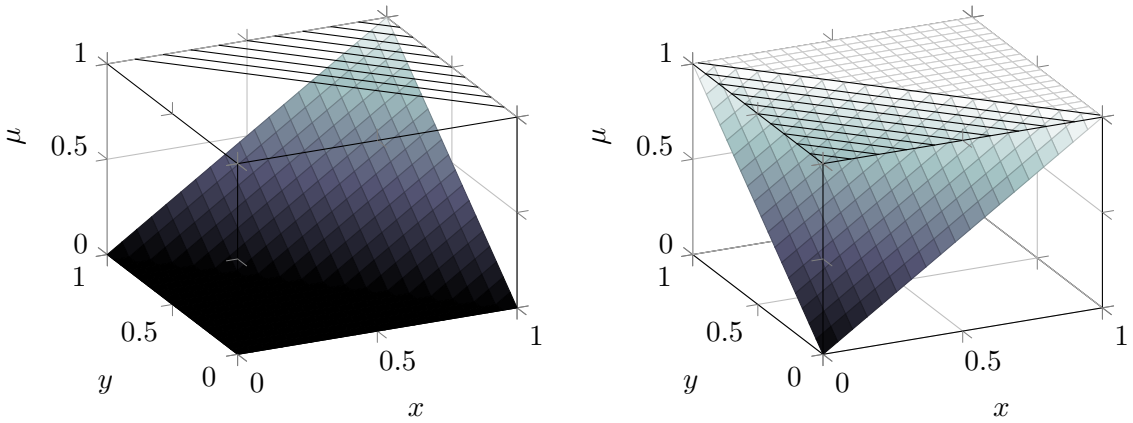
Les opérateurs de Łukasiewicz, dont on peut voir le comportement sur la Figure 3.9, sont définis de la manière suivante :

$$\top_L(x, y) = \max(x + y - 1, 0) \tag{3.11}$$

$$\perp_L(x, y) = \min(x + y, 1) \tag{3.12}$$

Comme les opérateurs de Zadeh (1965) la *t-norme* et la *t-conorme* de Łukasiewicz sont *continues.* De plus, comme pour tout $x \in]0, 1[$: $\top_L(x, x) < x$ et $\perp_L(x, x) > x$ ces opérateurs sont dits *archimédiens* (Bouchon-Meunier 1995), contrairement aux opérateurs de Zadeh (1965). Une autre caractéristique des opérateurs de Łukasiewicz est que, contrairement aux opérateurs de Zadeh (1965), ils satisfont les lois de *non-contradiction* et du *tiers exclu.* Ainsi, conformément à la loi de *non-contradiction,* l'application de la *t-norme* de Łukasiewicz à un degré appartenance et à sa négation est toujours nulle :

$$\top_L(x, 1 - x) = 0 \tag{3.13}$$



(a) *t-norme* de Łukasiewicz (Équation 3.11) (b) *t-conorme* de Łukasiewicz (Équation 3.12)

Figure 3.9 – Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs de Łukasiewicz en fonction des degrés d'appartenance x et y.

Quant à loi du *tiers exclu,* celle-ci conduit à ce que l'application de *t-conorme* de Łukasiewicz à un degré appartenance et à sa négation soit toujours égale à 1 :

$$\perp_L(x, 1-x) = 1 \tag{3.14}$$

Par conséquent, l'intersection d'un sous-ensemble flou A (de X) avec son complément A^C (Équation 3.6) avec ces opérateurs est toujours égale à l'ensemble vide :

$$A \cap A^C = \emptyset \tag{3.15}$$

et l'union de ces deux sous-ensembles avec les opérateurs de Łukasiewicz est toujours égale à l'ensemble net X :

$$A \cup A^C = X \tag{3.16}$$

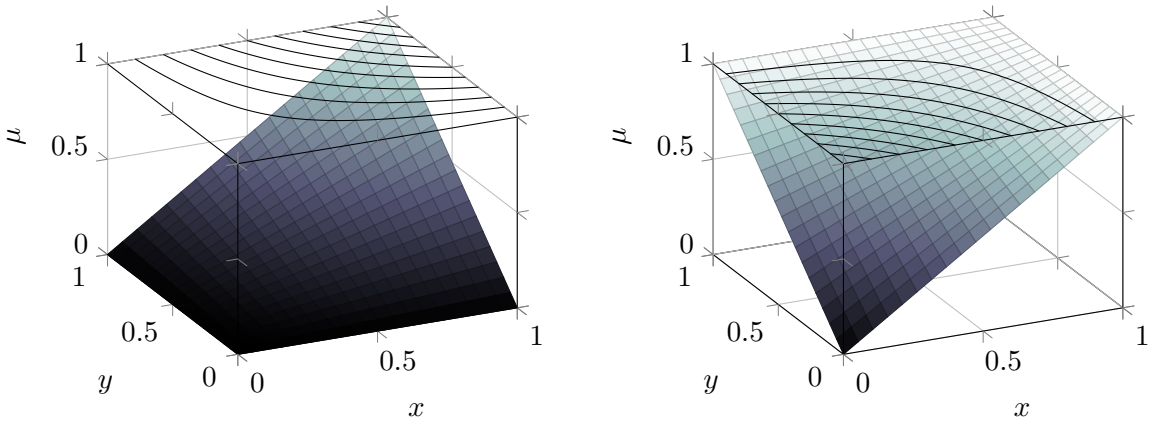
La troisième famille d'opérateurs est celle des opérateurs probabilistes, définis de la manière suivante :

$$\top_P(x, y) = x \times y \tag{3.17}$$

$$\perp_P(x, y) = x + y - x \times y \tag{3.18}$$

Comme le montre la Figure 3.10, les opérateurs probabilistes sont continus, les opérateurs de Zadeh (1965) ou de Łukasiewicz. Ils ont également la caractéristique d'être *archimédiens stricts, i.e.* que pour tout $x < v$ et $y < w$: $\top_P(x, y) < \top_P(v, w)$ et $\perp_P(x, y) > \perp_P(v, w)$ (Bouchon-Meunier 1995). Cependant, comme les opérateurs de Zadeh (1965), les opérateur probabilistes ne satisfont pas les lois de *non-contradiction* et du *tiers exclus.*

Les opérateurs drastiques sont, quand à eux définis de la manière suivante :



(a) *t-norme* probabiliste (Équation 3.17) (b) *t-conorme* probabiliste (Équation 3.18)

FIGURE 3.10 – Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs probabilistes en fonction des degrés d'appartenance x et y.

$$\top_D(x,y) = \begin{cases} x \text{ si } y = 1 \\ y \text{ si } x = 1 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \tag{3.19}$$

$$\perp_D(x,y) = \begin{cases} x \text{ si } y = 0 \\ y \text{ si } x = 0 \\ 1 \text{ sinon} \end{cases} \tag{3.20}$$

Leur principale caractéristique, visible sur la Figure 3.11, est d'être *discontinus,* contrairement à tous les opérateurs présentés jusqu'ici. De plus ces opérateurs ne sont pas *archimédiens,* la continuité étant une condition nécessaire à cette propriété (BOUCHON-MEUNIER 1995). Comme les opérateurs de ŁUKASIEWICZ ces opérateurs satisfont les lois de *non-contradiction* et du *tiers exclu.*

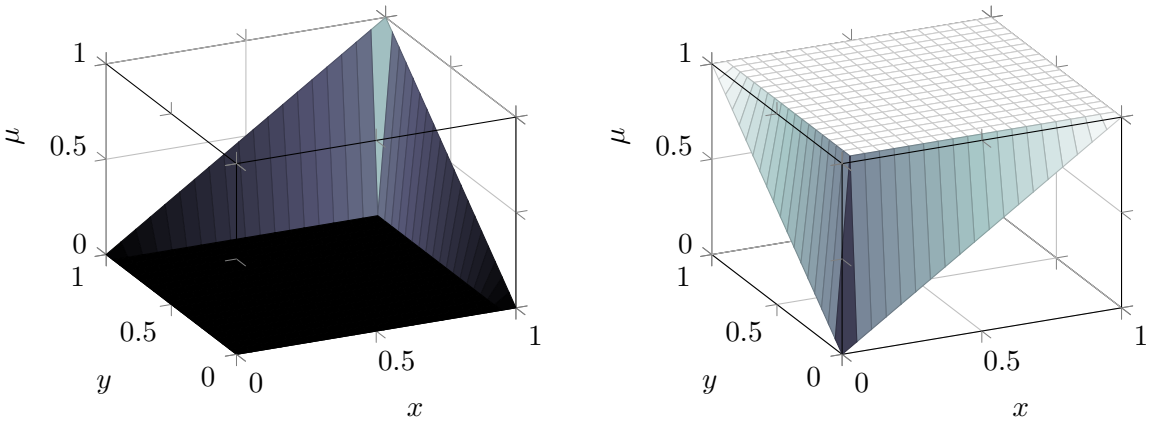
Si leurs propriétés différent, ces quatres couples partagent la caractéristique d'êtres *duals* (BOUCHON-MEUNIER 2007), ce qui signifie que pour tous x et y dont la valeur est comprise entre 0 et 1, *la négation d'une* t-norme est égale à la *t-conorme* de la négation de x et de y et inversement, soit :

$$n(\top(x,y)) = \perp(n(x), n(y)) \tag{3.21}$$

$$n(\perp(x,y)) = \top(n(x), n(y)) \tag{3.22}$$

Avec n la négation.

Ces couples d'opérateurs nous permettent de recalculer les résultats de l'exemple précédent. Si une personne a un degré d'appartenance de 0,8 à l'ensemble des personnes âgées et un degré d'appartenance de 0,5 à l'ensemble des personnes de grande taille, alors son degré d'appartenance à l'ensemble des personnes âgées et de grande taille est égal à la *t-norme* de ces deux



(a) *t-norme* drastique (Équation 3.19)

(b) *t-conorme* drastique (Équation 3.20)

FIGURE 3.11 – Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs drastiques en fonction des degrés d'appartenance x et y.

t-norme	$a \wedge b$
ZADEH	$\top_Z(0,8,0,5) = 0,5$
ŁUKASIEWICZ	$\top_L(0,8,0,5) = 0,3$
Probabiliste	$\top_P(0,8,0,5) = 0,4$
Drastique	$\top_D(0,8,0,5) = 0,0$

(a) Degré d'appartenance résultant en fonction de la *t-norme* utilisé

t-conorme	$a \vee b$
ZADEH	$\perp_Z(0,8,0,5) = 0,8$
ŁUKASIEWICZ	$\perp_L(0,8,0,5) = 1,0$
Probabiliste	$\perp_P(0,8,0,5) = 0,9$
Drastique	$\perp_D(0,8,0,5) = 1,0$

(b) Degré d'appartenance résultant en fonction de la *t-conorme* utilisé

TABLE 3.2 – Comparaison du degré d'appartenance résultant de l'intersection ou de l'union, de deux ensembles, en fonction de la *t-norme* ou de la *t-conorme* utilisée. Avec $a = 0,8$ et $b = 0,5$.

degrés d'appartenance. Si les opérateurs choisis sont ceux de ZADEH (1965), comme ci-dessus, alors ce degré est de 0,5. Dans le cas où une autre *t-norme* est choisie (Tableau 3.2) ce degré est inférieur à cette valeur. En effet, la *t-norme* de ZADEH (1965) correspond toujours à l'intersection la moins sévère, alors que la *t-norme* drastique correspond à l'intersection la plus sévère. À l'inverse, la *t-conorme* de ZADEH (1965) est l'opérateur d'union le plus sévère, alors que la *t-conorme* drastique est l'opérateur d'union le plus large (BOUCHON-MEUNIER 2007).

Comme nous l'indiquions précédemment, les opérateurs de ZADEH (1965) font office de « choix par défaut » bien qu'ils ne permettent pas de satisfaire les lois de *non-contradiction* et du *tiers exclu.* Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, l'intersection — avec la *t-norme* de ZADEH (1965) — de *l'ensemble des personnes âgées* avec celui des *personnes non âgées* donnera un ensemble non nul. D'un point de vue sémantique cela revient à considérer qu'une personne peut, toutes choses égales par ailleurs, être âgée et ne pas l'être. Si cette propriété n'est pas souhaitable, on peut employer les opérateurs drastiques ou de ŁUKASIEWICZ . Mais les pre-

miers ne sont pas continus, en plus de proposer une *t-norme* très contraignante (et inversement une *t-conorme* très optimiste), ce qui ne les rend pas adaptés à tous les cas d'utilisation. Quant aux opérateurs de Łukasiewicz ceux-ci sont *archimédiens,* ce qui impacte la sémantique de la conjonction et de la disjonction logique. Ainsi une personne appartenant partiellement aux ensembles des *personnes âgées* et des *personnes de grande taille* (*i.e.* la configuration illustrée par le Tableau 3.2), aura un degré d'appartenance à l'intersection de ces deux ensembles inférieur à ses degrés d'appartenance aux ensembles intersectés (Tableau 3.2a), les degrés d'appartenance inférieurs à 1 sont alors pénalisés. Cette propriété (qui concerne également les opérateurs probabilistes) ne peut être évitée qu'en employant les opérateurs de Zadeh (1965) ou drastiques, dont on a déjà décrit les limites. Ainsi, aucun couple d'opérateur ne possède toutes propriétés de l'intersection et de l'union ensembliste « classiques », le choix d'un couple doit donc se faire de manière réfléchie, en fonction des caractéristiques souhaitées ou à éviter.

3.1.2.2 La théorie des *ensembles approximatifs*

La théorie des *ensembles approximatifs*[11] proposée par Pawlak (1982) propose, comme la *théorie des sous-ensembles flous* de Zadeh (1965), de généraliser la théorie des ensembles

Cette théorie permet de définir un ensemble à partir de deux ensembles A^- et A^+ faisant office de bornes inférieures et supérieures (Gacôgne 1997).

Un ensemble approximatif A est défini par un couple d'ensembles :

$$A = (A^-(x), A^+(x)) \tag{3.23}$$

$A^-(x)$ et $A^+(x)$ sont, respectivement, les *approximations inférieures* et *supérieures* de l'ensemble X dans *l'ensemble approximatif* A. Ces deux ensembles sont définis à partir d'une *relation d'équivalence* R vers l'ensemble univers U. C'est cette relation R qui sert à construite *l'ensemble de approximatif,* de la manière suivante :

$$A^-(X) = \{x \in U \mid [x]_R \subset X\} \tag{3.24}$$

$$A^+(X) = \{x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset\} \tag{3.25}$$

Avec $[x]_R$ la classe d'équivalence de la relation R sur l'élément x.

Le premier ensemble, A^-, correspond à la frontière inférieure, à l'approximation la plus sévère. Pour reprendre la formulation de Pawlak (1982), si un élément x est dans $A^-(X)$, alors il est « surement » dans X. À l'inverse A^+ est la frontière supérieure, un élément x présent dans $A^+(X)$ est *possiblement* dans X.

3.1.3 Modélisations et implémentations

Comme l'indiquent Burrough et al. (1996b, p. 15), « Les objets inexacts requièrent des modèles de données inexacts ». L'objectif de cette partie est de présenter les différents modèles proposés dans la littérature pour modéliser les objets spatiaux flous. Nous traiterons aussi bien de modèles uniquement théoriques que de leurs implémentations, voire de leurs applications.

Pour présenter ces différents modèles, nous proposons une classification *ad hoc,* distinguant les modèles *définis en extension* de ceux *définis en intension.* Nous commencerons par expliciter cette classification, tout en la confrontant aux catégorisations présentes dans la littérature, avant de présenter les différents modèles.

11. Ou théorie des *ensembles bruts,* selon les traductions proposées pour l'anglais "*rough sets*".

3.1.3.1 Critères de classification

Un grand nombre de modèles ont été proposés pour permettre la manipulation d'objets spatiaux imprécis. Ils se distinguent par leur théorie de rattachement (Partie 3), par la nature des objets spatiaux modélisables (*e.g.* points, lignes, surfaces) ou leur implémentation (*e.g.* raster, vecteur, *ad hoc* ou inexistante).

Chacun de ces points peut être utilisé comme critère de classement, mais à notre connaissance, toutes les catégorisations proposées dans la littérature se fondent sur le critère de la théorie de rattachement. Clementini (2008) ou Erwig et al. (1997) identifient trois catégories : *les modèles probabilistes, les modèles flous* et *les modèles exacts,* qui étendent le modèle *simple features* aux objets spatiaux imprécis. Certains auteurs, comme Carniel et al. (2016) et Schneider (2001, 2008) y ajoutent la catégorie des *modèles approximatifs,* basés sur la théorie des ensembles du même nom, moins populaire que les précédentes. Enfin Fisher (2003) et Fisher et al. (2006, 2005) proposent une typologie des théories combinant la modélisation de l'incertitude spatiale à celle de l'imprécision spatiale et distinguent les modèles en fonction de quatre théories de rattachement : *probabilités, sous-ensembles flous, fonctions de croyance* et *approbation.* Bien qu'elle soit explicite et permette une bonne appréhension de la différence de popularité entre les différentes théories, cette catégorisation est critiquable, car elle passe outre un critère qui nous semble fondamental : la nature du processus de construction.

On peut, suivant la logique du *paradigme des ensembles de points*[12] (Egenhofer et al. 1990), concevoir l'espace comme un ensemble infini de points, représentant autant de positions. Les objets spatiaux, nécessairement inclus dans cet espace, peuvent dès lors être conceptualisés comme un ensemble de positions[13]. Par extension, un objet spatial imprécis peut être conceptualisé comme un ensemble de positions dont certaines ont une appartenance partielle à l'ensemble. La nature du processus de construction décrit la méthode utilisée pour décider de l'appartenance d'une de ces positions à l'objet spatial et donc pour construire un objet spatial. Nous distinguons deux approches : *la construction en intension* et celle *en extension.* Nous parlons de *construction en extension* lorsque l'objet spatial traité est construit par la sélection d'autres objets spatiaux (*e.g.* construction d'un département par l'union des communes le composant). La c*onstruction en intension* désigne les cas où un objet spatial est construit par la délimitation d'un espace (*e.g.* construction de *buffers*).

Cette distinction ne doit pas être confondue avec celle, faite en mathématiques, entre la définition en intension et la définition en extension, deux concepts qui qualifient la façon dont le contenu d'un ensemble est exprimé. Il s'agit de deux notions orthogonales, un objet spatial défini en intension pouvant être construit en extension et inversement (Tableau 2). La définition en intension consiste à fixer une ou plusieurs règles décrivant l'appartenance d'un élément à un ensemble. Par exemple, l'ensemble des géographes anarchistes peut être défini comme : tous les êtres humains, étudiant la géographie et favorables à l'anarchisme. De la même manière, on peut définir un objet géographique en intension. Par exemple, une zone économique exclusive (ZEE) est définie comme la zone située à moins de 200 miles marins des côtes d'un pays (Brunet et al. 1992). À l'inverse, la définition d'un ensemble en extension consiste à lister les différents éléments y appartenant. Pour reprendre l'exemple précédent, la définition en extension de l'ensemble géographes anarchistes serait : Élisée Reclus ; Pierre Kropotkine ; Léon Metchnikoff ; Simon Springer. Pour un objet spatial, sa construction en

12. Ou "*point set topology*".
13. Ou, récursivement, un ensemble d'ensemble de positions, si l'on souhaite définir un objet spatial à partir d'un autre objet spatial.

	Définition en intension	**Définition en extension**
Construction en intension	Construction d'objets vectoriels à partir de règles (*e.g.* buffer, isolignes)	Construction d'un raster à partir de règles (*e.g.* buffer, seuil de valeur)
Construction en extension	Construction d'objets vectoriels à partir d'une liste d'individus	Construction d'un raster à partir d'une liste d'individus

Table 3.3 – Comparaison entre la nature de construction et la nature de définition

extension se résume à lister les positions ou les objets géographiques appartenant à l'ensemble, par exemple l'ensemble des régions ultramarines françaises est : La Guadeloupe ; La Guyane ; La Martinique ; La Réunion ; Mayotte.

La distinction que nous faisons entre construction en extension et construction en intension peut sembler équivalente à celle qui a été faite entre les implémentations raster et vecteur, ou plus généralement, entre les modèles champs et objets tels que définis par Couclelis (1992) et Goodchild (1992). En effet, l'utilisation d'un modèle de type champ nécessite de renseigner, pour chaque élément, par exemple des pixels dans le cas d'une implémentation raster, son appartenance à l'objet spatial, ce qui équivaut à une construction en extension. Inversement, la construction d'un objet vectoriel est assimilable à une construction en intension. Cependant, le champ des possibles ne se limite pas à ces deux cas, laissant supposer une équivalence entre les deux catégorisations. Par exemple, la définition d'un objet spatial à partir de la sélection d'objets préexistants (*e.g.* on souhaite sélectionner les hôtels proches d'une station de métro donnée), entre dans le cadre du modèle objet tel que défini par Couclelis (1992), mais impose une construction en extension, *i.e.* la sélection d'objets spatiaux à partir d'un ensemble.

3.1.3.2 Modèles basé sur une construction en intension

Parmi les modèles construits en intension, on retrouve des propositions basées sur la théorie des sous-ensemble flous, présentée précédemment. Cependant, il existe une autre catégorie de modèles, fréquemment décrits comme « exacts » dans la littérature (Bejaoui et al. 2009 ; Schneider 2003).

Les modèles « exacts »

Cohn et al. (1996) ont proposé le modèle *egg-yolk,* qui demeure aujourd'hui la plus connue des solutions de modélisation de l'imprécision spatiale. Les auteurs proposent de modéliser des étendues imprécises à l'aide de régions délimitées par deux frontières. Par analogie avec un œuf au plat, la zone délimitée par la seconde frontière est baptisée « white » et celle délimitée par la première frontière, incluse dans « le blanc de l'œuf », est baptisée « yolk ». Pour poursuivre avec cette analogie, la partie du « blanc » non incluse dans le « jaune » correspond alors à la partie imprécise, *i.e.* dont l'appartenance à la région est contestable, contrairement à la zone appartenant au « jaune » Dans le cas où ces deux zones sont confondues, le modèle *egg-yolk* est équivalent au modèle simple features et aucune imprécision n'est modélisée.

Parallèlement à ces travaux, Clementini et al. (1996) ont proposé une modélisation des surfaces imprécises, qui sera par la suite étendue pour permettre la modélisation de tout type

d'objet spatial imprécis. De la même façon que précédemment, une région vague possède deux frontières, dont la sémantique est identique à celle du modèle egg-yolk. Cependant, les propositions de Cohn et al. (1996) et de Clementini et al. (1996) se distinguent par leur modélisation des relations topologiques (Cohn et al. 1996). Le modèle *egg-yolk* est basé sur le modèle RCC-8 alors que le modèle proposé par Clementini et al. (1996) est basé sur le modèle 9IM tout comme le modèle, similaire, qui sera proposé par Erwig et al. (1997). En découle une modélisation différente des relations topologiques entre deux régions vagues. Pour Clementini et al. (1996) le modèle *egg-yolk* se distingue par son approche topologique du problème, là où eux ont privilégié une approche géométrique. Clementini proposera ultérieurement une extension de ce modèle en vue d'y intégrer la modélisation des points et des polylignes (Clementini 2005, 2008), contrairement au modèle d'Erwig et al. (1997), limité aux régions imprécises.

Schneider (1996) a proposé une modélisation exacte des objets imprécis [14] en 1996. Contrairement aux modèles présentés précédemment, ce dernier offre, dès sa première itération la possibilité de modéliser des points, des lignes et des régions imprécises qui peuvent être à trous ou composées de plusieurs noyaux. Cette proposition est basée sur le modèle Realm/Rose de Güting et al. (1995), qui propose de définir des objets spatiaux à partir d'une grille régulière de points. Chaque objet, quel que soit son type, est construit à partir d'un ou de plusieurs de ces points, ce qui s'apparente à une version discrète du paradigme des ensembles de points.

Les modèles précédents ont pour point commun de ne pas permettre la modélisation des objets partiellement *imprécis* [15], tel que l'on pourrait conceptualiser le lac du Chambon, dont la limite est précise par endroits, notamment le long du barrage (Figure 3). Bejaoui (2009) et Bejaoui et al. (2009) proposent donc d'étendre le modèle egg-yolk à ce type d'objet tout en permettant la modélisation de points et de lignes imprécises. Pour ce faire, les auteurs proposent de re-formaliser le modèle à l'aide du paradigme des ensembles de points, abandonnant le modèle RCC initialement utilisé par Cohn et al. (1996). Mais la principale différence avec les propositions précédentes n'est pas due aux types d'objets modélisables ou à la théorie de rattachement, mais au raffinement de la sémantique des objets imprécis. Ainsi, les lignes imprécises, constituant un seul type d'objet dans le modèle de Clementini (2005) sont ici décomposées en neufs classes, en fonction de la nature (imprécise, partiellement imprécise ou précise) de leur intérieur et de leur frontière. Pour les régions imprécises, trois catégories sont proposées : les régions précises, les régions partiellement imprécises, dont certaines parties sont précises et d'autres non et les régions imprécises. Ce modèle offre donc une finesse dans la modélisation d'objets spatiaux imprécis qui était jusqu'ici inaccessible aux modèles exacts, mais au prix d'une importante complexification du modèle.

Modèles et implémentation flous

Définir un objet spatial imprécis à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous nécessite au préalable d'en élaborer un modèle de représentation. C'est un travail qui, à notre connaissance, n'a été entrepris que par Schneider (1999, 2001) qui a formalisé une version floue du modèle *simple features.*

Le modèle de Schneider (1999) définit trois types de géométries floues : le *fpoint,* la *fline* et la *fregion,* équivalents flous des types *point, line* et *region* du modèle *simple features.* La proposition de Schneider (1999) se base sur le paradigme des ensembles de points. Les *fpoints* sont définis comme une union de *points flous* (eux-même définis comme un couple composé

14. Schneider (1996) parle « *d'objets vagues* ».
15. Bejaoui (2009) et Bejaoui et al. (2009) parlent *d'objets vagues, partiellement vagues* et *nets.*

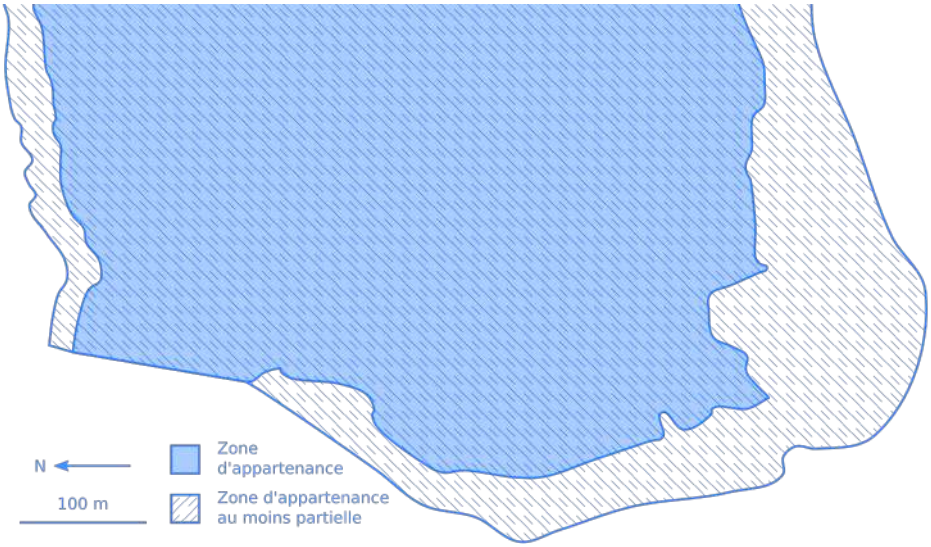


FIGURE 3.12 – Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle exact tel que proposé par BEJAOUI et al. (2009). Comme pour tous les modèles « exacts » la zone d'appartenance totale est incluse dans la zone d'appartenance au moins partielle. Extrait de BUNEL (2020).

d'une position, *i.e.* un point non flou, et un degré d'appartenance.), *i.e.* un ensemble de positions disjointes, deux à deux, auxquelles est associée une valeur, le degré d'appartenance de la position au *fpoint.* Ainsi, contrairement à un *point,* un *fpoint* peut occuper plus d'une position (Figure 3.13). Les *lignes floues* (à ne pas confondre avec les *flines*), sont également définies comme un ensemble de *points flous.* Cependant, contrairement au *fpoint,* la construction de cet ensemble est contrainte et les points flous appartenant à une *ligne floue* doivent se trouver sur une même coube continue. De plus, chaque *point flou* doit avoir un degré d'appartenance unique, strictement croissant (ou décroissant) dans le sens de la coube. Les deux *points flous* situés aux extrémités d'une *ligne floue* ont donc, respectivement, le degré d'appartenance maximal et minimal à la *ligne floue.* Les *blocs flous* sont définis comme l'union d'un nombre fini de *lignes floues,* ne pouvant êtres connectées que par leurs extrémités [16] et les *flines* comme une union de *blocs flous* disjoints. Cette construction permet aux *flines* de représenter des objets linéaires complexes et composés de plusieurs géométries distinctes qui ne seraient pas représentables par le type *line* du modèle *simple features* (Figure 8). Enfin, les *fregions* sont définies comme étant un ensemble de *points flous* ne comportant pas d'anomalies géométriques (*e.g.* superpositions, croisements). Comme pour les *fpoints* et les *flines,* les *fregions* peuvent modéliser des géométries plus complexes que le type *region* du modèle *simple features*, une *fregion* pouvant être composée de plusieurs polygones disjoints (Figure 3.13). SCHNEIDER (2004) complétera ce modèle en définissant un ensemble de prédicats permettant de modéliser des relations topologiques entre géométries floues.

Plusieurs implémentations de ce modèle ont été proposées, notamment par KANJILAL et al. (2010) ou par DILO (2006) et DILO et al. (2007). Mais, d'autres travaux ont également proposé des modélisations floues d'objets spatiaux imprécis, sans rattachement ou définition explicite

16. Les *points flous* situés aux extrémités des deux *lignes floues* unies doivent donc être équivalents, *i.e.* qu'ils partagent leurs coordonnées, ainsi que leur degré d'appartenance.

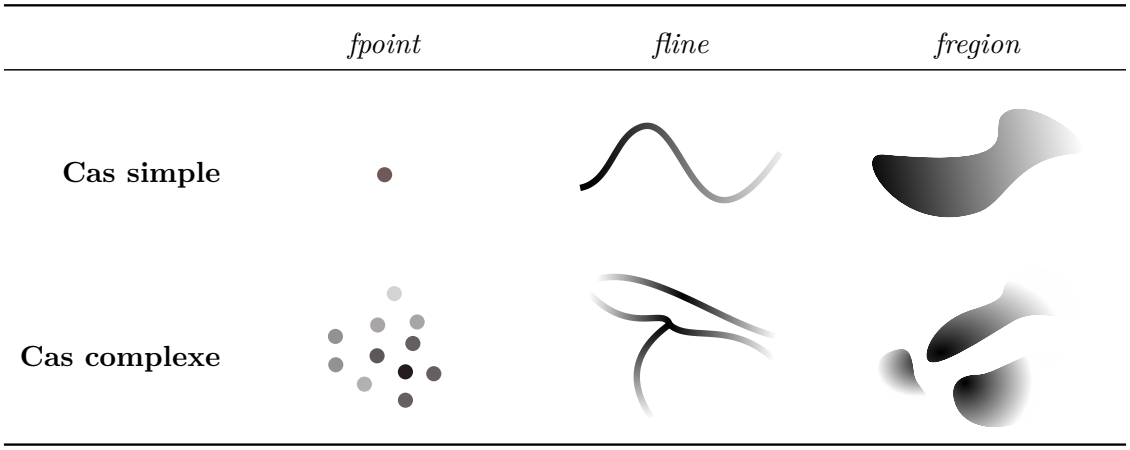


FIGURE 3.13 – Les trois types géométriques flous proposés par SCHNEIDER (1999). D'après SCHNEIDER (1999) et BUNEL (2020).

d'un modèle théorique. C'est notamment le cas de ZOGHLAMI ou DE RUNZ qui proposent une approche fondée sur les *alpha-cuts* (RUNZ 2008 ; RUNZ et al. 2008 ; ZOGHLAMI 2013 ; ZOGHLAMI et al. 2016) ou de CARNIEL et al. (2016).

KANJILAL et al. (2010), proposent d'implémenter le type fregion défini par SCHNEIDER (1999) à l'aide de « région[s] plateau », définies comme un ensemble non nul et fini de polygones [17] (ou multi-polygones) nets, représentant une plage de valeurs de degré d'appartenance. Cette implémentation est semblable à l'approche par alpha-cuts proposée par RUNZ et al. (2008) ou ZOGHLAMI (2013) et ZOGHLAMI et al. (2016). Dans la théorie des sous-ensembles flous, une alpha-cut est définie comme l'ensemble des éléments d'un sous-ensemble flou ayant un degré d'appartenance supérieur à un seuil fixé [18] (BOUCHON-MEUNIER 2007). Si les éléments du sous-ensemble flou sont des positions, une alpha-cut permet de définir une aire, modélisable par un polygone.

Ainsi, les implémentations proposées par KANJILAL et al. (2010), ZOGHLAMI (2013) et ZOGHLAMI et al. (2016) ou RUNZ (2008) et RUNZ et al. (2008) ont pour point commun de représenter un sous-ensemble flou en le discrétisant à l'aide de polygones. Mais ces approches ont une différence majeure : les contraintes de construction des polygones. L'approche de KANJILAL et al. (2010) impose aux polygones constitutif d'une région plateau d'être disjoints ou adjacents deux à deux, une même position ne peut donc appartenir qu'à un seul polygone, ce qui n'est pas le cas pour les implémentations proposées par ZOGHLAMI (2013) et ZOGHLAMI et al. (2016) ou RUNZ et al. (2008), où une position appartient, par définition, à toutes les alpha-cuts construites à partir d'un seuil inférieur à son degré d'appartenance. Cette distinction n'est pas visible sur la figure 9, les deux approches donnant, pour le même nombre de polygones, des résultats visuellement équivalents. Cependant, les trois polygones représentés sur la figure 9 ont une sémantique différente selon l'implémentation choisie. Dans l'implémentation de KANJILAL et al. (2010), les trois polygones sont disjoints. Le premier délimite le noyau, le second l'aire ayant un degré d'appartenance compris entre 1 et 0,25 (exclus) et le dernier polygone délimitant l'aire dont le degré d'appartenance est strictement supérieur à 0 et inférieur à 0,25. Avec l'implémentation par alpha-cuts, les polygones sont superposés, et si le premier

17. Tels que définis dans le modèle *simple features*.
18. Par exemple, une *alpha-cut* dont le seuil est de 1 est équivalente au noyau du sous-ensemble flou.

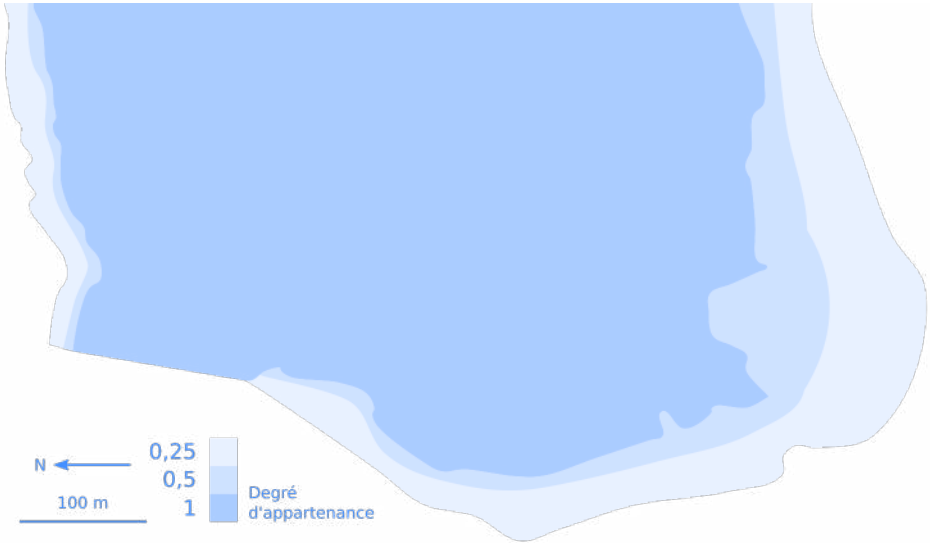


FIGURE 3.14 – Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle flou discrétisé par un ensemble de polygones. Extrait de BUNEL (2020).

polygone délimite toujours le noyau, le second délimite l'aire dont le degré d'appartenance est supérieur à 0,25 et le troisième l'aire dont le degré d'appartenace est non nul [19]. Par conséquent, si l'on ne construit que les *alpha-cuts* du *noyau* et du *support,* le résultat de l'implémentation proposée par ZOGHLAMI (2013) et ZOGHLAMI et al. (2016) ou RUNZ (2008) est identique à celui des modèles de COHN et al. (1996) ou de CLEMENTINI et al. (1996) présentés précédemment et qui superposent également la zone d'appartenance à la zone d'appartenance partielle ; ce qui n'est pas le cas pour l'implémentation de KANJILAL et al. (2010), car les polygones définissant une région plateau y sont, par définition, disjoints.

Comme pour les implémentations précédentes, l'approche proposée par DILO et al. (2007) ne s'applique qu'au cas des régions floues. Les auteurs proposent d'implémenter ces dernières à l'aide de deux linéaires, représentant les frontières du support et du noyau et d'un maillage, servant de support à une interpolation. Les modèles précédemment présentés imposent un échantillonnage des degrés d'appartenance, dont la précision varie en fonction du nombre de régions nettes (KANJILAL et al. 2010) ou d'alpha-cuts utilisées (ZOGHLAMI et al. 2016). L'implémentation proposée par ZOGHLAMI (2013) et ZOGHLAMI et al. (2016) ou RUNZ (2008) vise à contourner ce problème en offrant la possibilité de calculer le degré d'appartenance en tout point de la région floue par interpolation (de manière similaire a la proposition de TØSSEBRO et al. (2002). Ils proposent pour cela de définir un maillage à l'aide d'une triangulation de Delaunay contrainte aux frontières du noyau et du support, cette dernière devant être post-traitée pour supprimer les triangles créés dans les trous ou concavités. Le degré d'appartenance au sous-ensemble flou des points appartenant aux frontières étant connu, il est ainsi possible de calculer le degré d'appartenance en tout point à l'aide d'une interpolation triangulaire (Figure 10). La précision de l'estimation peut être améliorée par l'ajout de points intermédiaires dont le degré d'appartenance à l'ensemble est connu, ce qui peut être le cas lorsque, comme proposé par DILO et al. (2007), la région floue est définie à partir d'un ensemble de points (les frontières sont alors définies à l'aide d'enveloppes concaves). Le principal problème de cette approche est

19. Chaque *alpha-cut* est donc incluse dans la suivante.

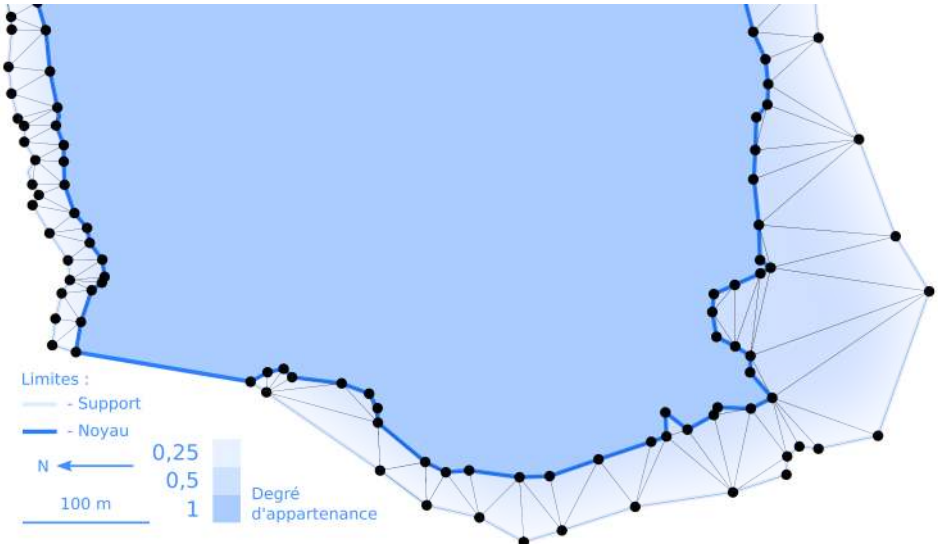


FIGURE 3.15 – Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle flou tel qu'implémenté par DILO et al. (2007). Extrait de BUNEL (2020).

qu'elle conduit à une importante complexification des opérations inter-ensembles. Là où les précédents modèles recouraient uniquement à des opérations géométriques quelconques et à une sélection du plus grand (ou plus petit, en fonction de l'opération concernée) degré d'appartenance, ce modèle impose la reconstruction du maillage et son post-traitement, ce qui peut rendre les opérations inter-ensembles (unions, intersections) coûteuses.

SCHNEIDER (2003) a également proposé une implémentation de son propre modèle. Contrairement aux implémentations précédemment citées, celle-ci aborde tous les types formalisés dans le modèle théorique (fpoint, fline et fregion). Ce travail est assez proche de ce qu'avait proposé le même auteur avec sa proposition de modèle exact basé sur l'approche Realm/Rose SCHNEIDER (1996), puisque l'auteur propose d'implémenter les types spatiaux flous à l'aide d'un ensemble fini de points répartis régulièrement. L'implémentation du type fpoint ne présente pas de particularités, il s'agit d'un point appartenant à l'ensemble des positions possibles et ayant un degré d'appartenance. De la même manière, l'implémentation du type fline est proche de la formalisation, la principale différence étant que les points composant cette dernière doivent nécessairement appartenir à l'ensemble des positions possibles. Pour le type fregion ce dernier est composé d'un ensemble de cellules auxquelles est attribué un degré d'appartenance à la région floue. Les règles présentées dans le modèle théorique s'appliquent toujours, ainsi les régions avec des anomalies géométriques ne peuvent pas être modélisées. On peut noter que cette implémentation des fregions est assez semblable à celle qui sera proposée plus tardivement par KANJILAL et al. (2010), avec une région floue modélisée comme un ensemble de polygones nets.

Pour finir, on peut également citer l'implémentation proposée par CARNIEL et al. (2016). Ces derniers ne proposent qu'une implémentation des lignes et des points flous, délaissant le cas des régions floues. Cinq types sont définis et implémentés dans PostGIS par les auteurs. Le premier d'entre eux est le type générique FuzzyGeometry, qui se spécialise en FuzzyPoint, FuzzyLine et leurs équivalents complexes, FuzzyMultiPoint et FuzzyMultiLine. On notera que cette organisation reprend celle du modèle simple feature. Cette ressemblance ne se limite pas

à cet élément, puisque les types complexes sont également définis comme des ensembles de types simples. Les différences avec le modèle simple feature apparaissent lors de la définition du type FuzzyPoint. Ce dernier est défini comme un triplet composé de deux coordonnées x, y et d'un degré d'appartenance. Par extension, le type FuzzyLine est défini comme un ensemble de FuzzyPoint, ainsi le degré d'appartenance d'une FuzzyLine est défini par les points qui la composent.

3.1.3.3 Modèles basés sur une construction en extension

Notre présentation des modèles basés sur une construction en extension est organisée selon une classification *ad hoc*, basée sur la nature des objets sélectionnés et distinguant les modèles basés sur une construction en extension du premier ordre de ceux basés sur une construction en extension d'ordre supérieur.

Critères de classement

Comme nous l'expliquions précédemment, toute définition d'un objet spatial par la sélection d'un ou plusieurs objets géographiques est une construction en extension. On peut distinguer ces modèles selon la nature des objets spatiaux sélectionnés.

Un premier type de sélection consiste à définir un objet spatial par la sélection des positions qu'il occupe. La délimitation d'une zone à partir d'un ensemble de pixels est un exemple concret de ce type de construction, notamment proposée par Zhan (1997). Cet exemple ne doit, cependant, pas laisser croire que la catégorisation proposée ici est fondée sur la nature de l'implémentation, mais bien sur la sélection de positions dont l'infinité ne peut qu'être approximée par des modèles champs, quelle que soit la nature de leur implémentation. Toutefois, l'ensemble des travaux que nous présenterons s'appuie sur une approche raster. Nous qualifions cette configuration de *sélection de premier ordre.*

À l'inverse, on peut imaginer construire des objets spatiaux à partir d'une sélection d'objets, « d'agrégats » de positions (Charre 1995). Cette approche définit des objets spatiaux de manière semblable aux *Elements-Clustering Objects* de Liu et al. (2019). Dans ce cas, le sous-ensemble spatialisé peut être défini à partir d'un groupe d'éléments ne couvrant pas l'intégralité de l'espace (*e.g.* sélection à partir d'un réseau routier). Nous qualifions ce second type de sélection d'ordre supérieur, car elle s'opère sur des objexts complexes, eux-mêmes composés de positions, et non directement de positions comme c'est le cas pour une sélection directe de positions.

Construction en extension du premier ordre

On peut présenter la définition en extension du premier ordre d'un sous-ensemble flou spatialisé à l'aide de l'exercice de définition de la limite du lac du Chambon. La Figure 3.16 se distingue des exemples précédents par son découpage en pixels (dont la taille a volontairement été exagéré). Chacun se voit attribuer un degré d'appartenance, défini indépendamment. La tâche principale consiste donc à définir une méthode permettant de calculer le degré d'appartenance pour chaque pixel. Pour cet exemple, nous avons adopté une approche simple : le degré d'appartenance décroit avec la distance au rivage. Le degré d'appartenance est donc de 1 pour les pixels situés à l'intérieur du lac, puis il décroit en fonction de la distance du centroïde du pixel au point du rivage le plus proche. Ces règles peuvent être raffinées autant que nécessaire.

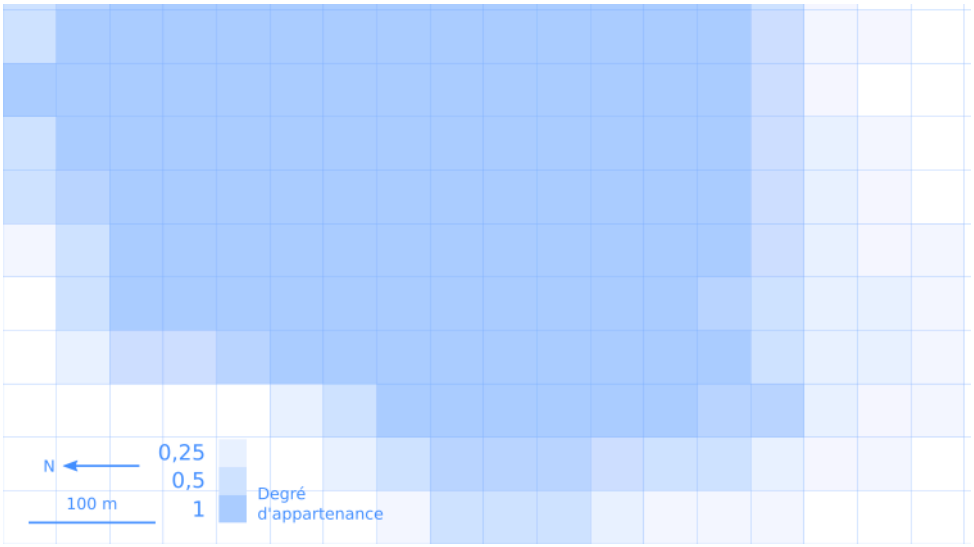


FIGURE 3.16 – Illustration de la modélisation du lac du Chambon par un modèle flou et une implémentation raster (*i.e.* construction en extension de premier ordre). Extrait de BUNEL (2020).

Les travaux de TAKEMURA et al. (2012) et VANEGAS et al. (2011), par exemple, s'intéressent à la modélisation de relations spatiales, respectivement « entouré de » et « le long de ». L'objectif est de délimiter la zone validant la relation spatiale considérée, c'est-à-dire de construire un « paysage flou » selon la terminologie proposée par BLOCH (1996). Ce type de modélisation est nécessairement impacté par l'imprécision du langage naturel. Une description de position est nécessairement imprécise, une même relation spatiale pouvant prendre un sens différent en fonction de l'objet de référence, du locuteur, etc. (BATEMAN et al. 2010 ; BORILLO 1998 ; VANDELOISE 1986), écueil justifiant le recours à la théorie des sous-ensembles flous. Ces deux travaux sont fondés sur une méthodologie similaire. Ils définissent tous deux un ensemble de métriques et de fonctions permettant de calculer, pour chaque pixel d'un raster, un degré d'appartenance quantifiant la validité de la relation spatiale modélisée pour la position considérée.

Si ces travaux proposent avant tout une réflexion théorique, d'autres auteurs utilisent cette même approche pour répondre à des problématiques plus appliquées. C'est notamment le cas d'ARABACIOGLU (2010) qui propose une application de la théorie des sous-ensembles flous à l'architecture, ou GRIOT (2007), KURTENER et al. (2000) et MAKROPOULOS et al. (2003) qui se sont penchés sur des questions de prise de décision appliquées à la gestion du territoire. Comme précédemment, ces travaux utilisent un raster et calculent pour chaque pixel un degré d'appartenance à une zone, dont la sémantique varie en fonction de la problématique. Cependant, le calcul du degré d'appartenance dans les travaux de ARABACIOGLU (2010), GRIOT (2007) et MAKROPOULOS et al. (2003) est réalisé à l'aide d'un système d'inférence flou et non directement comme dans les travaux de TAKEMURA et al. (2012) et VANEGAS et al. (2011). Les systèmes d'inférence flous, pendant flou des systèmes experts, permettent également de calculer un degré d'appartenance pour chaque individu (quelle que soit sa nature), mais à partir de règles logiques formulées en langage naturel. Leur utilisation permet donc de prendre en compte l'imprécision, ici liée à l'expression orale (GRIOT 2007 ; MAKROPOULOS et al. 2003),

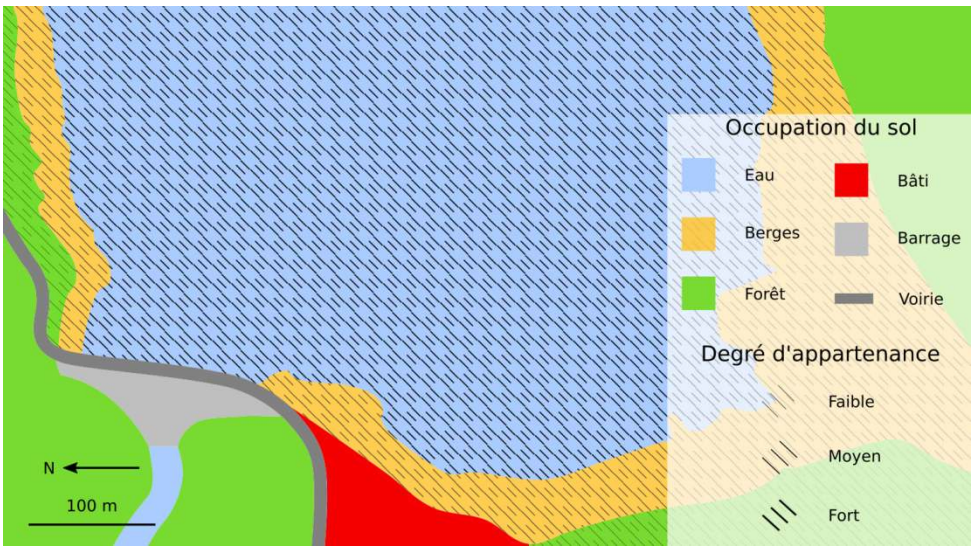


FIGURE 3.17 – Illustration de la définition du lac du Chambon par sélection floue d'objets géographiques (*i.e. construction en extension d'ordre supérieur*). Extrait de BUNEL (2020).

ou à la quantification de ressentis (ARABACIOGLU 2010), mais également de formaliser des connaissances expertes.

La définition en extension du premier ordre d'un sous-ensemble spatialisé est courante dans la littérature et les publications ici citées, l'appliquent à des thématiques diverses, comme l'interprétation d'images aériennes (BRANDTBERG 2002 ; FONTE et al. 2005), la gestion du territoire (GRIOT 2007 ; MAKROPOULOS et al. 2003), la qualification de ressentis (ARABACIOGLU 2010), ou la modélisation de relations spatiales floues TAKEMURA et al. (2012) et VANEGAS et al. (2011).

Construction en extension d'ordre supérieur

La construction en extension d'ordre supérieur d'un sous-ensemble flou spatialisé est probablement l'approche qui nécessite le plus de s'appuyer sur un exemple concret (Figure 3.17). Comme nous l'expliquions précédemment, cette approche nécessite d'attribuer des degrés d'appartenance à des objets, des agrégats de position. Elle se distingue donc de la construction en extension du premier ordre, qui nécessite d'attribuer un degré d'appartenance à des positions (cas théorique) ou à un pavage régulier, une discrétisation de l'ensemble des positions (cas pratique, cf. Figure 3.16). La Figure 3.17 représente à la fois l'occupation du sol de la zone traitée et le degré d'appartenance [20] de l'objet à la zone modélisée. Ainsi, on considère que le polygone du lac appartient totalement au sous-ensemble flou « lac », que les berges y appartiennent moyennement et qu'une partie des forêts y appartient faiblement. Quant aux autres éléments, on considère qu'ils n'appartiennent pas à la zone modélisée.

Ce processus de construction, pendant spatial de la réflexion sur les requêtes floues MOREAU et al. (2018) et WANG (1994), est utilisé par ĎURAČIOVÁ et al. (2017) qui illustrent leur méthodologie par la sélection floue « [des] grands parkings proches du stade et ayant été rénovés

20. La valeur du degré d'appartenance est discrétisée pour la représentation, mais il s'agit d'une valeur continue comme pour les exemples précédents.

il y a environ deux ans ». Leur démarche est fortement similaire à celle de l'exemple précédent (Figure 3.16). Les autrices définissent des règles permettant de quantifier l'appartenance des objets spatiaux candidats à l'ensemble flou correspondant à la description. Là où nous n'utilisions qu'un seul critère, la proximité, ce nouvel exemple nécessite de prendre en compte la proximité mais aussi la date de la dernière rénovation. Chacun de ces critères permet de construire un sous-ensemble flou spatialisé (celui des parkings proches du stade et celui des parking rénovés il y a environ deux ans) et l'intersection de ces deux ensembles, réalisée à l'aide des opérateurs flous présentés précédemment (cf. 3.1.2.1) permet de construire le sous-ensemble flou désiré. Un processus similaire est utilisé par Bard et al. (2003) dans le cadre de l'évaluation de la généralisation cartographique. Les objets spatiaux sont ici classés dans des sous-ensembles flous figurant une description qualitative de la qualité de la généralisation. Cross et al. (2000) utilisent, quant à eux, une approche similaire pour ajouter la prise en compte de l'imprécision aux modèles objets des systèmes d'information géographiques. Dans tous les cas, le sous-ensemble flou construit est spatialisé, mais cette spatialisation est exogène, puisque dépendante de la géométrie des objets spatiaux sélectionnés.

Dans cet état de l'art, nous avons souhaité présenter les différents concepts permettant de décrire les objets géographiques dont la délimitation précise est impossible. Les différentes théories et implémentations recensées offrent de nombreuses possibilités pour modéliser l'imprécision spatiale. Nous nous sommes particulièrement penché sur les différentes implémentations que nous avons catégorisées selon leur méthode de construction. Ainsi, nous distinguons les implémentations basées sur une construction en intension et les implémentations basées sur une construction en extension.

La modélisation de l'imprécision spatiale est donc un champ de recherche riche, qui offre au géographe de nombreux outils théoriques permettant de travailler efficacement avec les nombreux objets spatiaux aux frontières imprécises auxquels nous sommes régulièrement confrontés. Bien que la considération de l'imprécision des objets spatiaux soit assez ancienne, la formalisation de modèles et encore plus leur implémentation, est un champ de recherche encore actif comme le montre, par exemple, la récente réflexion autour de l'expression de l'imprécision spatiale au sein du format GML (Wei et al. 2017).

3.2 Les *relations de localisation* et leur modélisation

3.2.1 Éléments généraux sur la localisation par référencement indirect et formalisation d'une relation de localisation

3.2.1.1 Les concepts de *sujet* et *d'objet de référence*

Comme nous l'expliquions précédemment (cf. 2.1.1) un *indice de localisation* est composé de trois éléments : (a) un *sujet,* (b) un *objet de référence* et (c) une *relation de localisation,* qui, combinés, permettent d'exprimer un *référencement indirect.* Ainsi, on peut trouver ces trois éléments dans des phrases aussi variées que : « l'extérieur de la boîte est laqué » (Borillo 1998, p. 79), « la chaumière est au-dessus de la tour » (Vandeloise 1986, p. 101) ou « le chalet est à une heure de marche ». Cette décomposition ternaire semble faire l'objet d'un consensus scientifique, puisqu'elle est partagée par toutes les formalisations des *référencements spatiaux indirects* que nous avons rencontrés.

Les différences entre ces travaux portent avant tout sur le vocabulaire employé pour nommer ces concepts et dont Retz-Schmidt (1988) a proposé une synthèse. Le vocabulaire varie bien

évidement en fonction de la langue de publication, mais également en fonction de la discipline des auteurs. En linguistique francophone (Aurnague et al. 1997 ; Borillo 1998 ; Mathet 2000 ; Vandeloise 1986), par exemple, les termes de *site* et de *cible* sont employés pour désigner, respectivement, *l'objet de référence* et le *sujet.* La littérature anglophone abonde de termes pour désigner ces deux concepts, comme *primary object* et *reference object* employés par Clementini (2013) et Retz-Schmidt (1988), *figure* et *ground* utilisés par Talmy (1983) ou encore *trajector* et *landmark,* qui sont la utilisée par Vandeloise (1984) des termes *site* et *cible.* Mais sous cette grande disparité de vocabulaire se cachent en réalité les deux mêmes concepts.

3.2.1.2 *Relations spatiales et relations de localisation*

Comme pour les termes de *sujet* et *d'objet de référence,* différents termes sont utilisés comme synonymes de « *relation de localisation* », comme « *relation spatiale* », qui est le terme le plus fréquemment utilisé. Toutefois, contrairement aux différents synonymes de *sujet* et *d'objet de référence*, les termes de *relation spatiale* et de *relation de localisation* ne sont pas nécessairement considérés comme équivalents. Duchêne et al. (2019), par exemple, font la distinction entre les *relations spatiales,* qui sont énoncées avec une préposition spatiale (*e.g. sur, sous, dans, à côté,* etc.) et les *relations de localisation* qui décrivent une position sans nécessairement faire appel à une *préposition spatiale*, comme dans les phrases : « Je suis à cinq minutes de marche » ou « Je vois un chalet ». Cependant, cette distinction est souvent occultée. Pour Vandeloise (1986), toute relation décrivant une position, avec ou sans *préposition spatiale,* est une *relation spatiale.* De son point de vue, la sémantique prime donc sur la morphologie.

De plus, dans les travaux de Bateman et al. (2010), les relations décrivant l'organisation spatiale d'un groupe (*e.g.* « être alignés ») sont considérés comme des *relations spatiales,* bien que ne décrivant pas une position. Si l'on accepte de qualifier ces relations, décrivant une organisation intra-groupe, comme des *relations spatiales* alors on ne peut pas considérer que l'ensemble des *relations spatiales* est inclus dans l'ensemble des *relations de localisation, i.e.* que toute *relation spatiale* et une *relation de localisation.*

Nous pourrions donc utiliser exclusivement le terme de *relation spatiale.* Cependant, le vocabulaire proposé par Duchêne et al. (2019) permet de distinguer les relations susceptibles d'être *spatialisées*, *i.e.* les *relations de localisation* des *relations spatiales,* qui, si l'on intègre les configurations intra-groupe, comme le propose Bateman et al. (2010), ne le sont pas nécessairement. Ainsi, dans la suite de ce travail nous parlerons exclusivement de *relations de localisation.*

Contrairement à ce que pourraient laisser penser les différents exemples *d'indices de localisation* présentés jusqu'ici, ces derniers peuvent contenir plus d'un *objet de référence* (Clementini 2013). Ce cas, moins fréquent, se présente lorsque la *relation de localisation* utilisée n'est pas *binaire,* c'est-à-dire qu'elle n'implique pas qu'un *sujet* et qu'un *objet de référence.* Le cas le plus fréquent est celui de la *relation de localisation* « entre » qui implique, au minimum, deux *objets de référence.* On parle alors de *relation de localisation ternaire.* En effet, si l'on peut dire que « La poste est entre le café et la banque », il est incorrect d'utiliser cette *relation de localisation* avec un seul *objet de référence.* La phrase « Je suis entre l'université », par exemple, est fautive et incompréhensible.

Cependant, tous les *indices de localisation* composés de trois objets, n'impliquent pas nécessairement une *relation de localisation ternaire* (Duchêne et al. 2019). L'un des objets peut, par exemple, être le support des deux autres, c'est par exemple le cas lorsqu'une position est

décrite sur un itinéraire, comme dans la phrase « le parking est avant le pont ». De même, une phrase comme : « Il est à l'angle de la rue Saint-Jacques et de la rue Pierre et Marie Curie », qui contient trois objets spatiaux : *le sujet* (« Il ») et deux objets de référence (« rue Saint-Jacques » et « rue Pierre et Marie Curie »), ne contient pas de *relation de localisation ternaire.* Dans ces deux cas, on peut recombiner l'énoncé en un ensemble *d'indices de localisation* utilisant des *relations de localisation binaires.* Par exemple, « l'angle de la rue Saint-Jacques et de la rue Pierre et Marie Curie » peut être considéré comme un seul *objet de référence,* cette description de position peut s'interpréter comme deux *indices de localisation :* « Je suis à un endroit et cet endroit est à l'intersection de la rue Saint-Jacques et de la rue Pierre et Marie Curie ». Ces exemples n'intègrent donc pas de *relations de localisation ternaires.* À l'inverse, des phrases ne contenant qu'un seul *objet de référence* peuvent utiliser des *relations de localisation ternaires.* On pourra par exemple dire : « La vache est entre les arbres », dans ce cas, seul un *objet de référence,* « les arbres », est présent, mais celui-ci est composite. Aurnague et al. (1993) parlent alors de « *collection* ».

3.2.1.3 Contexte d'interprétation et cadre de référence

Comme les différents exemples utilisés jusqu'ici le laissent supposer, certaines *relations de localisation* ne peuvent être interprétées — et donc *spatialisées* — sans une connaissance supplémentaire sur la configuration de la position décrite. C'est par exemple le cas dans des phrases telles que : « Elle est devant l'université » ou « La poste est à gauche ». Les *relations de localisation* « devant » et « à gauche » ont une signification dépendante du contexte.

Notre gauche et notre droite sont dépendantes de notre orientation et le « devant » de notre sens de déplacement (Vandeloise 1986). On pourra facilement se convaincre qu'il est illusoire d'interpréter ces *relations de localisation* sans une connaissance exogène, un *référentiel de directions* (ou *cadre de référence,* selon Clementini 2013). Pour reprendre l'exemple de l'indice de localisation : « Elle est devant l'université », on peut l'interpréter de deux manières différentes. Si le *cadre de référence* est l'université, alors on considèrera que son « devant » est la face où se situe l'entrée principale. Alors que si la référence est un observateur externe on pourra considérer que n'importe quelle positon située entre l'observateur et l'université sera « devant », car avec ce second référentiel, l'orientation du locuteur sert de référence. Les *relations de localisation* dont l'interprétation nécessite un *cadre de référence* sont généralement qualifiées de *projectives* et *directionnelles* (Duchêne et al. 2019).

L'interprétation de ces *relations de localisation* est compliquée par le fait que le *cadre de référence* ne soit pas nécessairement explicité dans *l'indice de localisation,* comme dans l'exemple précédent, « Elle est devant l'université », alors qu'il l'est dans la phrase « il est à ma gauche ». L'article défini « ma » indique que le locuteur utilise sa ligne de vue comme référence.

3.2.1.4 Modélisation formelle d'un *indice de localisation*

Dans leur ontologie, Bateman et al. (2010) définissent les notions *d'objet* (qui peut être localisé) et de *place* (le lieu où un *objet* peut être localisé). La particularité des *places* est qu'elles peuvent êtres définies à partir d'un *objet de référence,* ce qui permet la modélisation *d'indices de localisation récursifs,* comme dans la phrase « À gauche de l'ordinateur il y a une clé USB », tirée de Bateman et al. (2010). On retrouve dans cet exemple deux *indices de localisation distincts.* Le premier, décrit la position d'une clé USB à partir d'un *objet de référence* (ou *place* selon le vocabulaire de Bateman et al. (2010) dont la position est définie

par un second *indice de localisation.* Dans cette ontologie, le lieu « À gauche de l'ordinateur » est qualifié de *GeneralizedLocalisation.* Cet objet est lui-même composé de deux parties, la *SpatialModality,* qui correspond à ce que nous appelons *relation de localisation* (*À gauche de*) et le *relatum,* ou *objet de référence* selon notre vocabulaire (*l'ordinateur*). On peut remarquer que cette ontologie conserve la structure en trois éléments distincts (*objet à localiser, objet de référence* et *relation de localisation*) que nous avions déjà présentés. C'est une caractéristique également partagée avec la formalisation des *indices de localisation* proposée par Vasardani et al. (2013), dans le but de construire des croquis de situations à partir de descriptions textuelles de positions. Vasardani et al. (2013) proposent de représenter les *indices de localisation* par des *triplets,* de la forme : $\langle L, r, R_o \rangle$ où L est l'objet à localiser, r la *relation de localisation* et R_o *l'objet de référence.* Par exemple, la phrase « Je suis à côté d'une pizzeria » sera formalisée de la manière suivante : $\langle$Je, à côté, pizzeria$\rangle$. Ce formalisme en triplets est ensuite utilisé pour définir un graphe, dont les objets spatiaux (*i.e.* le L et le R_o d'un triplet) sont les nœuds et la *relation de localisation* les arêtes orientées. Cette formalisation permet, comme dans l'ontologie de Bateman et al. (2010) de définir des indices de localisation récursifs.

Comme le modèle de Vasardani et al. (2013), le modèle normalisé ISO-Space, proposé par Pustejovsky (2017), a pour objectif de faire le lien entre une description de position textuelle et sa représentation spatiale. Ce modèle est cependant beaucoup plus détaillé que la proposition de Vasardani et al. (2013). D'une part, car le modèle ISO-Space offre la possibilité de modéliser des déplacements, d'autre part, il est construit au dessus de l'ontologie de Bateman et al. (2010). Ainsi, certains concepts, comme la *spatial entity* (qui est l'objet à localiser) sont directement repris de GUM-Space.

D'autres formalisations des *relations de localisation* ont été proposées dans le domaine de la géomatique, plusieurs travaux nécessitant l'interprétation de *relations de localisation.* C'est par exemple le cas de la généralisation automatique, dont l'objectif est de simplifier l'information cartographiée, tout en conservant les relations géographiques entre objets. Par exemple, si l'on simplifie la géométrie d'une rue il est souhaitable que les bâtiments qui la longent, longent également la rue simplifiée. Ainsi, même si la donnée cartographiée ne correspond pas parfaitement à la réalité elle en conserve une caractéristique importante, les bâtiments sont alignés le long de la rue. Pour ce faire, il est nécessaire d'expliciter ces relations entre objets cartographiés. Duchêne (2004) et Gaffuri et al. (2008) proposent, par exemple, de représenter ces relations sous la forme d'objets portant des contraintes quant à leur localisation. Quant à Touya et al. (2012), ils proposent une ontologie permettant de représenter les *relations de localisation* entre objets cartographiques, mais également les méthodes permettant de vérifier ces relations.

Toujours dans le domaine de la généralisation cartographique, Jaara et al. (2012) ont proposé un modèle permettant d'exprimer les *relations de localisation* entre des objets géographiques, liés à une base de données et des objets thématiques qui s'y positionnent. Par exemple, un accident de la route est un objet thématique, lié à un objet géographique, le réseau routier. La modélisation de ces relations permet de conserver un lien cohérent entre ces deux types d'objets lors du changement des objets géographiques, par exemple lors du passage à un autre niveau de détail. Comme dans les travaux de Duchêne (2004), Gaffuri et al. (2008) et Touya et al. (2012), ce modèle permet donc d'exprimer des relations entre objets que l'on veut voir conservées lors d'une modification. Bien que traitant de *relations de localisation,* ces travaux adoptent une modélisation très centrée sur leur domaine d'application. Jaara et al. (2012) identifient, par exemple, deux types d'objets, les *objets supports* et les *objets thématiques.* Bien que pouvant tous deux jouer le rôle de *sujet* ou *d'objet de référence,* ils ne sont pas distingués selon ce critère, mais en fonction de leur nature, ce qui rend ce modèle assez

différent de ce que proposent Bateman et al. (2010) et Pustejovsky (2017).

Dans un domaine d'application assez différent, l'ontologie FRSO (Hudelot et al. 2008a) propose une formalisation des *indices de localisation* destinée à la segmentation automatique d'images médicales. Les positions relatives des organes humains étant connues a priori, la formalisation de cette connaissance permet d'ajouter des connaissances exogène lors de la segmentation automatisée des images. Une des particularités de l'ontologie de Hudelot et al. (2008a) est qu'elle définir un concpet, *ReferenceSystem,* qui permet de définir un *cadre de référence.*

Enfin, Trinh (2012) propose un modèle permettant de formaliser des *relations de localisations* entre objets au sein d'une scène 3D. Comme dans l'ontologie FRSO, les *relations de localisation* sont modélisées comme des concepts et non comme des relations. Ce modèle propose également la prise en compte de la notion de *cadre de référence,* sauf que, contrairement à la proposition d'Hudelot et al. (2008a), deux cadres de référence distincts sont définis : le premier défini implicitement et un second défini explicitement, lorsque les contraintes modélisées impliquent la présence d'un observateur.

Pour conclure sur ces différentes formalisation des *indices de localisation,* on peut remarquer, comme le signale Duchêne et al. (2019), deux point essentiels. Le premier est celui qui consiste à modéliser les *relations de localisation* comme des concepts, ce qui par ailleurs la solution majoritairement retenue. Le second point est que la notion de *cadre de référence* est rarement modélisée alors que, comme nous l'expliquions précédemment, elle est indispensable à l'interprétation de certaines *relations de localisation.*

3.2.2 Classification et ontologies des *relations de localisation*

Plusieurs catégories de *relations de localisation* peuvent êtres définies. On peut par exemple distinguer celles qui sont exprimées à l'aide d'une *préposition spatiale* (*i.e.* les relations spatiales) et celles qui ne le sont pas. Mais, on peut également utiliser d'autres critères, par exemple sémantiques ou morphologiques. De nombreux travaux ont cherché à catégoriser les *relations de localisation* en fonction de ces critères (ou d'autres) à la fois pour en faciliter la compréhension, pour mettre en évidence des similarités ou des redondances, mais également dans le but d'appliquer ces classifications à des cas concrets, comme la *spatialisation d'indices de localisation.* Nous allons présenter ces différentes classifications proposées dans la littérature et ce à l'aide d'une démarche en deux étapes. Dans un premier temps, nous présenterons les différentes classifications des *relations de localisation* proposées dans la littérature, puis nous nous focaliserons sur une catégorie particulière de classification, les *ontologies,* qui formalisent ces classifications.

3.2.2.1 Classification des *relations de localisation*

La classification de *relations de localisation* nécessite de définir un ensemble de critères de catégorisation. La majorité des catégorisations de *relations de localisation* que nous avons rencontrées utilisent un seul critère, par exemple la *sémantique,* ou le *niveau d'astraction.* Mais on trouve également des organisations « hybrides », qui combinent plusieurs critères.

Le choix de ce critère nous semble fortement lié au domaine d'application de la classification et plus encore à sa discipline de rattachement. En linguistique, par exemple, les classifications sont généralement organisées suivant un critère sémantique. Par exemple, on distinguera les *relations de localisation* traduisant un mouvement, de celles décrivant une position fixe (Borillo

1998). À l'inverse, les classifications réalisées dans des domaines se rattachant à l'informatique et généralement constituées en vue d'une implémentation utilisent des critères qui renvoient à la méthode de formalisation de la relation de localisation, par exemple en distinguant les *relations topologiques* (*i.e.* invariantes par déformation) et les *relations métriques,* nécessitant des mesures de distance ou d'angles.

Ce qui différencie ces deux types de classification est leur degré d'abstraction. En effet, les classifications basés sur la sémantique des *relations de localisation* adoptent un point de vue proche de l'utilisateur et de sa perception de l'espace, Alors que les classifications utilisant la formalisation des *relations de localisation* comme critère de classification sont plus proches de considérations mathématiques ou informatiques. Par ailleurs, Bucher et al. (2012) et Clementini et al. (2008) utilisent le critère de l'abstraction pour distinguer les *relations de localisations.* Clementini et al. (2008), par exemple distinguent trois classes, le niveau mathématique qui a trait à la formalisation des *relations de localisation,* le niveau informatique, qui correspond à l'implémentation de cette formalisation et enfin le *niveau utilisateur* où les *relations de localisation* sont définies d'une manière plus concrète du point de vue de l'utilisateur, *i.e.* équivalente à une classification basée sur la sémantique des *relations de localisation.*

Classifications trouvées dans la littérature

Parmi les différentes classifications des *relations de localisation* que nous avons recensées, la classification de Borillo (1998) est représentative des classifications fondées sur un critère sémantique. Borillo (1998) propose une classification selon deux critères sémantiques, distinguant les *relations spatiales statiques* des *dynamiques*, et les *relations spatiales internes* (ou *topologiques*) des *relations spatiales externes* (ou *projectives*). Le premier critère différencie les relations décrivant un mouvement (*dynamiques*) de celles désignant une position invariable dans le temps (*statique*). Le second critère distingue les *relations spatiales* décrivant une situation où le sujet partage sa position, ou du moins une partie, avec l'objet de référence (*i.e.* les relations caractérisées d'internes), des situations où la position du sujet et de l'objet de référence sont disjointes (*i.e.* les relations caractérisées d'externes). Pour Borillo (1998), l'ensemble des relations de localisation est réductible à deux catégories sémantiques, les *relations topologiques* (ou *internes*) et les *relations projectives* (ou *externes*). La définition des *relations topologiques* utilisée par Borillo (1998) est donc équivalente à celle que l'on retrouve dans les autres classifications présentées. La catégorie des *relations projectives* a, quant à elle, une définition beaucoup plus large que celle qui en est donnée dans d'autres classifications. Pour Borillo (1998), les relations dérivant une orientation (*e.g.* « au nord de »), une distance (*e.g.* « proche de ») ou une position sur l'axe vertical (*e.g.* « sous »), qui sont distinguées dans d'autres classifications, sont ici regroupées en une seule classe.

Bateman et al. (2010) distinguent quand à eux les *relations de distance*, les *relations fonctionnelles* et les *relations relatives.* Cette proposition de classification adopte une démarche hybride, combinant à la fois des critères sémantiques et des critères liés à l'implémentation. Les *relations fonctionnelles* correspondent, en effet, à des *relations de localisation* définies du point de vue de l'utilisateur, alors que les *relations de distance* sont plus proches de l'implémentation.

Quant à la classification de Pustejovsky (2017), celle-ci distingue quatre classes de *relations de localisation* : (a) les *relations topologiques*, (b) les relations « directionnelles ou orientationnelles », (c) *les relations métriques* et (d) les relations liées au mouvement d'un objet. Comme pour la classification de Bateman et al. (2010), il s'agit d'une classification « hybride, » où cer-

taines classes sont définies selon des critères abstraits, comme la classe des *relations métriques* et d'autres suivant des critères fonctionnels, comme la classe des relations liées au mouvement d'un objet.

D'autres travaux (Hudelot et al. 2008a) utilisent également une catégorisation en deux classes, similaire à celle de Borillo (1998), mais basés sur des critères différents. Hudelot et al. (2008a), par exemple, distinguent les *relations topologiques* des autres relations, qualifiées de *métriques,* classe elle-même subdivisée en deux catégories, les *relations directionnelles* et de *distance.* Bien que similaires, ces classes ne sont pas équivalentes à celles proposées par Borillo (1998). En effet, la classification de Borillo (1998) se fonde sur des critères fonctionnels, plus proche du point de vue de l'utilisateur. Même si le terme de « topologique » est utilisé, il ne qualifie pas la théorie mathématique, mais, plus généralement, les *relations de localisation* impliquant un partage de position, comme l'indique l'utilisation par Borillo (1998) du terme, ici employé comme synonyme, de *relation interne.* La classification proposée par Hudelot et al. (2008a) est très similaire à celle proposée par Kuiper et al. (1988) (qui distinguent les relations *topologiques* ou *métriques*). Louwsma et al. (2006) adoptent quand à eux une logique différente, le premier niveau de leur classification distingue les relations *métriques* et *non-métriques*, ce qui peut sembler similaire aux travaux de Hudelot et al. (2008a) et Kuiper et al. (1988), mais Louwsma et al. (2006) incluent dans les relations *non-métriques* les *relations projectives* et les *relations topologiques.* Par conséquent, ils propose avant tout une distinction entre *relations de localisation qualitatives* et *relations de localisation quantitatives.* Bloch (2013) proposera une extension de la classification d'Hudelot et al. (2008a), en y ajoutant une nouvelle classe au premier niveau hiérarchique, celle des *relations de localisation complexes,* incluant les *relations ternaires, n-aires* et certaines *relations binaires* comme celle énoncée par la préposition « parallèle à ».

Comme le font remarquer Duchêne et al. (2019), l'ensemble des classifications présentées ici, qu'elles soient organisés suivant une logique fonctionnelle ou formelle, proposent toujours une classe bien définie pour les *relations topologiques.* Les autres catégories sont plus variables, par exemple, la classe des *relations projectives* peut inclure les relations métriques, comme dans la classification de Borillo (1998), ou non, comme dans les classifications de Bateman et al. (2010) et Pustejovsky (2017). De même, le terme de *relations orientationnelles* peut être utilisé comme un synonyme de *relations directionnelles,* ou non. Duchêne et al. (2019) proposent d'utiliser le terme de *relations orientationnelles* pour qualifier spécifiquement une sous-catégorie des *relations directionnelles,* l'orientation relative d'un objet par rapport à un segment, comme dans *l'indice de localisation* : « J'ai pris la première à droite ». Cette distinction nous semble pertinente pour présenter les différentes méthodes de modélisation des *relations de localisation,* c'est pourquoi dans la suite de ce travail nous distinguerons les *relation orientationnelles* des *relations directionnelles.*

3.2.2.2 Taxonomies et ontologies des *relations de localisation*

Les ontologies se distinguent des classifications précédemment présentées par un travail supplémentaire de formalisation des relations de localisation. Gruber (1993) définit les ontologies comme la spécification d'une conceptualisation, partagée dans un domaine. Ainsi, si les classifications précédentes peuvent être reconnues dans leur discipline (*e.g.* la classification de Borillo (1998) en linguistique), il ne s'agit pas de travaux visant à définir une base conceptuelle partagée, contrairement à des ontologies comme GUM-Space, par exemple.

D'un point de vue formel, les ontologies peuvent être représentées avec une grande variété

de langages, généralement basés sur la logique du premier ordre. Gruber (1993), utilise par exemple le langage KIF. La majeure partie des ontologies récentes sont formalisées à l'aide du langage OWL, porté par le W3C dans l'objectif de développer un « web sémantique ».

On retrouve dans la littérature scientifique plusieurs propositions d'ontologies des *relations de localisation.* Duchêne et al. (2019) en ont identifié 4 : GUM-Space (Bateman et al. 2010), ONTOAST (Miron et al. 2007), FRSO (Hudelot et al. 2008a) et l'ontologie proposée par Dasiopoulou et al. (2005). Ces 4 ontologies ne sont pas nécessairement construites pour formaliser exclusivement des *relations de localisation.* Il peut, en effet, s'agir d'ontologies applicatives ayant, pour diverses raisons, nécessité l'ajout de *relations de localisation,* c'est par exemple le cas de l'ontologie de Dasiopoulou et al. (2005). Ainsi, les différents choix de modélisation qui ont été faits peuvent être très spécifiques au domaine d'application de l'ontologie. C'est d'ailleurs cette spécificité des ontologies préexistantes qui peut amener certains auteurs, notamment Hudelot et al. (2008a), à construire une nouvelle ontologie *ad hoc.*

La plus récente, et probablement la plus ambitieuse, d'entre elles est l'ontologie GUM-Space (aussi connue sous le nom d'OntoSpace), déjà présentée (Bateman et al. 2010). Cette dernière définit une hiérarchie assez complète des différentes *relations de localisations.* Le premier niveau hiérarchique de l'ontologie distingue trois classes : 1. les relations de distance (*SpatialDistanceModality*), 2. les relations fonctionnelles (*FunctionalSpatialModality*) et 3. les relations relatives (*RelativeSpatialModality*). Ces trois catégories ne sont cependant pas mutuellement disjointes, un même concept peut donc hériter de plusieurs de ces classes. C'est par exemple le cas des *relations de localisation Front, Back, Left* ou *RightProjectionExternal,* qui décrivent une situation où le sujet est à l'extérieur et, respectivement, devant, derrière, à gauche ou à droite de l'objet de référence. Bateman et al. (2010) considèrent que ces concepts se rattachent, à la fois, aux *RelativeSpatialModality,* puisqu'il s'agit de *relations projectives,* mais également aux *SpatialDistanceModality,* puisqu'une notion de proximité est implicitement présente dans ces concepts. En effet, on ne dira pas de deux objets très éloignés, que l'un est « devant » l'autre.

Contrairement à GUM-Space, les ontologies des *relations de localisation* proposées par Dasiopoulou et al. (2005), Hudelot et al. (2008a) et Miron et al. (2007) ont été construites pour application spécifique. L'ontologie de Dasiopoulou et al. (2005) est, par exemple, destinée à l'identification automatisée d'objets dans des vidéos. Cette dernière définit des relations topologiques et directionnelles.

Quant à ONTOAST (Miron et al. 2007), il s'agit d'une ontologie ne définissant que des *relations de localisation* qualitatives. Ces dernières peuvent êtres topologiques (les relations définies sont équivalentes à celles du modèle RCC8), directionnelles ou bien de distance.

Enfin, l'ontologie FRSO (*Fuzzy Spatial Relation Ontology*), proposée par Hudelot et al. (2008a), a pour objectif de permettre l'interprétation d'images et plus spécifiquement la segmentation automatique d'images médicales. Les auteurs justifient le développement d'une ontologie des *relations de localisation* par l'inadaptation des ontologies déjà existantes pour l'interprétation d'images. La particularité principale de l'ontologie FRSO est qu'elle est basée sur une extension floue de la *logique de description.* Dans cette ontologie, sont distinguées 8 relations directionnelles, 3 relations de distance et 8 relations topologiques sont définies.

3.2.3 Travaux sur la modélisation des différentes familles de relations

Nous allons à présent détailler les différents travaux proposés pour modéliser des familles spécifiques de *relations de localisation.* Pour ce faire, nous allons aborder chaque famille de *relations de localisation* en commençant par les *relations topologiques* qui, comme l'indiquent

Aurnague et al. (1997) sont les relations les plus simples à manipuler pour un être humain en plus d'être importantes pour la description d'une localisation (Egenhofer et al. 1995).

3.2.3.1 Les relations topologiques

Dans le domaine des SIG, deux grandes « familles » de modèles topologiques coexistent. La première est celle du modèle `RCC-8`, proposé par Randell et al. (1992) et de ses dérivés. Le modèle RCC-8 est un modèle formalisant les *relations topologiques* entre régions de deux dimensions. Dans ce modèle, les régions sont modélisées comme des *ensembles de points.* Ce modèle définit huit relations topologiques et méréologiques : (a) DC, pour *Disconnected,* décrivant une situation où les deux régions A et B n'ont aucun contact ; (b) EC, pour *Externally connected,* lorsque A et B ne partagent qu'une partie de leur frontière ; (c) PO (*Partially overlapping*), correspondant au cas où A et B partagent une partie de leur intérieur ; (d) TTP (*Tangential proper part*) et son inverse (TTP^{-1}), deux relations non commutatives, décrivant le cas où l'une des deux régions est incluse dans l'autre tout en partagant une partie de leur frontière ; (e) NTTP (*Non tangential proper part*) et son inverse ($NTTP^{-1}$), qui impliquent également une inclusion d'une des régions dans l'autre, mais sans frontière partagée ; et (f) A=B (*Equals*), décrivant une situation où A et B sont identiques (Figure 3.18). Ces dernières couvrent l'ensemble des possibles et sont mutuellement exclusives. Par conséquent, quelle que soit la configuration des deux régions A et B, une et une seule relation du modèle RCC est vérifiée, on parle alors de relations "*Jointly Exhaustive Parwise Disjoint*" (Duchêne et al. 2019) (JEPD).

Une caractéristique essentielle du modèle RCC-8 est qu'il permet le raisonnement sur les relations qu'il formalise. Ainsi, si l'on connaît deux des trois relations topologique entre trois objets deux à deux, il est possible d'inférer automatiquement la troisième relation. Ce processus s'effectue à l'aide d'une *table de transition.*

Bennett (1994) propose un premier modèle dérivé du travail de Randell et al. (1992), le modèle RCC-5, réduisant, comme son nom l'indique, le nombre des *relations topologiques* modélisées à 5 (Figure 3.18). Les relations DC et EC sont regroupées en une nouvelle relation, DR (« *discrete* »), indiquant que deux régions ne partagent pas leur intérieur. De même, les relations TPP et NTPP (et leurs inverses) sont combinées en une seule relation (et son inverse), PP (*Proper parts*), indiquant qu'une région est incluse dans la seconde. En réduisant le nombre de *relations topologiques* modélisées, le modèle RCC-5 perd en expressivité. Cependant, l'objectif annoncé pour ce modèle n'est pas d'enrichir la sémantique du modèle RCC-8 (ce qui est le but de la majorité des extensions), mais de faciliter le raisonnement automatisé en simplifiant la *table de transition* (Bennett 1994).

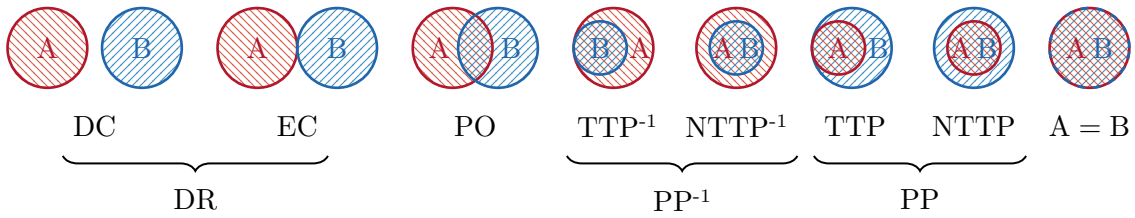
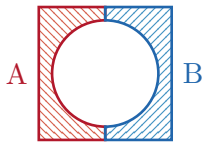
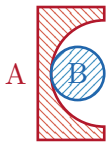
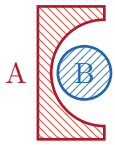
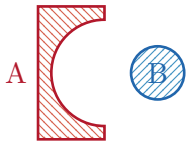


Figure 3.18 – Les modèles RCC-8 et RCC-5 et leurs relations topologiques.

Pour améliorer la modélisation des relations topologiques avec des régions concaves, Cohn et al. (1997) proposeront, une extension à 23 relations du modèle RCC, définissant le modèle RCC-23. La relation *externally connected* (EC) est décomposée en 9 nouvelles relations, permettant,

	OUTSIDE_OUTSIDE_EC	P_INSIDE_INSIDEi_EC
EC		

(a) Exemple de décomposition de la relation topologique EC

	INTSIDE_OUTSIDEi_DC	P_OUTSIDE_OUTSIDE_EC
DC		

(b) Exemple de décomposition de la relation topologique DC

Table 3.4 – Extrait des nouvelles relations topologiques proposées par le modèle RCC-23, d'après Cohn et al. (1997).

par exemple, de faire la distinction entre un contact avec inclusion dans l'enveloppe convexe et sans. De même, la relation *disconnected* (DC) est décomposée en 8 nouvelles relations, ce qui permet de distinguer une situation où un objet « enveloppe » l'autre (Tableau 3.4). Un modèle RCC-62 sera également proposé pour répondre à ce même problème (Yang et al. 2007). Contrairement au modèle RCC-23, le modèle RCC-62 traite les régions en distinguant leur *intérieur* de leur *frontière* et de leur *extérieur,* ce qui permet de définir plus de relations topologiques, au prix d'une complexification conséquente.

Le modèle RCC sera également étendu d'autres manières, notamment pour prendre en compte la troisième dimension avec les modèles RCC-3D, VRCC-3D et VRCC-3D+ ou la temporalité avec des travaux couplant le modèle RCC-8 à l'algèbre temporelle d'Allen (Leopold et al. 2015), mais ces extensions s'éloignent cependant du cadre de ce travail.

La seconde « famille » de modèle des relations topologiques est celle du *modèle des 4 intersections* (4IM, Egenhofer 1989) et de ses dérivés, qui, comme pour le modèle RCC-8, sont nombreux. Ces deux modèles partagent leurs fondements. Tous deux s'appuient sur le paradigme des *ensembles de points* pour modéliser les objets géométriques et définissent les *relations topologiques* à partir d'opérations ensemblistes sur ces ensembles de points. De plus, dans les modèles RCC-8 (Randell et al. 1992) et 4IM, les relations topologiques définies sont exhaustives et mutuellement disjointes (JEPD). Les deux modèles ont cependant quelques différences, la première est que le modèle 4IM et ses dérivés ne permettent pas de raisonner à partir des *relations topologiques,* il n'est donc pas possible d'inférer une relation à partir de relations topologiques et d'objets connus. Cependant, le *modèle des intersections* permet de modéliser des *relations topologiques* entre des régions, des lignes et des points, contrairement au modèle RCC-8 qui se limite aux régions.

Dans la première version du *modèle des intersections,* le modèle 4IM, 8 *relations tolopologiques*, équivalentes à celles du modèle RCC-8 (Duchêne et al. 2019), sont définies Egenhofer (1989) et Egenhofer et al. (1991a, 1990). Celles-ci sont définies à partir d'une matrice 4 valeurs booléennes, détaillant les intersections entre les composantes de deux objets géométriques

a et b. La première d'entre elles est *l'intérieur* de l'objet, notée a^o ou b^o, en fonction de l'objet concerné. La seconde, notée δa ou δb, est la *frontière* de l'objet. Ces deux ensembles, *intérieur* et *frontière,* sont définis pour chaque type de géométrie, par exemple la frontière d'une ligne est un ensemble de deux points, le premier et le dernier de la ligne. Pour un point, les deux notions sont équivalentes. La construction de la *matrice* d'intersection consiste alors en l'étude des intersections, deux à deux, de la *frontière* et de l'intérieur de deux objets géométriques :

$$4\text{IM}(a,b) = \begin{bmatrix} a^o \cap b^o \neq \emptyset & a^o \cap \delta b \neq \emptyset \\ \delta a \cap b^o \neq \emptyset & \delta a \cap \delta b \neq \emptyset \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Si l'intersection entre deux ensembles donnés est vide, alors la valeur inscrite dans la matrice est « F », dans le cas contraire, la valeur est « V ». Par exemple, une *relation topologique d'inclusion* (nommée *overlap,* dans le modèle 4IM et correspondant au prédicat PO du modèle RCC-8, cf. figure 3.18) correspond à la matrice : $\left[\begin{smallmatrix} V & V \\ V & V \end{smallmatrix}\right]$, étant donné que les quatres *intersections* définies dans le modèle 4IM ne sont pas nulles. La *matrice d'intersections* de ce modèle permet de définir 16 configurations différentes. Cependant, la moitié d'entre elles ne sont pas réalisables, comme par exemple la matrice : $\left[\begin{smallmatrix} F & V \\ V & F \end{smallmatrix}\right]$, qui décrit une situation où les deux intérieurs et les deux frontières ne s'intersectent pas, mais où la frontière de chaque objet intersecte l'intérieur de chaque objet. Comme pour le modèle RCC-8, les 8 configurations possibles sont toutes nommées (*disjoint, contains, inside, equal, meet, covers, coveredBy* et *overlap*), ce qui rend les *relations topologiques* définies plus intelligible et facile à manipuler que des matrices de valeurs booléennes.

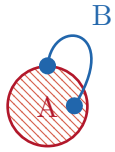
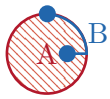
Dans le modèle 9IM, une extension du modèle 4IM proposée par Egenhofer et al. (1991b), la *matrice des intersection* est étendue par l'ajout d'un nouvel ensemble, *l'extérieur* (*i.e.* tous les points qui n'appartiennent ni à l'intérieur, ni à la frontière de l'objet), noté a^e (ou b^e en fonction de l'objet). La matrice initiale est alors étendue en une matrice de 9 valeurs booléennes :

$$9\text{IM}(a,b) = \begin{bmatrix} a^o \cap b^o \neq \emptyset & a^o \cap \delta b \neq \emptyset & a^o \cap b^e \neq \emptyset \\ \delta a \cap b^o \neq \emptyset & \delta a \cap \delta b \neq \emptyset & \delta a \cap b^e \neq \emptyset \\ a^e \cap b^o \neq \emptyset & a^e \cap \delta b \neq \emptyset & a^e \cap b^e \neq \emptyset \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

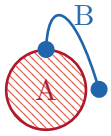
Ce nouveau modèle ne permet pas de modéliser des configurations nouvelles entre deux régions, mais il permet de distinguer plus finement les configurations incluant une ligne, comme le montre le tableau 3.5.

Le modèle 9IM sera lui-même étendu par le modèle DE-9IM proposé par Clementini et al. (1993). Modèle qui sera par ailleurs normalisé par l'OGC et par l'ISO, ce qui a conduit à son adoption massive dans les SIG (Strobl 2008). Comme son sigle le laisse supposer, ce nouveau modèle conserve la matrice à 9 valeurs du modèle 9IM, cependant les valeurs qui y sont inscrites ne sont plus limitées aux booléens. En effet, le *dimensions extend nine-intersection model* (DE-9IM) ajoute la possibilité de spécifier la *dimension* des intersections. La matrice d'intersection de deux objets a ou b est alors :

$$\text{DE-9IM}(a,b) = \begin{bmatrix} \dim(a^o \cap b^o) & \dim(a^o \cap \delta b) & \dim(a^o \cap b^e) \\ \dim(\delta a \cap b^o) & \dim(\delta a \cap \delta b) & \dim(\delta a \cap b^e) \\ \dim(a^e \cap b^o) & \dim(a^e \cap \delta b) & \dim(a^e \cap b^e) \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

	$\begin{bmatrix} V & V & V \\ V & V & V \\ \mathbf{V} & F & V \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} V & V & V \\ V & V & V \\ \mathbf{F} & F & V \end{bmatrix}$
overlap $\equiv \begin{bmatrix} V & V \\ V & V \end{bmatrix}$		

(a) Exemple de décomposition de la relation topologique *overlap*

	$\begin{bmatrix} F & F & V \\ F & V & V \\ F & \mathbf{V} & V \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F & F & V \\ F & V & V \\ F & \mathbf{F} & V \end{bmatrix}$
meet $\equiv \begin{bmatrix} F & F \\ F & V \end{bmatrix}$		

(b) Exemple de décomposition de la relation topologique *meet*

TABLE 3.5 – Exemple des raffinements de *relations topologiques* permis par le modèle 9IM, d'après EGENHOFER et al. (2011).

Avec $\dim(x)$, une fonction renvoyant la dimension de l'intersection, soit 0 pour un point, 1 pour une ligne et 2 pour une région. Malgrè cette modification substentielle, le modèle DE-9IM reste compatible avec le modèle 9IM, les matrices numériques du modèle DE-9IM étant faciles à convertir en matrices binaires, compatibles avec le modèle 9IM. Comme les autres extensions présentées, cette extension du modèle 9IM augmente l'expressivité du *modèle des intersections* et offre, par exemple, la possibilité de distinguer un contact ponctuel, d'un contact en une ligne, *i.e.* de distinguer un voisinage de Von Neuman, d'un voisinage de Moore (Tableau 3.6). Cependant, cette nouvelle proposition se heurte aux mêmes limites que les modèles RCC-23 et RCC-62, à savoir le grand nombre de cas possibles. Conscient de ce problème, CLEMENTINI et al. (1993) complètent le modèle DE-9IM avec le *calculus based model* (CMB). Ce second modèle propose de définir cinq *prédicats topologiques* (*in, cross, overlap, touch, et disjoint*), correspondant à des configurations particulières de *matrices d'intersection*, plus faciles à apprender et à manipuler.

Comme pour le modèle RCC-8, des extensions tridimensionnelles du *modèle des intersection* ont été proposées. DE LA LOSA (2000) propose, par exemple, une extension du modèle 9IM à la troisième dimension. Si le format et le processus de construction de la *matrice d'intersection* demeurent identiques, l'ajout du volume comme primitive topologique conduit à l'apparition de nouvelles relations topologiques qui étaient irréalisables, comme par exemple, la relation correspondant à la matrice : $\begin{bmatrix} F & V & F \\ F & F & V \\ V & V & V \end{bmatrix}$, décrivant une situation où la frontière d'une géométrie intersecte l'intérieur de la seconde géométrie, sans qu'il y ait intersection de leurs intérieurs, configuration uniquement possible en 3D, correspondant, par exemple, à l'intersection d'une anse et d'un panier.

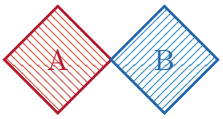
	$\begin{bmatrix} F & F & 2 \\ F & \mathbf{0} & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F & F & 2 \\ F & \mathbf{1} & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} F & F & V \\ F & V & V \\ V & V & V \end{bmatrix}$		

Table 3.6 – Exemple des raffinements de *relations topologiques* permis par le modèle DE-9IM.

3.2.3.2 Les relations de distance

Les relations de distance permettent de décrire l'éloignement entre le *sujet* et un *objet de référence.* Il s'agit d'un type de relation que l'on retrouve fréquemment dans notre contexte applicatif. Un élément important des relations de distance est qu'elles peuvent être exprimées de différentes manières, toutes disposant de leurs propres contraintes influençant leur spatialisation. Tout d'abord les distances peuvent être exprimées de manière quantitative, c'est par exemple le cas dans des phrases telles que : « Elle est à 50 mètres ». Mais cette même notion de distance peut être exprimée de manière qualitative, comme dans la phrase « Le meilleur restaurant japonnais de la ville est juste à côté ». Dans les deux cas, la *relation de localisation* utilisée traduit une notion de distance, mais d'une manière différente, qui imposera une adaptation de la méthode de *spatialisation.*

Les *relations de distance* ne se limitent pas nécessairement à l'expression de distances métriques. Les temps de déplacement, par exemple, sont également une forme de distance et par conséquent, il n'y a pas de différence sémantique entre les phrases : « Il est proche », « Il est à cent mètres » et « Il est à quelques minutes de marche » (Borillo 1998 ; Egenhofer et al. 1995). Comme les distances métriques, les temps de déplacement peuvent aussi bien s'exprimer de manière qualitative, comme dans l'exemple précédent, ou quantitative, comme dans la phrase : « C'est à trois minutes de marche ». Ces différents types de distance peuvent tous se retrouver dans les alertes que nous traitons. Ainsi, nous présenterons ici aussi bien les distances métriques (qualitatives et quantitatives) que les temps de déplacement.

Un second aspect important à prendre en compte est la méthode de calcul de la distance. Celle-ci doit-elle être calculée à vol d'oiseau (*i.e.* distance euclidienne) ou sur le réseau ? On peut également adopter d'autres approches, comme la distance de Manhattan, offrant une bonne approximation de la *distance réseau* pour des maillages orthogonaux. Dans notre contexte d'application, différentes méthodes de calcul de la distance peuvent être employées. La *distance euclidienne* semble, en effet, plus adaptée au calcul de distances estimées visuellement, comme dans la phrase : « Il y a un chalet loin devant moi », alors que la distance réseau est plus pertinente pour *spatialiser* des *indices de localisation* décrivant une durée ou un distance de déplacement, comme dans la phrase : « Nous avons marché pendant 2 heures ».

Si le calcul de la *distance euclidienne* ne pose pas de problèmes spécifiques, ce n'est pas le cas pour la *distance réseau.* Divers algorithmes existent, dont les plus connus sont l'algorithme du plus court chemin de Dijkstra (1959), et l'algorithme A* (Hart et al. 1968), plus rapide mais ne renvoyant pas nécessairement le chemin le plus court. Ces deux algorithmes peuvent être utilisés pour approximer le trajet suivi sur un réseau donné et entre deux points, comme le proposent Berli et al. (2018) et Bunel et al. (2018) dans leurs travaux de reconstitution de flux

maritimes à partir de matrices origine-destination. Mais cet usage implique de faire l'hypothèse que le trajet réellement suivi est le chemin le plus court (ou le moins couteux), ou tout du moins qu'il tend à s'en rapprocher. Or cette hypothèse est assez contraignante, aussi bien pour la modélisation des flux maritimes, puisqu'elle peut contredire certaines réalités météorologiques ou historiques, que du trafic routier, bien que ces deux algorithmes soient régulièrement utilisés à cet effet. Une illustration de ce problème peut être trouvée dans les travaux de Pailhous (1970), sur les itinéraires suivis par les chauffeurs de taxi (avant l'introduction des systèmes d'aide à la navigation). Dans ses travaux, Pailhous (1970) met en évidence que, lors de leurs déplacements, les chauffeurs de taxis cherchent en priorité à rejoindre le réseau routier principal, composé des grandes avenues et des voies périphériques, le long desquels ils effectueront la majorité du trajet. L'entrée dans le réseau routier secondaire, qui est repoussée au plus tard possible, s'effectue généralement à proximité de la destination (Lagesse et al. 2016). Ce type d'itinéraire est sensiblement différent du plus court chemin, l'utilisation des algorithmes de Dijkstra (1959) ou A* (Hart et al. 1968) est donc à relativiser. Ce même problème se pose également, mais d'une manière différente, dans notre contexte applicatif. En effet, des *indices de localisation* tels que : « J'ai marché 10 kilomètres depuis mon point de départ » ne seraient pas nécessairement spatialisés de manière satisfaisante en utilisant un algorithme renvoyant le plus court chemin, la plupart des alertes concernant des trajets touristiques qui, par définition, sont plus proches de la déambulation que du déplacement rationnel.

Distances métriques quantitatives

Lorsqu'une relation de distance entre le sujet et l'objet de référence est exprimée de manière quantitative, comme dans la phrase : « Je suis à 300 mètres », on peut s'attendre à ce que l'exercice de *spatialisation* soit assez simple. Il n'est en effet pas nécessaire, contrairement aux distances qualitatives, d'estimer la distance à modéliser, celle-ci étant déjà connue. Cependant, une valeur de distance quantifiée n'est pas nécessairement précise. En effet, compte tenu de notre contexte, les distances quantitatives sont quasi-exclusivement estimées par une personne, généralement le requérant et non à l'aide d'une mesure, ce qui pourrait être le cas si nous avions à *spatialiser* des phrases telles que : « D'après le GPS, j'ai roulé 123 km ». Bien entendu, une distance mesurée peut également être imprécise, par exemple, à cause d'une mauvaise calibration de l'outil de mesure, mais il s'agit d'un cas assez différent, car lié à un événement particulier, alors que la mauvaise estimation d'une distance par un être humain est systémique.

Au problème de la mauvaise estimation des distances s'ajoute un autre phénomène impactant la qualité des estimations des distances, *l'attraction des nombres ronds* (Durand 1961). Ce phénomène, initialement mis en évidence lors de l'étude de la distribution des âges, implique une surreprésentation des valeurs se terminant par 0 et 5, à cause d'un arrondi de la personne recensée. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que les distances exprimées à « vue de nez » soient impactées par ce phénomène et toute autre forme d'arrondi.

Il est donc inutile d'espérer obtenir une bonne estimation de la distance, la *spatialisation* des *relations de distance* exprimant une distance métrique qualitative doit donc se faire en prenant en compte les différentes imprécisions qui peuvent exister.

Distances métriques qualitatives

L'expression de distances sous leur forme qualitative est extrêmement courante dans notre contexte applicatif. La spatialisation de ce type de *relation spatiale* présente une difficulté ma-

jeure, celle de l'interprétation de la *relation de localisation.* Ainsi, s'il peut être difficile de spatialiser une distance métrique quantitative, notamment à cause de l'imprécision de l'évaluation de la distance par le locuteur, il est encore plus difficile d'interpréter une relation de localisation quantitative telle que « proche de », notamment à cause de l'importance du contexte. Derungs et al. (2016) et Wallgrün et al. (2014) ont, par exemple, travaillé à l'interprétation de la relation de localisation "*near*", à partir, respectivement, d'un corpus de blogs dédiés à l'évaluation d'hôtels et d'un corpus d'indexation web. Wallgrün et al. (2014) aboutissent à la conclusion, déjà relevée par Egenhofer et al. (1995) dans son article *naive geography,* que les distances perçues peuvent êtres asymétriques.

Distances-temps et modèles de marche

S'il n'y a pas de différence sémantique fondamentale entre une *distance métrique* et une *distance-temps,* cela n'est pas le cas de leur processus de *spatialisation.* En effet, alors qu'une *distance métrique* peut être *spatialisée* directement, comme expliqué ci-dessus, il est nécessaire de transformer la *durée de parcours* en une distance parcourue pour *spatialiser* une *distance-temps.* On obtient alors une *distance métrique quantitative* que l'on peut alors traiter comme n'importe quelle distance de ce type. La *spatialisation* d'une *distance-temps* nécessite donc une étape supplémentaire, permettant de la transformer en une *distance métrique quantitative.* Pour ce faire, il nécessaire d'employer un modèle *ad hoc.*

La solution la plus simple consiste à définir une vitesse de déplacement moyenne et de transformer le temps parcouru en une *distance métrique quantitative* à l'aide d'une règle de proportionnalité. Cette approche est assez restrictive, mais elle peut être satisfaisante pour des modèles agrégés ou à petite échelle et simulant des environnements isotropes (*i.e.* où la difficulté de déplacement est homogène), comme dans le modèle multi-agents MAGS (Moulin et al. 2003) simulant des comportements humains en milieu urbain. Dans ce modèle (Moulin et al. 2003), la vitesse de déplacement moyenne d'un marcheur est fixée à 5 km/h et ne varie pas, que ce soit en fonction du temps ou de l'espace. Cette approche et cette vitesse de déplacement ont également été retenues dans l'outil « zones de desserte » d'ArcGIS (ESRI 2020), permettant de calculer des isochrones de déplacement pédestre. Cette approche à « gros grain » n'est cependant pas adaptée à notre travail. En effet, l'hypothèse d'isotropie, inhérente à cette approche, ne permet pas de prendre en compte l'asymétrie des distances perçues. Cette approximation est permise par les (relativement) faibles contraintes de déplacement en milieu urbain. Mais elles ne sont pas comparables à celles du milieux montagnard, où il est fréquent de rencontrer de longues montées, des descentes escarpées ou des pierriers qui influent sur la vitesse de marche. L'estimation des distances de déplacement en milieu montagneux est donc réalisée, que ce soit dans le milieux scientifique ou par les pratiquants, avec des *modèles de marche* plus avancés, adaptant l'estimation de la vitesse de déplacement à la configuration du terrain.

Le plus ancien d'entre eux est le modèle de Naismith (1892), dont la formulation ne consiste qu'en une phrase, concluant la présentation d'une sortie dans un journal d'alpinisme (Duchêne et al. 2019). Cette règle énonce qu'une bonne estimation du temps de marche consisterait à compter une heure pour 3 miles (5 km) en distance planaire et d'y ajouter une heure de marche par tranche de 2 000 ft (600 m) de dénivelé positif (Naismith 1892). Avec ce modèle, la vitesse de marche (V) peut s'exprimer en fonction de la pente (S), de la manière suivante :

$$V = \frac{5 \times 0,6}{0,6 + 5 \times S} \tag{3.29}$$

Avec S la pente, dont l'expression est :

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \tan \theta \tag{3.30}$$

Où θ est l'angle de la pente, Δh le dénivelé et Δx la distance planimétrique. Cette formule peut être généralisée pour s'adapter à différentes valeurs de vitesses planimétriques (V_x) et ascensionnelles (V_h, en km/h) :

$$V = \frac{V_x \times V_h}{V_h + V_x \times S} \tag{3.31}$$

Une première correction de ce modèle sera proposée par Aitken (1977), qui suggère d'utiliser la règle définie par (Naismith 1892) pour estimer la vitesse de marche sur sentiers et de réduire la vitesse planimétrique (V_x) à 4 km/h pour estimer une vitesse de marche hors-sentier.

Les modèles d'Aitken (1977) et Naismith (1892) ne permettent, cependant, pas d'estimer la vitesse de marche en descente. Cet ajout sera du fait de Langmuir (1984), qui propose d'étendre le modèle de Naismith (1892) en : (a) *réduisant* le temps de marche estimé de 10 minutes, tous les 300 mètres de dénivelé négatif, si la pente est *faible* (*i.e.* si comprise entre -5 et -12 degrés) et (b) en *augmentant* le temps de marche estimé de 10 minutes, tous les 300 mètres de dénivelé négatif, si la pente est *forte* (*i.e.* si inférieure à -12 degrés). Dans la quatrième édition de son ouvrage de 1984, Langmuir (2013) proposera un second modèle, plus adapté à l'estimation de la vitesse de marche d'un groupe. La vitesse de marche est réduite à 4 km/h et les montées sont plus pénalisées, une heure de marche est ajoutée par tranche de 450 m de dénivelé positif. Ces deux versions corrigées du modèle de (Naismith 1892) par Langmuir (1984, 2013) peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$V = \begin{cases} \dfrac{V_x \times V_{h1}}{V_{h1} + V_x \times S} & \text{si } \theta > -5° \\ \dfrac{V_x \times V_{h2}}{V_{h2} - V_x \times S} & \text{si } -12° \leq \theta \leq -5° \\ \dfrac{V_x \times V_{h2}}{V_{h2} + V_x \times S} & \text{si } \theta < -12° \end{cases} \tag{3.32}$$

Avec V_{h1} la vitesse ascensionnelle (600 m/h dans Langmuir (1984) et 450 m/h dans Langmuir (2013), V_{h2} ascensionnelle en descente. Avec ces corrections il devient possible d'évaluer le temps de marche nécessaire pour effectuer un parcours complet, descente comprise. Le modèle de Naismith (1892) modifié par Aitken (1977) et Langmuir (1984) est fréquemment utilisé comme modèle de marche dans les SIG, il est par exemple implémenté dans grass (GRASS Development Team 2020).

Cependant, le modèle de Langmuir-Naismith à un défaut majeur, à savoir son comportement pour les faibles pentes (Figure 3.19). En effet, les vitesses de marche en descente estimées sont très importantes et en fort décalage avec la tendance observée pour les courbes définies pour les montées et les grandes descentes. Cet effet est particulièrement marqué dans la formulation originale du modèle, où les vitesses estimées peuvent approcher les 12 km/h, une vitesse

de marche très élevée, même dans des conditions optimales (Kerouanton 2020). Les vitesses de marche estimées par la seconde version du modèle (Langmuir 2013) semblent plus réalistes, la vitesse maximale étant d'environ 7 km/h. Cependant, la rupture entre l'estimation pour les fortes descentes et celle pour les faibles descentes subsiste, puisque si la vitesse estimée pour une pente de 12 degrés est d'environ 7 km/h, celle pour une pente de 13 degrés est d'environ 2,50 km/h. Malgré ses limites, le modèle Langmuir-Naismith propose une caractéristique intéressante, les vitesses de marches maximales ne sont pas atteintes sur le plat, mais dans les descentes, suffisamment pentues pour soulager le randonneur, mais pas assez prononcées pour être pénibles. Cette caractéristique est partagée avec le modèle de Tobler (1993), où la vitesse de marche est exprimée en fonction de la pente seule. Bien que présenté sous une forme analytique, ce modèle se base sur des données empiriques provenant de Imhof (1950).

$$V = g \times 6 \times e^{-3,5 \times |S+0,05|} \tag{3.33}$$

Ce modèle possède la particularité de disposer d'un coefficient de pondération g, permettant de faire varier l'estimation de la vitesse en fonction d'éléments exogènes, comme le mode de déplacement. Tobler (1993) en propose 3 valeurs : (a) $g = 1$, le cas standard, pour estimer un temps de marche sur sentier, (b) $g = 0,6$, lorsque la marche est faite hors-sentier et (c) $g = 1.25$, pour un déplacement à cheval.

Les modèles de Tobler (1993) et de Langmuir-Naismith sont les plus cités dans la littérature, probablement en raison de leur ancienneté et de leur simplicité. De nombreux autres modèles ont cependant été proposés, notamment par Irmischer et al. (2017), Kerouanton (2020) et Rees (2004). Comme le modèle de Tobler (1993) ces différents modèles sont basés sur des données empiriques, dont le comportement est modélisé par un modèle de régression. Rees (2004) propose par exemple d'estimer la vitesse de marche en fonction de la pente à l'aide d'une fonction quadratique :

$$V = \frac{1}{a + b \times S + c \times S^2} \tag{3.34}$$

Avec S la pente. Les valeurs des coefficients a, b et c sont respectivement 0,75, 0,09 et 14,60 s/m. Ce modèle à un comportement similaire a celui de Tobler (1993), mais contrairement à ce dernier, la vitesse de marche maximale est atteinte sur le plat et non sur une pente faiblement négative. Le modèle de Irmischer et al. (2017) est également similaire à celui de Tobler (1993). Comme ce dernier et contrairement au modèle de Rees (2004), la vitesse de marche maximale est atteinte pour une pente faiblement négative. Comme le modèle de Tobler (1993), le modèle de Irmischer et al. (2017) propose une variation pour l'estimation des vitesses hors-sentiers, mais également en fonction des genres (non représenté sur la Figure 3.19). Kerouanton (2020) propose également de prendre en compte des variables sociologiques lors de l'élaboration de son modèle, mais de manière plus approfondie que Irmischer et al. (2017). Sont, par exemple, pris en compte : la classe d'âge ou la régularité de l'activité.

Comme l'illustre la Figure 3.19, ces différents *modèles de marche* ont un comportement (relativement) similaire. Tous font l'hypothèse que la vitesse de marche décroît avec la pente (que ce soit en montée ou en descente) et tous considèrent que la vitesse maximale est atteinte entre 0 et -5 degrés. La principale différence entre ces modèles se situe au niveau de la vitesse de marche maximale et de la rapidité de sa diminution. Si l'on ne tient pas compte des variantes « hors sentier » c'est le modèle proposé par Irmischer et al. (2017) qui estime la vitesse

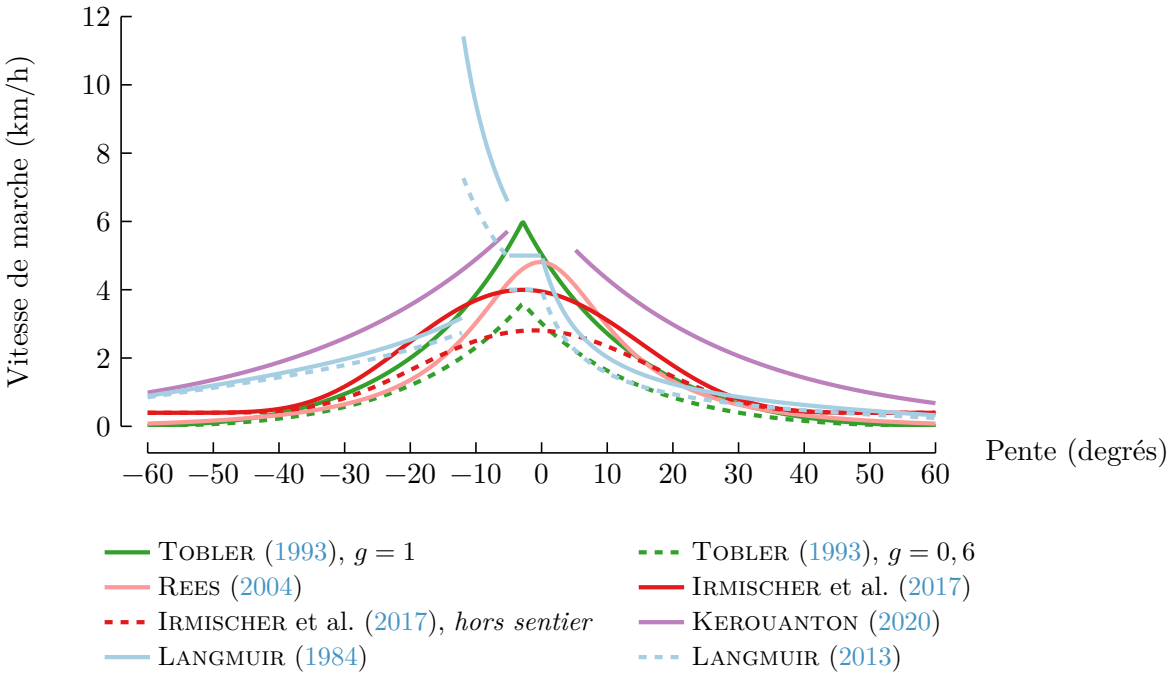


Figure 3.19 – Vitesse de marche estimée en fonction de la pente par les différents modèles de marche proposés dans la littérature.

maximale la plus faible et c'est le modèle de Langmuir-Naismith qui en fait l'estimation la plus forte, même si cette dernière estimation nous semble irréaliste. À l'inverse, c'est le modèle de Irmischer et al. (2017) qui décroit le plus lentement et le modèle de Tobler (1993) qui décroit le plus rapidement. Cette proximité de comportement nous permet de supposer que tous ces modèles pourraient être adaptés pour *spatialiser* des *distances-temps,* si l'estimation de la distance parcourue variera nécessairement en fonction du modèle choisi, toutes les estimations seront impactées de manière similaire par les variations de relief. Seul le modèle de Langmuir-Naismith à un comportement fondamentalement différent, qui, comme nous l'expliquions précédemment, nous semble irréaliste, nous n'emploierons donc pas ce modèle.

3.2.3.3 Les relations projectives

Contrairement aux relations topologiques et aux relations de distance déjà présentées, les relations projectives ne peuvent être interprétées qu'à l'aide d'un « espace projectif » (Duchêne et al. 2019). Nous avons choisi de présenter les relations directionelles et les relations orientationelles séparément, comme proposé par Duchêne et al. (2019).

Les relations directionnelles

Frank (1992) recense deux catégories de modèles permettant de modéliser les directions : les modèles à secteur (ou *cone-based*, Figure 3.20), dérivés du travail de Peuquet et al. (1987) et les modèles à demi-plans (Figure 3.21). Dans les modèles à secteur la direction est définie en fonction d'un cône d'angle donné. Dans les modèles à demi-plan, les directions sont définies

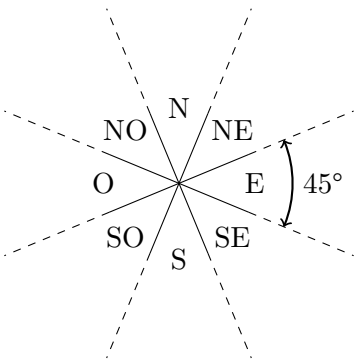


FIGURE 3.20 – Mosélisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle conique. D'après RENZ et al. (2004).

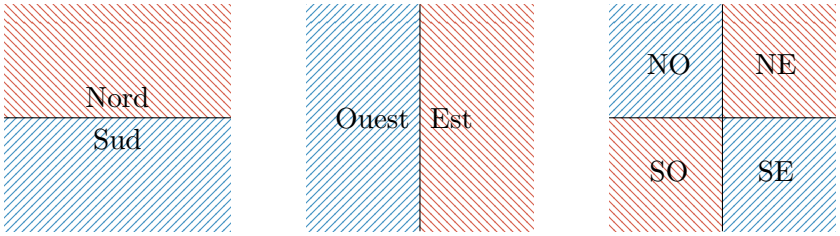


FIGURE 3.21 – Modélisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle par demi-plans. D'après FRANK (1992).

à l'aide de deux plans, séparant l'espace en deux directions, par exemple le nord et le sud. Ces plans peuvent ensuite être combinés pour raffiner les directions. Par exemple, la combinaison des demi-plans définissant le nord, le sud, l'est et l'ouest permet de créer quatre nouvelles directions cardinales, le nord-ouest, le nord-est, le sud-est et le sud-ouest.

FRANK (1992) propose une extension du modèle à demi-plans définissant une zone neutre, plus adaptée aux objets d'extension spatiale non-nulle (Figure 3.22).

Ces trois modèles ne permettent cependant que de définir des relations orientationnelles cardinales et non entre deux objets, contrairement à des modèles comme le modèle des cinq interactions de CLEMENTINI et al. (2006). Ce modèle se fonde sur un principe similaire au modèle des 9 intersections, déjà présenté. Il permet de modèliser 5 relations projectives entre un objet à localiser et deux autres objets servant de référence. À partir de ces deux objets, 5 zones sont définies, correspondant aux relations *avant, après, entre, à gauche* et *à droite.*

NO	N	NE
O	O_c	E
SO	S	SE

FIGURE 3.22 – Modèlisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle par demi-plans avec une zone neutre, d'après FRANK (1992)

En étudiant l'intersection de ces objets avec ces cinq zones on peut construire 34 relations différentes. Comme dans les modèles dérivés du modèle 4IM, ces relations sont formalisées à l'aide d'une matrice, où chacune des 5 valeurs correspond à une des 5 zones définies par le modèle.

Enfin, comme pour les modèles topologiques, des extensions tridimensionnelles de ces modèles ont été proposées.

Les relations d'orientation relative

Les relations d'orientation relatives sont définies par Duchêne et al. (2019) comme des relations « concern[ant] l'écart angulaire entre deux objets ayant une direction privilégiée d'allongement et pouvant à ce titre être assimilés à des segments […] ». Comme nous l'expliquions précédemment, la phrase : « J'ai pris la première à droite » correspond à une *relation d'orientation relative.* Des modèles spécifiques à ce type de relations ont été proposés dans la littérature, comme les *calculi* de Isli et al. (2000) et Schlieder (1995).

3.2.3.4 Les relations de visibilité

Comme pour les « durées de déplacement », détaillées ci-dessus, les « relations de visibilité » ne s'expriment pas à l'aide d'une préposition spatiale, comme « sur » ou « dans », il s'agit donc d'une *relation de localisation,* mais pas d'une *relation spatiale.* Contrairement aux distances, où leur expression peu prendre plusieurs formes, les *relations de localisation visuelles* sont toujours exprimées d'une même manière. On décrit ce qu'on a (ou pas) dans notre champ de vision. Ainsi la spatialisation de ce type *d'indice de localisation* nécessite de pouvoir construire le champ de visibilité d'un objet, quelle que soit sa nature.

La question de la construction de zones de visibilités a été longuement abordée dans le domaine des SIG, notamment en vue d'applications pour l'étude de paysages. Mais la notion de visibilité peut également s'appliquer à des éléments de localisation tels que : « Je suis à l'ombre », que l'on retrouve notamment dans le *fil rouge* (1). En effet, être, ou non, à l'ombre revient à avoir, ou non, une relation de visibilité avec le Soleil. Or, dans un contexte montagnard les ombres sont très présentes à cause des reliefs, la possibilité d'identifier les zones situés au Soleil ou à l'ombre est donc utile pour localiser des personnes (Houpert 2003). Sahraoui et al. (2016) distinguent deux types d'analyses de visibilités différentes, les analyses planimétriques « consist[ant] à caractériser les relations d'intervisibilité entre des lieux d'observation et leur espace environnant […] » et les analyses tangentielles qui « […] mesur[ent] le paysage visible dans la rétine d'un observateur virtuel en tenant compte du développement vertical des objets du paysage […] ».

Approche planaire

La spatialisation d'une *relation de visibilité* nécessite de construire une zone où l'objet de référence est visible. Cette zone, généralement qualifiée de *bassin de visibilité,* est construite à partir d'un MNT décrivant le relief. Les algorithmes de construction des bassins de visibilité vérifient ensuite, pour toutes les positions de la zone étudiée, si l'objet de référence est visible, ou non. Par conséquent les *bassins de visibilité* sont généralement binaires, on distingue les positions d'où l'on voit, de celle où on ne voit pas.

D'autres travaux proposent de traiter les relations de visibilité de manière multivalente, *i.e.* en distinguant les situations où la visibilité est partielle de celles où la visibilité est totale.

Ramos (2003) définit la notion de *fenêtre de visibilité,* qui est la géométrie 3D englobant toutes les lignes reliant la géométrie observée à la géométrie de l'observateur. Cette modélisation vectorielle permet de construire l'intersection de la fenêtre de visibilité avec le relief et le sursol. Ramos (2003) définit 3 types de visibilité en fonction de l'intersection de la *fenêtre de visibilité.* Si elle est entièrement visible la visibilité est totale, si elle est totalement obstruée alors l'objet est invisible et si elle est partielle obstruée la visibilité est partielle.

Lonergan et al. (2014) ont, quant à eux, proposé de prendre en compte les capacités perspectives des observateurs. En effet, dans les approches précédemment présentées, l'observateur est modélisé par une géométrie, sans que ces caractéristiques perspectives, comme son champ de vision, soient prises en compte. Lonergan et al. (2014) définissent le concept de *fenêtre de visibilité* comme un sous-ensemble du *bassin de visibilité,* duquel on aurait retiré toutes les zones invisibles, compte-tenu des capacités perspectives de l'observateur. Un être humain, par exemple, ne peut voir que dans une direction donnée, et pas à 360 degrés autour de lui. La prise en compte des capacités perspectives permet à Lonergan et al. (2014) de définir une typologie des relations de visibilité, distinguant, par exemple, les moments où l'observateur se focalise sur un point (ce qui tend à réduire son champ de vision) de ceux où il scanne le paysage (et où l'observateur regarde dans toutes les directions autour de lui).

Approche tangentielle

D'autres travaux proposent quant à eux d'étudier les positions relatives des objets dans le champ de vision de l'observateur. Santos et al. (2015) proposent une typologie des relations de visibilité fondée sur les relations de Allen. Cette typologie permet de décrire les relations entre deux objets, du point de vue d'un observateur qui aurait un champ de vision de 180 degrés. Randell et al. (2001) proposent une solution similaire avec le ROC-20 (*Region Occlusion Calculus*), une formalisation des relations topologiques entre les silhouettes des objets vus par l'utilisateur. Ce modèle permet également de modéliser des positions relatives entre objets vus (*e.g.* du point de vue de l'utilisateur l'objet a est à gauche de b), mais également des relations d'occlusion relative (*e.g.* a cache un bout de b et inversement).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état de l'art sur les deux objectifs scientifiques principaux de cette thèse, la question de la spatialisation des relations de localisation et la modélisation de l'imprécision spatiale. Ces deux travaux nous ont permis de mettre en évidence le fait que de nombreuses solutions aux problèmes que nous rencontrons avaient été proposées. Le choix d'une de ces solutions, que ce soit pour la *spatialisation* d'un type de *relation de localisation* ou pour la modélisation de *l'imprécision spatiale* devra donc être fait, compte tenu des spécificités de notre contexte applicatif. Ces choix seront détaillés dans la seconde partie de ce document.

Conclusion de la première partie

Comme nous l'avons montré dans cette partie, le secours en montagne est un service public essentiel pour le tourisme montagnard. Son développement et sa professionnalisation ont permis de réduire considérablement la mortalité des sports de montagne et ce malgré l'explosion du tourisme montagnard au cours des dernières décennies. Les opérations de secours en montagne restent, toutefois, des opérations critiques, mobilisant un personnel, certes très qualifié et bien équipé, mais non ubiquiste. Les USEM peuvent donc, notamment en période touristique, être amenées à effectuer de nombreux secours d'affilée. Ainsi, une opération particulièrement longue peut impacter les secours sur toute la zone d'intervention des USEM. Par conséquent, la phase de localisation de la victime, *i.e.* la première partie des opérations de secours, est une étape critique. En effet, si dans la majorité des cas les secouristes n'éprouvent que peu de difficultés à localiser les victimes et encore moins depuis la généralisation des outils de géolocalisation (*e.g. GendLoc*), il reste des situations où les victimes sont difficiles à localiser, ce qui conduit à une perte de temps, dont les conséquences peuvent s'avérer dramatiques (chapitre 1).

Le projet de recherche Choucas, issu d'une collaboration scientifique avec le PGHM de Grenoble, souhaite élaborer des solutions d'aide à la localisation de victimes. Comme indiqué dans le chapitre 1, les solutions développées au sein de ce projet n'ont pas pour but d'automatiser la localisation (et donc se substituer aux secouristes) mais d'apporter des solutions d'aide à la décision, facilitant la définition et la vérification des hypothèses de localisation formulées par les secouristes. Pour ce faire, quatre axes de travail ont été identifiés (Tableau 1.3). Le premier d'entre eux consiste à enrichir les données dont disposent les secouristes en exploitant le corpus des récits de randonnées mis en ligne par les alpinistes. Ces nouvelles données complèteront les nombreuses données dont disposent déjà les secouristes, mais ces dernières peuvent être numériques (*e.g.* bases de données géographiques) ou analogiques (*e.g.* plans de pistes de ski, *topoguides,* etc.) Pour faciliter leur traitement un second objectif du projet Choucas est de travailler à leur intégration et ainsi permettre aux secouristes de travailler efficacement avec ces données hétérogènes. Le troisième objectif de ce projet, auquel notre thèse se rattache, consiste à développer des modèles de raisonnement, permettant d'identifier la position correspondant à une description de position, offrant ainsi aux secouristes la possibilité de tester plus facilement et rapidement leurs hypothèses de localisation. Enfin, le quatrième et dernier objectif consiste à travailler sur l'interaction des secouristes avec les autres résultats du projet, d'une part en travaillant sur la géovisualisation des résultats produits par le troisième objectif, mais également en développant une interface permettant aux secouristes de formaliser leurs hypothèses et, plus généralement, de traiter l'alerte.

Dans le second chapitre (2), nous avons détaillé les objectifs de notre thèse et expliqué pour quelles raisons la transformation d'une position décrite en une zone de coordonnées devait se faire deux étapes. Une première, dite de *spatialisation,* où les différents *indices de localisation* qui composent une alerte sont transformés en des *zones de localisation compatibles* et une seconde étape de *fusion* où les différentes *zones de localisation compatibles* d'une même alerte sont combinées pour former la *zone de localisation probable* de l'alerte, *i.e.* la zone où tous les *indices de localisation* sont vérifiés.

Nous avons identifié plusieurs verrous scientifiques à la réalisation de ces deux objectifs. Le premier d'entre eux est la définition d'une méthode de *spatialisation* qui soit adaptée aux différents *indices de localisation, i.e.* qui soit capable de construire une *zone de localisation compatible* pour des *indices de localisation* aussi variés que : « Je suis sur une route » ou « je vois une forêt ». Un autre problème est que la sémantique des *indices de localisation* peut être difficile à identifier. En effet, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2 et dans la première partie du chapitre 3, ces derniers peuvent être fortement *imprécis. L'imprécision* des *indices de localisation* implique de développer une méthode de spatialisation qui soit capable de la prendre en compte dans le but d'améliorer la qualité des *zones de localisation compatibles,* c'est l'objet du second verrou scientifique de cette thèse. Un troisième point essentiel à considérer est la notion *d'incertitude*, également abordée dans les chapitres 2 et 3. En effet, les secouristes doivent pouvoir énoncer un doute sur la véracité des *indices de localisation* qui leur sont transmis. La principale difficulté posée par la prise en compte de *l'incertitude* est que la méthode développée devra cohabiter avec la méthode de prise en compte de *l'imprécision* et, plus généralement, avec les méthodes de *spatialisation.* De plus, nous devons développer une méthode de *fusion* des *zones de localisation compatibles.* Cette dernière doit pouvoir cohabiter avec les méthodes développées pour prendre en compte *l'imprécision* et *l'incertitude.* Enfin, nous souhaitons proposer une méthode permettant d'évaluer les *zones de localisation probables* construites. L'étude de la littérature, présentée dans le chapitre 3, nous a permis de présenter les solutions déjà proposées pour résoudre ces verrous, notamment sur les questions de modélisation de *l'imprécision* et de *l'incertitude* et de *spatialisation* des *indices de localisation.* La prochaine partie de ce travail sera consacrée à la définition de la méthode de notre thèse et à la mise en œuvre des concepts présentés jusqu'ici.

Deuxième partie

Définition d'une méthode de construction d'une *zone de localisation probable* à partir d'une description de position

Introduction de la deuxième partie

> « l'espace géographique ne se découpe pas plus arbitrairement qu'un poulet à table »
>
> — Roger Brunet

La seconde partie de cette thèse de doctorat se destine à présenter et à expliciter la méthode que nous avons définie pour passer d'une description de position en une position exprimée dans un référentiel direct. Pour ce faire, nous commencerons par présenter les choix généraux qui nous ont guidés dans l'élaboration de notre méthode, avant d'en décrire l'organisation globale. Puis, nous détaillerons chaque aspect de la méthode. Dans le premier chapitre de cette partie, nous présenterons nos choix de modélisation et l'organisation globale de notre méthode (chapitre 4). Le chapitre 5 est, quant à lui, dédié à la présentation de la première phase de la méthode, la *décomposition.* Le chapitre 6 présente la manière dont nous représentons des objet géographiques *imprécis.* Le chapitre 7 détaille la seconde phase de notre méthode, la *spatialisation.* Enfin, dans le chapitre 8, nous présenterons la phase de *fusion,* dernière étape de notre méthode de transformation d'une description de position en une position exprimée dans un référentiel direct.

Chapitre 4

Aspects généraux de la méthode de construction de la *zone de localisation probable*

Introduction . . . 107
4.1 Identification des caractéristiques principales de la méthode . . . 108
4.1.1 Intégration dans le contexte métier . . . 108
4.1.1.1 Prérequis nécessaires à la méthode de construction d'une zone de localisation probable . . . 108
4.1.1.2 La modélisation explicite des connaissances . . . 109
4.1.2 Principes de modélisation . . . 110
4.1.2.1 Décomposition des *relations de localisation* . . . 110
4.1.2.2 Autonomie de la *spatialisation* . . . 112
4.1.2.3 Le raisonnement logique en monde ouvert . . . 115
4.2 Formalisation des *indices des localisation* . . . 116
4.3 Définition de la méthode . . . 117
4.3.1 La phase de *décomposition* . . . 118
4.3.1.1 La décomposition de *l'ensemble des indices de localisation* . . . 118
4.3.1.2 La *décomposition* des *objets de référence indéfinis* . . . 118
4.3.1.3 La *décomposition* des *relations de localisation* . . . 119
4.3.1.4 Illustration de la phase de décomposition . . . 119
4.3.2 La phase de *spatialisation* . . . 121
4.3.3 La phase de fusion . . . 122
4.3.3.1 La *fusion* des *relations de localisation atomiques* . . . 122
4.3.3.2 La *fusion* des *objets de référence indéfinis* . . . 123
4.3.3.3 La *fusion* des *indices de localisation* . . . 123
4.3.3.4 Illustration de la *phase de fusion* . . . 124
Conclusion . . . 128

Introduction

Ce chapitre se destine à présenter la structure générale de notre méthode, conçue pour transformer une *description de position* en une zone de *localisation probable*. La seconde partie

de ce manuscrit étant construite suivant une logique de complexification graduelle, nous ne présenterons ici que les grands aspects de cette méthode, qui sera complétée au fur et à mesure de cette partie.

Pour construire notre méthode, nous avons adopté une démarche par contraintes. La première partie de ce chapitre détaille quatre grands principes, qui nous semblent nécessaires au développement d'une méthode robuste, intelligible et adaptée à une utilisation professionnelle. Ces quatre principes, couplés aux objectifs scientifiques de la thèse (chapitre 2), forment une ossature conceptuelle, permettant de guider la définition de notre méthode.

La première partie de ce chapitre est dédiée à la présentation de ces principes de modélisation. Une seconde partie sera destinée à la formalisation du concept *d'indice de localisation* au centre de notre méthode. Enfin, la troisième partie de ce chapitre est destinée à la définition de cette dernière.

4.1 Identification des caractéristiques principales de la méthode

4.1.1 Intégration dans le contexte métier

Le premier des principes que nous voulons voir respecter par notre méthode est celui de sa bonne intégration dans le contexte métier. C'est un point que nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises. Nous souhaitons que notre méthode soit conçue dans l'optique de son application en situation réelle, c'est-à-dire que nous avons à cœur de réfléchir à son appropriation et son utilisation par les secouristes. Pour autant, nous ne souhaitons pas sacrifier sa généricité, c'est pourquoi son développement relève d'un équilibre entre la généricité de la méthode et la spécificité de certains paramétrages.

4.1.1.1 Prérequis nécessaires à la méthode de construction d'une zone de localisation probable

Comme nous l'avons indiqué dans la première partie, un des partis pris fondamentaux du projet Choucas est d'intégrer pleinement les secouristes au processus de localisation de la victime, ce qui impose le développement de solutions d'aide à la décision et non d'automatisation de la localisation. Si ce choix n'appose pas de contraintes spécifiques sur nos travaux, il nous offre des possibilités inédites. En effet, ce parti-pris impose la présence constante d'un secouriste, en contact avec le requérant et interagissant avec notre méthode de localisation par le biais de l'interface développée au sein du projet Choucas (1.2.3.3). Par conséquent, nous pouvons développer une méthode nécessitant la participation active d'un secouriste lors de son application.

Nous avons donc décidé de compter sur les secouristes pour construire les *indices de localisation* à partir des informations données par le requérant. Cette opération consiste à identifier les différents éléments constituant *l'indice de localisation* (*sujet, objet de référence, relation de localisation*) dans le discours du requérant, puis à les renseigner dans l'interface. Ce travail ne se résume cependant pas à une opération de saisie mais impose également un travail d'analyse et de désambiguïsation du discours du requérant. Pour l'illustrer, prenons l'exemple de la phrase : « Je suis à deux pas d'une maison ». La première tâche que nous confions au secouriste est celle de l'identification des éléments de la phrase, « je » est le *sujet,* « à deux pas » est une *relation de localisation* et « une maison » est *l'objet de référence,* mais cette segmentation ne suffit pas à *spatialiser* cet *indice de localisation.* Pour ce faire, il est nécessaire d'interpréter

ces trois chaînes de caractères pour identifier l'objet ou le concept auquel elles se réfèrent. Dans le cas d'une automatisation intégrale, il serait nécessaire de définir une méthode à cet effet, mais nous pouvons déléguer cette tâche au secouriste. En effet, la *relation de localisation* « à deux pas » peut, par exemple, être considérée comme une *relation de distance (métrique) quantitative* (cf. 3.2.3.2). Pourtant, on peut supposer que la notion centrale de cet exemple est la notion de *proximité* et non une quantification de distance. L'automatisation de ce travail de désambiguïsation est extrêmement difficile et est un champ de recherche spécifique, c'est pourquoi nous le déléguons au secouriste. Dans les faits, cela implique que c'est à ce dernier de choisir la *relation spatiale,* à partir d'une liste prédéfinie, en fonction du contexte et de sa compréhension de *l'indice de localisation.* Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, c'est au secouriste de choisir si la *relation de localisation* « à deux pas » doit être modélisée comme une relation de *proximité* où une *distance métrique quantitative.*

De manière analogue, il revient au secouriste d'analyser l'objet de référence. Dans notre exemple, *l'objet de référence* (« une maison ») désigne un type d'objet auquel plusieurs objets (*i.e.* les *instances*) peuvent correspondre. Ce travail d'identification des objets géographiques utilisés comme référence par le requérant peut également être délégué au secouriste, par le biais de l'interface. Pour notre exemple, le secouriste devra sélectionner tous les objets correspondant à la description donnée par le secouriste. Cette approche pose néanmoins un problème, celui de l'aire de la sélection. En effet, sans information supplémentaire tout objet géographique correspondant à la sélection peut être considéré comme un objet de référence valide. Il est donc nécessaire de définir une *zone de travail* délimitant l'aire de recherche de la victime, et par conséquent, l'aire de sélection des *objets de référence.* Dans l'ontologie d'alerte CHOUCAS (OAC, Viry et al. 2019a), cette région est qualifiée de *zone initiale de recherche* (ZIR). La définition d'une telle zone est un préalable indispensable à la *spatialisation* des *indices de localisation.*

Ainsi, notre méthode impose trois tâches au secouriste. La première, effectuée au début de la phase de localisation, consiste à définir la ZIR. La seconde consiste à identifier, à partir d'une liste préalablement définie, *la relation de localisation* correspondant au mieux à *l'indice de localisation.* La troisième consiste à sélectionner les *objets de référence* utilisés par le requérant. Ainsi, en entrée de notre méthode, nous disposons, pour chaque *indice de localisation,* d'une *relation de localisation* exprimée dans un vocabulaire contrôlé et d'un ensemble d'objets géographiques servant de référence.

4.1.1.2 La modélisation explicite des connaissances

Lorsque nous avons défini les premiers éléments de notre méthode de spatialisation dans le chapitre 2, nous avons définis deux phases : la *spatialisation* et la *fusion.* Toutes deux diffèrent par un point essentiel : la fusion consiste à regrouper différentes *zones de localisation compatibles* dans le but de construire une seule *zone de localisation probable*[1]. Par conséquent, tous les individus fusionnés sont du même type, des *zones de localisation compatibles.* Une même méthode peut donc être employée dans toutes les configurations, qu'il soit nécessaire de fusionner deux *zones de localisation* identiques ou trente *zones* extrêmement différentes. Cette généricité n'est cependant pas partagée par la méthode de *spatialisation,* qui doit avoir un comportement adapté à chaque *relation de localisation.* En effet, on ne peut spatialiser la *relation* « sous » de la même manière que les *relations* « entre » ou « proche ». Il est donc nécessaire de

1. Bien qu'elle puisse être discontinue.

définir (et d'implémenter) une méthode de *spatialisation* pour chaque *relation de localisation* traitée. Ces différentes méthodes de *spatialisation* sont d'une grande importance. D'une part, car elles constituent le cœur de notre travail de conception de notre solution, c'est par elles qu'une description de position devient une *zone de localisation compatible,* d'autre part, car le fonctionnement de ces méthodes devient *de facto* un cadre formel, fixant — par le biais de leur *spatialisation* — la sémantique que nous attribuons à chaque *relation de localisation.* Pour le dire autrement, la meilleure façon de comprendre comment est traitée une *relation de localisation* donnée est de consulter le code qui se destine à la *spatialiser.* Ce faisant, l'ensemble des connaissances produites lors de l'élaboration des méthodes de *spatialisation* serait principalement sous forme procédurale (*i.e.* un algorithme *ad hoc* pour chaque méthode, implémenté par un code spécifique), ce qui est une limite forte à la compréhension et l'utilisation appliquée de notre travail, en plus de s'opposer au principe *d'intégration dans le contexte métier.*

Nous avons donc cherché à séparer autant que possible la formalisation de la sémantique des *relations de localisation* de leur implémentation, en adoptant une démarche de modélisation explicite des connaissances, librement inspirée des *systèmes à base de connaissances* (Le Ber et al. 2006). Dans ces systèmes, les connaissances sont formalisées sous forme déclarative au sein d'une ontologie lue et interprétée par un logiciel, dont le comportement est défini une fois pour toutes mais est guidé par ces connaissances. On peut donc imaginer que les règles de *spatialisation* de toutes les *relations de localisations* soient formalisées dans une ontologie *ad hoc* et interprétées et appliquées par un logiciel spécifique, dédié au traitement des connaissances contenues dans cette ontologie. Cette approche a de multiples avantages. D'une part, elle permet aux utilisateurs des méthodes de *spatialisation* de disposer d'une forme d'auto-documentation, permise par la centralisation de toutes les règles de *spatialisation.* De plus, cette centralisation facilite également la modification ou l'ajout de règles de *spatialisation,* faisant de l'ontologie un outil facilitant l'amélioration des méthodes de *spatialisation.* Enfin, le cadre formel et la centralisation offerts par l'utilisation d'une ontologie facilitent la diffusion de notre travail, un tel document pouvant être plus facilement étudié, voire réutilisé, qu'un code informatique, même diffusé librement.

4.1.2 Principes de modélisation

4.1.2.1 Décomposition des *relations de localisation*

Comme nous l'avons déjà indiqué (2.2.1), une même *relation de localisation* peut avoir une sémantique différente en fonction de son contexte d'utilisation (Borillo 1998, p. 16). Par exemple, la *relation de localisation* « *sous* » n'a pas exactement la même signification dans les phrases : « Je suis sous *un pont* » et « Je suis sous *une route* ». La première phrase sous-entend une idée de *recouvrement* (*i.e. le pont* est entre le locuteur et le ciel), que l'on retrouve également dans l'expression imagée « Je suis sous l'eau », mais cette notion est absente dans la seconde phrase, qui décrit une configuration où le recouvrement est impossible [2]. Il est intéressant de noter l'intuitivité [3] de cette distinction. De fait, on comprend immédiatement que la phrase « Je suis sous *un pont* » décrit une configuration plus précise qu'une simple différence d'altitude et, à l'inverse, on ne peut imaginer que la phrase : « Je suis sous *une route* » décrive une situation où le locuteur est littéralement recouvert par la voirie. Cette interprétation différente de deux phrases très similaires ne s'explique que par leur point divergent, leur *objet de référence* et

2. Du moins en contexte montagneux.
3. Dans la mesure où l'on est un locuteur humain.

plus particulièrement, leur nature. On peut, en effet, être recouvert par *un pont* (ou un arbre, une table, le ciel, *etc.*) mais pas par une route (ou un glacier). *L'objet de référence* et plus généralement le contexte d'utilisation d'une *relation de localisation,* peut donc influer sur sa signification. Dès lors, on ne peut prétendre spatialiser des *relations de localisation* sans être capable d'identifier ces variations de sémantique, leurs causes et leurs conséquences.

Pour aborder ce problème, nous postulons que la différence sémantique de ces deux exemples s'explique en réalité par l'emploi de deux *relations de localisations* différentes, mais désignées par la même *préposition spatiale :* « sous ». Adopter cette vision implique donc de considérer que le « sous » *avec recouvrement* est une *relation de localisation* différente du « sous » *sans recouvrement* et ce bien qu'elles soient exprimées avec la même *préposition spatiale.* Nous adoptons ce postulat en le généralisant à l'ensemble du vocabulaire. De la même manière, on pourrait considérer que les différentes définitions d'un même mot, que l'on peut trouver dans un dictionnaire, définissent des concepts différents, mais exprimés avec le même mot. Cette conception a beau présenter un certain intérêt intellectuel, nous pensons qu'elle ne suffit pas à apporter une solution. D'une part, elle ne dispense pas du travail d'identification des variantes des *relations de localisation,* mais quelle approche le pourrait ? D'autre part, elle ignore un élément important que nous n'avons pas encore mentionné : les *récurrences sémantiques.* Si les « sous » avec et sans recouvrement s'opposent, ils partagent une part importante de leur sémantique, ce qui leur vaut d'être désignés avec la même préposition. Ces deux *relations spatiales* traduisent toutes deux une situation où le *sujet* a une altitude inférieure à *l'objet de référence* et où ces deux éléments ne sont pas très éloignés. La notion de recouvrement ne fait que s'ajouter à ces deux notions. Aussi, ces deux « sous » ont plus de points communs que de points de divergence. On observe donc la présence de *récurrences sémantiques* entre ces deux *relations.* Nous proposons de tirer parti de ces récurrences pour améliorer notre précédent postulat. Ainsi, nous considérons que les deux variantes du « sous » sont des *relations de localisation* différentes car elles combinent des « briques sémantiques » différentes, tout en en partageant la plupart. L'intérêt majeur de ce point de vue est qu'il laisse entrevoir la possibilité d'exploiter ces récurrences sémantiques pour la *spatialisation* (Bunel et al. 2019b). Pour ce faire, nous proposons « d'extraire », lors d'un processus que nous appelons *décomposition,* ces « briques sémantiques » des *relations de localisation,* pour définir un ensemble de *relations de localisation* que nous appelons *atomiques,* qui, combinées, recréent la sémantique de la *relation de localisation* décomposée. La mise en place de cette approche nécessite l'identification et l'explicitation préalables des *relations de localisation atomiques,* conformément au *principe de modélisation explicite des connaissances,* chaque relation de *localisation atomique* correspondant alors à une composante sémantique indépendante.

Pour illustrer cette démarche, on peut l'appliquer à *l'indice de localisation* : « Je suis sous une route ». Comme nous l'avons mentionné, la *relation de localisation* utilisée décrit ici une situation où le locuteur est situé à une altitude inférieure d'une route donnée, mais également à proximité de cette dernière, de sorte que la relation de verticalité entre le locuteur et la route soit saillante (Vandeloise 1986). La relation de localisation « sous » peut ici être décomposée en deux *relations de localisation atomiques,* la première indiquant que le *sujet* est situé plus bas que *l'objet de référence* et la seconde indiquant qu'il en est proche.

La *décomposition* d'une *relation de localisation* peut être envisagée comme une opération permettant de construire de nouveaux *indices de localisation* à partir d'un *indice* initial utilisant une *relation de localisation* non atomique. Les *indices de localisation* dérivés ne diffèrent que par leur *relation de localisation* (*i.e.* qu'ils partagent *leur sujet, leur relation de localisation* et leur *objet de référence*). En créant de nouveaux *indices de localisation,* la *décomposition* permet

de les *spatialiser* indépendamment. On peut alors *spatialiser l'indice de localisation* initial en combinant les *zones de localisation compatibles* résultant de la *spatialisations* des *relations de localisations atomiques.* Ainsi, pour *spatialiser* l'*indice de localisation* « je *suis sous* une route », nous construisons la *zone de localisation* correspondant à *l'indice de localisation* « je suis *proche* d'une route » et la *zone de localisation* correspondant à *l'indice de localisation* « je suis *à une altitude inférieure* à une route, » puis nous les combinons à l'aide d'un opérateur *ad hoc,* permettant d'obtenir la *zone de localisation compatible* correspondant à *l'indice de localisation* « je suis *sous* une route ».

Cette approche, fondée sur la *décomposition,* n'est pas limitée aux *relations de localisation* dérivées d'une notion plus large (*e.g.* le « sous » avec recouvrement qui dérive du « sous » au sens large). D'autres *récurrences sémantiques* peuvent apparaître dans des *relations de localisation* très différentes. La notion de *proximité,* déjà utilisée, est, par exemple, à la base de nombreuses autres *relations de localisation* comme « *à côté* », « *aux alentours de* », « *devant* », *etc.* En définissant une méthode de *spatialisation* de cette *relation de localisation atomique,* il devient possible de la réutiliser et de la combiner à d'autres *relations de localisation atomiques* permettant ainsi de modéliser un grand ensemble de *relations de localisations.*

Les différents exemples présentés ici ne doivent cependant pas faire croire que les *relations de localisation* sont systématiquement décomposables. La notion de proximité, par exemple, peut être utilisée lors de décompositions, mais elle est également pertinente en elle-même, comme dans *l'indice de localisation* : « Je suis proche d'une route ». Certaines des *relations de localisation* manipulées par les requérants peuvent donc s'avérer être *atomiques.* Cette observation ne remet pas en cause cette approche, mais elle montre que la *décomposition* n'est pas une étape systématique.

4.1.2.2 Autonomie de la *spatialisation*

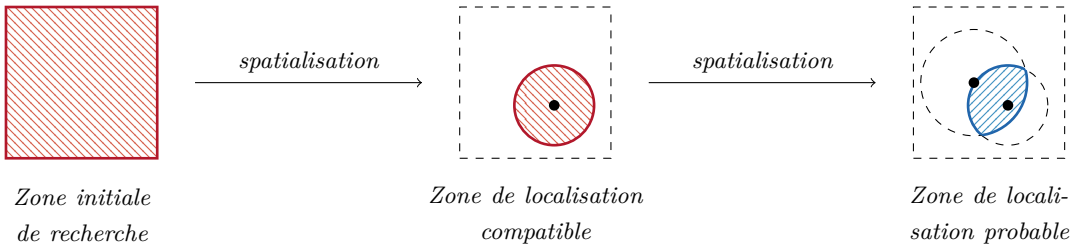
Dans le chapitre 2, nous avons indiqué que la création d'une *zone de localisation probable* à partir d'un ensemble *d'indices de localisation* nécessitait deux étapes successives : (a) la *spatialisation* des *indices de localisation* et (b) la *fusion* des *zones de localisation compatibles* en résultant. Bien que ces deux étapes soient indispensables, elles peuvent être combinées de différentes manières. Une première solution, illustrée par la figure 4.1a, consiste à « chaîner » les *spatialisations,* de manière à ce que la *zone de localisation compatible* résultant de la *spatialisation* d'un *indice* soit la *zone initiale de recherche* du *second indice de localisation.* Cette approche pourrait être qualifiée de soustractive, dans la mesure où les positions n'appartenant par à la *zone de localisation probable* sont retirées au fur et à mesure des *spatialisations,* jusqu'à l'obtention de la ZLP. Les différentes *zones de localisation compatibles* sont donc créées les unes à la suite des autres, ce qui a pour effet de lier implicitement les résultats des différentes *spatialisations.* Avec cette approche, l'opération de *fusion* est implicite : elle s'opère en partie à chaque nouvelle *spatialisation,* puisque les zones ne correspondant pas aux *indices de localisation* sont retirées peu à peu. La *zone de localisation probable* (en bleu sur la figure 4.1) est obtenue une fois que l'on a *spatialisé* tous les *indices de localisation.* Cette approche a l'avantage d'être simple à concevoir et à développer, mais elle a un défaut majeur : la propagation des erreurs. À cause de l'enchaînement des étapes de *spatialisation,* les potentielles erreurs de *spatialisation* peuvent modifier le résultat des *spatialisations* ultérieures. Imaginons par exemple que l'on souhaite construire la ZLP correspondant à *l'indice de localisation* : « Je suis dans une forêt, près du refuge. » Si l'on décide de commencer par *spatialiser l'indice de localisation* : « Je suis dans une forêt, » on obtiendra une *zone de localisation compatible* (qui

correspond à la seconde étape de la figure 4.1a) réduisant l'aire de recherche. La *spatialisation* du second *indice de localisation* consistera donc à chercher les positions qui correspondent à *l'indice de localisation* « Je suis proche du refuge » dans cette zone réduite (*i.e.* la troisième étape du la figure 4.1a). Le problème de la répercussion des erreurs se pose si le résultat de la première *spatialisation* est faux, (*e.g.* une des forêts pouvant faire office *d'objet de référence* n'est pas prise en compte). Deux cas de figure sont alors possibles : soit la *zone de localisation* résultant de la *spatialisation* est trop étendue [4], soit elle est trop réduite [5, 6]. Dans le premier cas, la *spatialisation* du second *indice de localisation* sera effectuée dans une zone plus étendue que nécessaire, ce qui peut avoir pour effet de produire une *zone de localisation probable* contenant des positions erronées. Le second cas est plus problématique, puisque la *spatialisation* du second *indice de localisation* est effectuée à partir d'une zone trop réduite. De fait, des positions devant appartenir à la *zone de localisation probable* pourront donc être ignorées, dont la position de la victime [7]. Ainsi, si un des *indices de localisation* est mal *spatialisé*, que ce soit à cause de la méthode de spatialisation utilisée ou d'une mauvaise description, cela se répercute sur toutes les *spatialisations* ultérieures et la moindre correction impose donc de refaire l'ensemble des traitements.

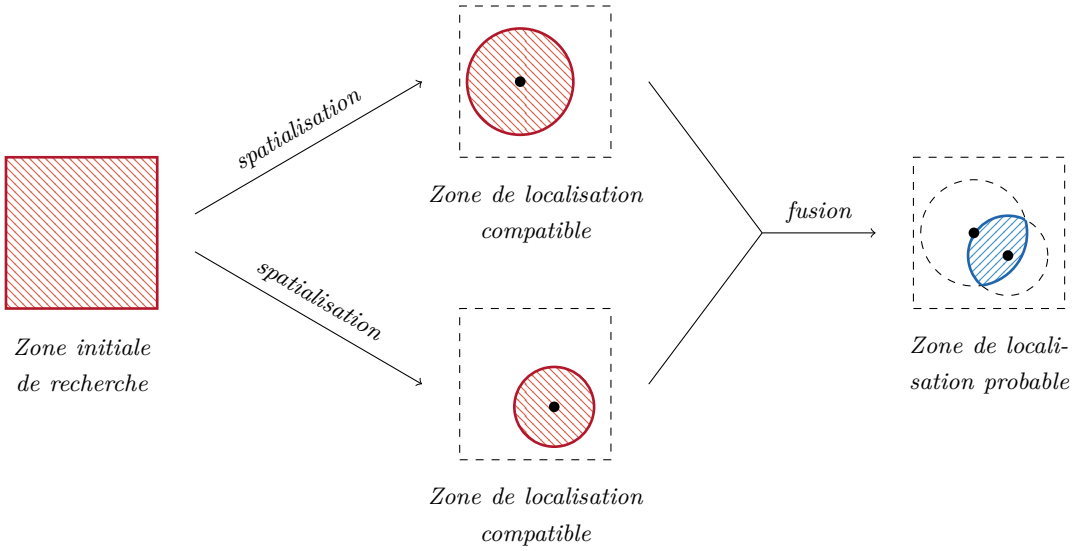
Une seconde solution, plus robuste, est cependant permise par une des caractéristiques des *indices de localisation :* leur indépendance. Il n'est, en effet, généralement pas nécessaire de connaître le résultat de la *spatialisation* d'un *indice de localisation* pour pouvoir *spatialiser* les autres *indices* d'une même alerte. Par exemple, la description précédemment utilisée : « Je suis dans une forêt, près du refuge », contient deux *indices de localisation,* qui, regroupés participent à décrire une même position. Mais ces deux *indices* conservent leur sens s'ils sont énoncés séparément. Dire, « Je suis dans une forêt » ou « je suis près du refuge » est une description valide et *l'indice de localisation* initial est simplement la conjonction, sans ordre particulier, de ces deux informations. Cette indépendance des *indices* permet de mettre en place une *spatialisation* autonome, comme le montre la figure 4.1b. Avec cette approche, la *spatialisation* des différents *indices de localisation* est effectuée séparément et leur *fusion* est effectuée dans un second temps. Comme pour la démarche « chaînée » une *spatialisation* erronée peut impacter la *zone de localisation probable.* Toutefois, il est plus facile de corriger ces erreurs. En effet, si les différentes *zones de localisation compatibles* ont été conservées il est possible de faire une nouvelle *fusion* en retirant un ou plusieurs *indices de localisation,* alors qu'avec une approche « chainée » il est nécessaire de refaire toutes les opérations de *spatialisations* ultérieures à celle de *l'indice de localisation* que l'on souhaite modifier ou retirer, et ce même si les résultats intermédiaires ont été conservés.

Ce principe de *spatialisation* autonome n'est pas cantonné aux *indices de localisation.* Comme nous l'avons illustré précédemment, certaines *relations de localisation* peuvent être décomposées en des *relations de localisation atomiques.* Ce processus permet de construire des nouveaux *indices de localisation* à partir de *l'indice* initial. Ces nouveaux *indices* conservent la propriété d'indépendance, puisque les *relations de localisation atomiques* décrivent des concepts sémantiquement orthogonaux. Le principe de modélisation autonome peut donc être étendu aux *indices de localisation* décomposés, ce qui le rend d'autant plus pertinent. Nous choisissons donc d'utiliser cette seconde approche.

4. C'est-à-dire que certaines de positions retenues sont de faux positifs.
5. C'est-à-dire que certaines de positions retenues sont de faux négatifs.
6. Ce qui est, par exemple, le résultat de l'oubli d'un *objet de référence.*
7. Ces deux cas de figure correspondent à des erreurs, respectivement, de type II et I.



(a) Construction suivant une démarche chaînée



(b) Construction suivant une démarche autonome

FIGURE 4.1 – Comparaison du processus de construction de la *zone de localisation probable*, pour une alerte à deux *indices de localisation*.

4.1.2.3 Le raisonnement logique en monde ouvert

Le dernier des principes de modélisation que nous souhaitons fixer est celui du raisonnement en *monde ouvert*. Ce terme, issu du domaine de la logique formelle, désigne un cadre de raisonnement où l'on considère que l'ignorance ou l'indémontrabilité d'une règle logique n'implique pas sa fausseté, par opposition à l'hypothèse du *monde clos.* La Figure 4.2 tente d'illustrer ces deux hypothèses opposées. L'ensemble de toutes les assertions logiques est réparti entre deux ensembles, celui des assertions vraies et celui assertions fausses. Parmi toutes ces assertions, seules certaines d'entre elles nous sont connues [8] : elles forment un nouvel ensemble plus réduit, mais pouvant contenir des assertions vraies ou fausses, d'où l'intersection de ces ensembles sur les deux figures. La différence entre la figure 4.2a, représentant l'hypothèse du *monde clos* et la figure 4.2b, représentant l'hypothèse du *monde ouvert*, réside dans la manière dont sont représentées les assertions inconnues, c'est-à-dire en dehors de l'ensemble des règles connues. Dans le premier cas, elles ne peuvent être situées que dans l'ensemble des assertions fausses, car l'ensemble des assertions vraies est intégralement contenu dans l'ensemble des règles connues, alors que dans la figure représentant l'hypothèse du *monde ouvert,* les assertions n'appartenant pas à l'ensemble des assertions connues peuvent être dans l'ensemble des règles vraies ou des règles fausses. Ainsi, dans *l'hypothèse du monde clos* (figure 4.2a), toute règle inconnue est considérée comme fausse. Alors que dans *l'hypothèse du monde ouvert* (Figure 4.2b), les règles inconnues sont considérées comme telles, c'est-à-dire que l'on estime qu'elles peuvent être vraies, comme fausses et en conséquence, on ne tire aucune conclusion à partir de règles qui ne sont pas connues.

Pour illustrer la différence entre ces deux hypothèses on peut prendre l'exemple suivant. Imaginons que je décrive le contenu de ma bibliothèque de la manière suivante : « Dans ma bibliothèque on trouve les ouvrages *Méthodes de logique,* de Willard Quine et *Le projet* Cybersyn, d'Eden Medina. » Cette phrase peut être décomposée en deux assertions logiques, « ma bibliothèque contient l'ouvrage *Méthodes de logique* » et « ma bibliothèque contient l'ouvrage *Le projet* Cybersyn. » Avec *l'hypothèse du monde clos,* toute autre proposition logique est considérée comme fausse, comme l'illustre la figure 4.2a. Ainsi, à la question « Est-ce que tu as *L'espace en français,* de Claude Vandeloise ? » — ou tout autre livre — la réponse sera « non ». Cela revient à considérer que j'ai donné une description exhaustive du contenu de ma bibliothèque. Si l'on fait *l'hypothèse d'un monde ouvert,* on considère que les règles qui nous sont inconnues peuvent être vraies ou fausses (figure 4.2b). Ainsi, dans ce cadre, on ne peut que répondre « Je ne sais pas » à la question précédente. Dans *l'hypothèse d'un monde ouvert,* l'absence d'une règle n'implique pas sa fausseté.

Appliqué à notre cas d'étude, le choix d'une de ces deux hypothèses revient à se demander si la description d'une position donnée par les requérants est systématiquement exhaustive. Si la réponse est « oui » on peut alors faire *l'hypothèse d'un monde clos* et considérer que toute information qui n'est pas donnée par le requérant est fausse. Ainsi, s'il décrit sa position seulement en indiquant qu'il « est sur une route » on pourra en conclure qu'il n'est pas en forêt [9], puisque cette information ne nous a pas été donnée. Par conséquent, on pourra *spatialiser* cette alerte à l'aide de deux *indices de localisation :* l'un explicite (« je suis sur une route ») et l'autre inféré (« je ne suis pas en forêt »). Or, cet exemple illustre bien que cette approche n'est pas satisfaisante, des routes peuvent traverser des forêts, ou non et rien dans cette alerte ne permet de rejeter cette hypothèse, le raisonnement en monde ouvert est donc plus approprié.

8. Ou sont démontrables en un temps fini.
9. Si l'on considère qu'il n'existe pas de route en forêt dans la région étudiée.

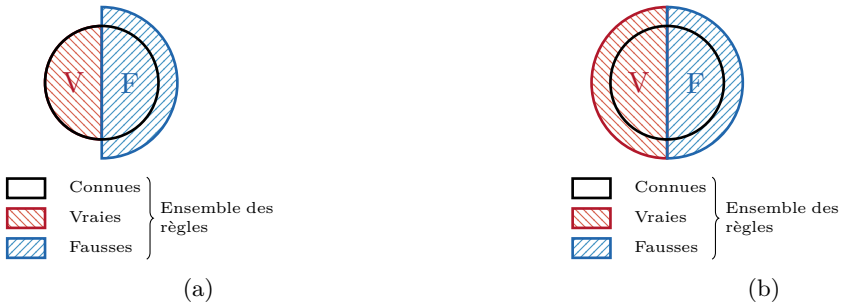


FIGURE 4.2 – Illustration des hypothèses du *monde clos* (a) et du *monde ouvert* (a)

4.2 Formalisation des *indices des localisation*

En vue de la définition de la méthode de transformation d'une description de position en une *zone de localisation probable* (section 4.3), nous allons formaliser le concept *d'indice de localisation.* Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 2, les *indices de localisation* sont l'élément de base des alertes. Chacun d'entre eux décrit une partie de l'information donnée par le requérant pour décrire sa position.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la description orale d'une position nécessite trois éléments distincts : un *sujet* qui est l'objet ou la personne dont la position est décrite, un *objet de référence* qui est l'objet géographique servant de point de référence et une *relation de localisation* décrivant la manière dont le *sujet* est localisé par rapport à *l'objet de référence.* Un *indice de localisation* (i) est donc formalisable en un triplet de la forme :

$$i = (S, Rl, Or) \tag{4.1}$$

Avec S le *sujet,* Rl la *relation de localisation* et Or *l'objet de référence.* Cette définition est cependant assez restrictive, puisqu'elle ne permet pas d'exprimer certaines configurations plus complexes, notamment celles induites par le *principe de décomposition.* Comme nous l'avons expliqué lors de la présentation du *principe de décomposition,* derrière une *relation de localisation* manipulée par l'utilisateur peuvent se cacher plusieurs *relations de localisations atomiques,* chacune correspondant à une part de la sémantique de la *relation de localisation* initiale. La *relation* Rl n'est donc pas un objet individuel, mais un ensemble (contenant au moins un élément) de *relations de localisations atomiques* (Rla). Rl est donc définissable de la manière suivante :

$$Rl = \{Rla_1, Rla_2, \dots, Rla_n\} \tag{4.2}$$

Avec Rl la *relation de localisation* et Rla_i des *relations de localisation atomiques.* Si cette amélioration permet la prise en compte des *relations de localisation atomiques,* elle ignore un second problème : celui de la prise en compte des *objets de référence* multiples. Il est en effet trop restrictif de considérer qu'un *indice de localisation* ne peut contenir qu'un seul *objet de référence.* Il y a tout d'abord le cas, déjà présenté, des *relations de localisation bi* ou *n-aire* (*e.g.* « Je suis entre Lyon et Grenoble » ou « Je suis de l'autre côté de la vallée par rapport à la forêt ») qui décrivent une position à partir de deux ou de plusieurs *objets de référence.* Il est donc nécessaire que *l'objet de référence Or* puisse contenir plusieurs *objets de référence.* Cette possible pluralité des *objets de référence* est cependant bien différente de celle des *relations*

de localisation précédemment introduite. Il n'est en effet pas nécessaire que les *relations de localisation atomiques* soient ordonnées. Pour reprendre l'exemple utilisé dans le 4.1.2.1, définir la *relation de localisation* « sous » comme la combinaison des *relations* « proche de » et « à une altitude inférieure à » est identique à la définir comme la combinaison des *relations* « à une altitude inférieure a » et « proche de ». Au contraire, si certaines relations, comme « entre » sont commutatives, ce n'est pas toujours le cas, comme pour la relation « de l'autre côté de, par rapport à ». Il est donc nécessaire que les *objets de référence* multiples soient représentés par un n-uplet, par définition ordonné.

Il existe cependant une autre situation, orthogonale à la précédente, où plusieurs *objets de référence* peuvent être employés. On peut, en effet, décrire une position par un *objet de référence* de deux manières : soit en se référant à un objet clairement identifié (*e.g.* « Grenoble », « le dôme des Écrins »), soit en le décrivant par sa nature (*e.g.* « une ville », « un sommet »). Ces deux manières de désigner *l'objet de référence* ont des implications différentes. Lorsqu'un *objet* est désigné sans ambiguïté on se réfère à une instance donnée, le nom fait alors office d'identifiant unique [10] et seul un seul *objet de référence* est contenu dans *l'indice de localisation.* À l'inverse, lorsqu'un *objet de référence* est uniquement désigné par son type on ne peut que rarement identifier une instance précise. Dire, toutes choses égales par ailleurs, « je suis proche d'une maison » est une description valide pour toutes les maisons présentes dans la zone *initiale de recherche.* La *spatialisation* d'une telle description de position nécessite donc de prendre en considération toutes les *instances* de type « maison » présentes dans la ZIR. Ainsi, comme pour les *relations de localisation,* l'objet *Or* n'est pas un objet individuel, mais un ensemble (non ordonné) *d'objets* (ou de n-uplets *d'objets*) *de référence. Or* est donc définissable de la manière suivante :

$$Or = \{(or_{11}, \dots, or_{1k}), \dots, (or_{n1}, \dots, or_{nk}) \mid n \geq 1 \vee k \geq 1\} \tag{4.3}$$

Avec *Or* l'ensemble des *objets de référence* et or_i un *objet de référence* donné, k le nombre d'objet dans le n-uplet des objets de référence associés à la relation de localisation considérée et n le nombre d'instances de n-uplet (ou le nombre d'objets de référence si $k = 1$) considéré. La valeur de n est égale à 1 si le n-uplet est désigné sans ambiguïté et est supérieure à 1 si l'objet de référence est ambigu (*e.g.* il est désigné par son type).

4.3 Définition de la méthode

Les *principes de modélisation* décrits, nous allons à présent formaliser notre méthode de construction de *zones de localisation probables.* L'objectif n'est cependant pas d'en présenter tous les aspects, mais d'en décrire le fonctionnement global et les interactions entre les différentes phases de la méthode. Ainsi, les considérations les plus avancées, comme la prise en compte de *l'incertitude* ou de *l'imprécision,* ou les points spécifiques à chaque phase particulière de la méthode, seront détaillés dans des chapitres dédiés. Ce chapitre ne se destine donc qu'à présenter le socle de notre méthode.

Dans le chapitre 2, nous avons ébauché une méthode de construction d'une *zone de localisation probable* à partir *d'une description de position,* en deux étapes : la *spatialisation* et la *fusion.* Cette présentation n'est cependant satisfaisante qu'en première approximation. En

10. Des cas d'homonymie restent cependant possibles, même si c'est rarement le cas aux grandes échelles spatiales.

effet, les principes de modélisation introduits dans ce chapitre (et plus particulièrement le *principe de décomposition*) complexifient la méthode en y ajoutant de nouvelles étapes, ne pouvant être distinguées avec ces anciennes définitions. C'est pourquoi ces dernières seront complétées et revues au fur et à mesure de cette partie.

La méthode que nous proposons est désormais décomposable en trois phases : la *décomposition,* la *spatialisation* et la *fusion,* elles-mêmes composées de plusieurs étapes. La Figure 4.6 présente une synthèse de l'ensemble de cette méthode.

4.3.1 La phase de *décomposition*

La phase de *décomposition* (qui sera détaillée dans le chapitre 5) est un ensemble de trois étapes permettant de passer d'un ensemble *d'indices de localisation* à un ensemble décomposé de ces *indices,* prêts à être *spatialisés.* Chacune des étapes de la phase de *décomposition* produit des nouveaux *indices de localisation.* Les étapes de cette phase sont interchangeables, sans que cela n'influe sur le résultat final, à l'exception de la première étape qui ne peut être effectuée qu'en premier.

4.3.1.1 La décomposition de *l'ensemble des indices de localisation*

La première de ces étapes est la décomposition de *l'ensemble des indices de localisation* (I), en ces différents *indices de localisation* (i_r). Cette décomposition est réalisée par les secouristes et nous est transmise par le biais de l'interface de géovisualisation (Figure 4.6) :

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \tag{4.4}$$

La *décomposition* de l'ensemble I permet d'extraire les différents *indices de localisation* (i_r), à partir desquels serons construites les *zones de localisation compatibles* durant la phase de *spatialisation.* Comme on peut le voir sur la Figure 4.6, les indices issus de la décomposition effectuée lors de la première étape du processus sont fusionnés lors de la dernière étape de la *phase de fusion.* Ainsi les différents *indices de localisation* sont traités indépendamment, conformément au principe de modélisation précédemment mentionné.

4.3.1.2 La *décomposition* des *objets de référence indéfinis*

Comme nous l'avons indiqué lors de leur formalisation, un *indice de référence* peut contenir de nombreux *objets de référence* différents. Si *l'indice de localisation* qui nous est transmis contient plus d'un objet [11], alors *l'objet de référence* est indéfini et *l'indice de localisation* doit être *spatialisé* pour chacun d'entre eux.

L'objectif de la *décomposition* des *objets de référence indéfinis* est donc de transformer un *indice de localisation* comportant plusieurs *objets de référence* concurrents en un ensemble *d'indices de localisation* contenant chacun un seul *objet de référence* (ou un seul n-uplet), c'est-à-dire une des instances de l'ensemble des *objets de référence possibles.* L'étape de décomposition des *objets de référence indéfinis* peut être formalisée de la manière suivante :

$$Dec_{Or}(i) = \{(S, Rl, or_i) \mid S \in, Rl \in, \forall or_i \in Or\} \tag{4.5}$$

11. Ou plus d'un n-uplet, dans le cas où la relation modélisée est bi ou n-aire.

Avec $Dec_{Or}(i)$ la fonction de *décomposition* de l'ensemble des *objets de référence,* S le *sujet* de *l'indice de localisation* décomposé, Rl son ensemble de *relations de localisation,* Or l'ensemble initial des *objets de référence* et or_i un objet de référence donné, appartenant initialement à Or.

4.3.1.3 La *décomposition* des *relations de localisation*

La troisième et dernière étape de cette phase est la *décomposition* des *relations de localisation.* C'est durant cette étape qu'est appliqué le *principe de décomposition* des *relations de localisation* que nous avons déjà présenté. Comme nous l'avons expliqué, cette étape consiste à décomposer chaque *relation de localisation* en un ensemble de composantes sémantiquement indépendantes, les *relations de localisation atomiques.* Comme pour les deux précédentes étapes, cette décomposition n'est pas toujours nécessaire, *la relation de localisation utilisée* pouvant déjà être atomique (*e.g.* « proche »). Cette étape peut être formalisée de la manière suivante :

$$Dec_{Rl}(i) = \{(S, Rla_i, Or) \mid S \in, \forall Rla_i \in Rl, Or \in\} \tag{4.6}$$

Avec $Dec_{Rl}(i)$ la fonction de *décomposition* des *relations de localisation,* S le *sujet* de *l'indice de localisation* décomposé, Rl la *relation de localisation* et Rla_i une des relations de *localisation atomiques décomposant* la *relation* Rl et Or l'ensemble initial des *objets de référence.*

La principale différence entre cette étape et les précédentes est qu'il est nécessaire de disposer d'une information supplémentaire pour savoir comment l'effectuer. En effet, lorsqu'un ensemble d'indice de localisation nous est transmis, les différents *indices de localisation* qui le composent sont déjà identifiés, puisque saisis tels quels par le secouriste, de la même manière que les différents *objets de référence,* mais contrairement à la *décomposition des relations de localisation.* En effet, notre souhait est de permettre au secouriste de sélectionner la *relation de localisation* correspondant à la description du requérant à partir d'une liste pré-définie de *relations de localisation* (cf. principe de modélisation explicite des connaissances). Ainsi, le secouriste n'a pas à manipuler directement les *relations de localisation atomiques.* Il est donc nécessaire de connaître la *décomposition des relations de localisation* et de s'y référer lors de cette étape. Ce processus sera détaillé plus longuement dans le chapitre 5.

La *phase de décomposition* consistant en l'application successive de la fonction de *décomposition* des *objets de référence indéfinis* et de la fonction de décomposition des *relations de localisation* à tous les *indices de localisation* contenu dans l'ensemble I, peut donc être formalisée de la manière suivante :

$$Dec(I) = \{i \mid i \in Dec_{Rl}(j), j \in Dec_{Or}(k), k \in I\} \tag{4.7}$$

Avec $Dec(I)$ la fonction de décomposition, $Dec_{Rl}(j)$ la fonction de *décomposition des relations de localisation,* $Dec_{Or}(k)$ la fonction de *décomposition des objets de référence indéfinis* et I l'ensemble des *indices de localisation.*

4.3.1.4 Illustration de la phase de décomposition

Pour illustrer l'ensemble de la *phase de décomposition,* imaginons que *l'ensemble des indices de localisation* (I saisi par un secouriste à partir de la description suivante : « je suis proche du *Pic de Jean Ray* et suis sur une crête ». Ce dernier est composé de deux *indices de localisation,* séparés (par le secouriste) lors de la première étape de la *phase de décomposition.* Les deux

indices de localisation : « je suis proche du *Pic de Jean Ray* » et « je suis sous une crête » peuvent être alors traités indépendamment :

Et
- « je suis proche du *Pic de Jean Ray* »
- « je suis sous une crête »

La seconde étape de la *phase de décomposition* fragmente chaque *indice de localisation* en fonction des *objets de référence.* Le premier *indice de localisation* (« je suis proche du *Pic de Jean Ray* ») se réfère à un objet nommé et unique, il n'est donc pas nécessaire de le décomposer, contrairement au second *indice de localisation* pour lequel l'ensemble des objets de type « crête » situés dans la ZIR [12] peuvent correspondre. Admettons que six crêtes aient été sélectionnées : *l'indice de localisation* qui nous sera transmis sera alors de la forme « je suis sous la *crête de Roche Motte* ou je suis sous la *crête de Font Froide* ou je suis sous la *crête de Serre Chapelle* ou je suis sous la *crête des Barres* ou je suis sous la *crête du Petit Puy* ». Ainsi, au sortir de cette seconde étape de décomposition, on dispose de *n indices de localisation* (première décomposition), eux-mêmes divisés en plusieurs *indices de localisation,* en fonction du nombre *d'objets de référence* à prendre en compte :

Et
- « je suis proche du *Pic de Jean Ray* »
- Ou
  - « je suis sous la *crête de Roche Motte* »
  - « je suis sous la *crête de Font Froide* »
  - « je suis sous la *crête de Serre Chapelle* »
  - « je suis sous la *crête des Barres* »
  - « je suis sous la *crête du Petit Puy* »

Enfin, la dernière étape de la phase de *décomposition,* nécessite la définition préalable d'un ensemble de *relations de localisation atomiques,* ce qui sera abordé dans le chapitre 5. Cependant, pour aller au bout de cet exemple, nous allons considérer que la relation de localisation « proche » est une *relation spatiale atomique* (hypothèse déjà utilisée précédemment) et que la relation de localisation « sous » se décompose en deux *relations spatiales atomiques, proximité* et *différence d'altitude négative* [13]. Ainsi, le premier *indice de localisation* n'est pas décomposé, puisque nous considérons que la *relation de localisation* « proche » est atomique, contrairement à *l'ensemble des indices de localisation* issus de la décomposition de l'indice : « je suis sous une crête », qui voient tous leur relation de localisation (« sous ») décomposée. Ainsi, au terme de la *phase de décomposition,* l'ensemble des *indices de localisation :* « je suis proche du *Pic de Jean Ray* » et « je suis sur une crête » devient :

12. Voir dans un espace plus réduit si le secouriste décide, compte-tenu de ses connaissances et de la situation, de réduire la zone de recherche pour cette catégorie d'objets.

13. Comme nous le verrons ultérieurement cette décomposition est fortement simplificatrice. Cet exemple n'est donc pas à considérer comme représentatif de la décomposition de la *relation de localisation* « sous », mais bien comme une illustration de la phase de décomposition dans son ensemble.

- Et
  - « je suis proche du *Pic de Jean Ray* »
  - Ou
    - Et
      - « je suis proche de la *crête de Roche Motte* »
      - « je suis à une altitude inférieure à la *crête de Roche Motte* »
    - Et
      - « je suis proche de la *crête de Font Froide* »
      - « je suis à une altitude inférieure à la *crête de Font Froide* »
    - Et
      - « je suis proche de la *crête de Serre Chapelle* »
      - « je suis à une altitude inférieure à la *crête de Serre Chapelle* »
    - Et
      - « je suis proche de la *crête des Barres* »
      - « je suis à une altitude inférieure à la *crête des Barres* »
    - Et
      - « je suis proche de la *crête du Petit Puy* »
      - « je suis à une altitude inférieure à la *crête du Petit Puy* »

Comme le montre cette longue énumération, *le processus de décomposition,* même lorsqu'il est appliqué à un petit *ensemble d'indices de localisation* (ici deux), peut générer de nombreux *indices de localisation décomposés,* qu'il est difficile d'énumérer. Nous sommes cependant convaincu que les apports permis par cette approche (*e.g.* spatialisation indépendante, décomposition sémantique) compensent la multiplication des *indices de localisation.*

4.3.2 La phase de *spatialisation*

Une fois que les *indices de localisation* ont été entièrement décomposés, il est possible de procéder à leur *spatialisation.* Comme nous l'avons expliqué précédemment, la phase de *spatialisation* consiste à transformer un *indice de localisation* décomposé en une *zone de localisation compatible.* Il s'agit de la seule étape de notre méthode qui ne modifie pas le nombre d'objets traité (la phase de *décomposition* les augmente et celle de *fusion* les réduit) et qui crée un nouveau type de données : des objets géographiques sous la forme de *zones de localisation compatibles.* Pour construire la *zone de localisation compatible* correspondant à un *indice de localisation* donné, il est nécessaire d'identifier les positions pour lesquelles *l'indice de localisation* est vrai. On peut donc imaginer une fonction S_{Rla} destinée à la *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique* donnée. Cette fonction, que l'on peut définir de la manière suivante :

$$\mathsf{S}_{Rla}(p, o) = \begin{cases} 1 \text{ si } p \text{ est une « bonne position »} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases} \tag{4.8}$$

renvoie une valeur booléenne pour chaque position p indiquant si cette position valide la *relation de localisation atomique Rla* par rapport à l'objet de référence o. On peut alors définir la *zone de localisation compatible* issue de la *spatialisation* d'un *indice de localisation* décomposé i comme l'ensemble des positions p appartenant à la *zone initiale de recherche* et pour lesquelles la fonction S_{rla} est vraie :

$$\mathsf{ZLC}_i = \{p \mid \mathsf{S}_{Rla}(p, o) = 1 \wedge p \in \mathsf{ZIR} \wedge o \in i\} \tag{4.9}$$

Avec ZLC_i la *zone de localisation compatible* pour l'indice de localisation i, S_{Rla} la fonction de *spatialisation* de ce même indice et p un point appartenant à la *zone initiale de recherche,* ZIR, elle-même un sous-ensemble de $\mathbb{R}^2$, défini par le secouriste. Toute la difficulté de la phase de *spatialisation* tient en la définition de cette fonction de spatialisation S_{Rla}. La méthode de définition d'une telle fonction sera présentée dans le chapitre 7.

Au terme de la phase de *spatialisation,* on dispose d'un grand ensemble de *zones de localisation compatibles* (ZLC), comptant autant d'éléments qu'il y a d'indices au terme de la *phase de décomposition.* Cet ensemble est définissable de la manière suivante :

$$\mathsf{ZLC} = \{\mathsf{ZLC}_i \mid i \in Dec(I)\} \tag{4.10}$$

Avec ZLC_i la *zone de localisation compatible* issue de la *spatialisation* de *l'indice de localisation décomposé* i, *Dec* la fonction de décomposition et I l'ensemble des *indices de localisation.* Ces différentes *zones de localisation* contiennent l'ensemble des informations produites par notre méthode, mais leur (potentiel) grand nombre rend leur exploitation directe, sinon impossible, du moins délicate, il est donc nécessaire de les fusionner pour obtenir une seule zone, la ZLP.

4.3.3 La phase de fusion

La *phase de fusion* des *zones de localisation* se décompose en trois étapes, chacune analogue à l'une des étapes de la *phase de décomposition,* comme indiqué par des traits pointillés sur la Figure 4.6. Cette phase permet de fusionner les *zones de localisation compatibles* créées lors de la *spatialisation* en une seule, la zone de localisation probable, correspondant à l'ensemble des indices de localisation. La sémantique de chaque étape de fusion et l'approche proposée seront détaillées dans le chapitre 8

De toutes les étapes de notre méthodologie, la phase de *fusion* est, de loin, la plus simple. Son objectif est de combiner les différentes *zones de localisation compatibles* créées lors de la phase de *spatialisation* en une seule, la *zone de localisation probable* (ZLP).

4.3.3.1 La *fusion* des *relations de localisation atomiques*

La première étape de la *phase de fusion* est la *fusion* des *zones de localisation compatibles* issues de la *spatialisation.* Cette étape répond donc à l'étape de *décomposition des relations de localisation* de *la phase de décomposition,* c'est-à-dire que le nombre de *zones de localisation* en résultant est identique au nombre *d'indices de localisation* avant la *décomposition des relations de localisation* (Figure 4.6).

Conformément au *principe de décomposition,* les *relations de localisation* se décomposent en une série de *relations de localisation atomiques* liées par une relation de conjonction. Par conséquent, pour valider une *relation de localisation* il est nécessaire de valider toutes les *relations de localisation atomiques* qui la composent. La méthode de *fusion* des *relations de localisation atomiques* ne doit donc retourner que les positions présentes dans toutes les *zones de localisations* qu'elle fusionne. Comme chaque *zone de localisation* peut être formalisée comme l'ensemble des points validant une *relation de localisation,* on peut construire la *zone de localisation compatible* correspondant à une *relation de localisation* composée en intersectant les *zones de localisation*

compatibles correspondant à la *spatialisation* des *relations de localisation atomiques.* Ainsi, la *zone de localisation* correspondant à la fusion de plusieurs *relations de localisation* correspond à :

$$\mathsf{ZLC}_{o_i} = \bigcap \mathsf{ZLC}_{Rla_j} \tag{4.11}$$

Avec ZLC_{o_i}, la *zone de localisation compatible* correspondant à *l'objet de référence* o_i et ZLC_j la *zone de localisation compatible* correspondant à la *spatialisation,* pour l'objet de référence o_i, de la *relation de localisation atomique* Rla_j.

4.3.3.2 La *fusion* des *objets de référence indéfinis*

La seconde étape de cette phase est la *fusion* des différents *objets de référence* candidats. Cette étape répond à *l'étape de décomposition des objets de référence indéfinis.* Comme nous l'indiquions lors de la présentation de la *phase de décomposition,* les étapes de *décomposition des relations de localisation* et de décomposition des *objets de référence indéfinis* sont interchangeables et il en va de même pour les étapes de *fusion* leur correspondant. Ainsi, cette étape de fusion pourrait être interchangée avec l'étape, précédemment présentée, de *fusion des relations de localisation atomiques,* sans que cela n'impacte le résultat de la modélisation.

La *fusion des objets de référence indéfinis* se distingue des autres étapes de *fusion* par sa forme disjonctive. Comme nous l'avons indiqué lors de la présentation de *l'étape de décomposition des objets de référence indéfinis,* les différents *objets de référence* candidats (pour un même indice de localisation) sont concurrents. Ainsi, pour que *l'indice de localisation spatialisé* soit valable en une position, il est nécessaire qu'il soit vrai pour au moins un des *objets de référence* et non pour tous (comme c'est le cas lors de la *fusion* des *relations de localisation atomiques*). La *zone de localisation compatible* correspondant à un *indice de localisation* dont *l'objet de référence* est indéfini peut, par conséquent, être construite en faisant l'union de l'ensemble des *zones de localisation compatibles* construites en *spatialisant* l'indice de localisation pour chaque objet de référence candidat :

$$\mathsf{ZLC}_i = \bigcup_{i \in I} \mathsf{ZLC}_{o_i} \tag{4.12}$$

Avec ZLC_i la *zone de localisation compatible* correspondant à un *indice de localisation* i et ZLC_{o_i} la *zone de localisation compatible* pour l'objet i de l'indice de localisation i.

4.3.3.3 La *fusion* des *indices de localisation*

La dernière étape de *la phase de fusion* est celle de la *fusion* des *indices de localisation* en vue de construire la *zone de localisation probable, i.e.* le résultat final de notre méthode. Contrairement aux *zones de localisation compatibles,* la *zone de localisation probable* est toujours unique, même si elle peut être fragmentée ou vide (mais ce cas traduit une erreur dans la description de la position, dans sa saisie ou sa *spatialisation*).

Comme lors de l'étape de *fusion* des *relations de localisation atomiques,* les différentes *zones de localisation compatibles* sont *fusionnées* à l'aide d'une intersection ensembliste. En effet, la *zone de localisation probable* est définie comme l'ensemble des positions appartenant à toutes les *zones de localisation compatibles.* On peut donc exprimer la zone de localisation probable de la manière suivante :

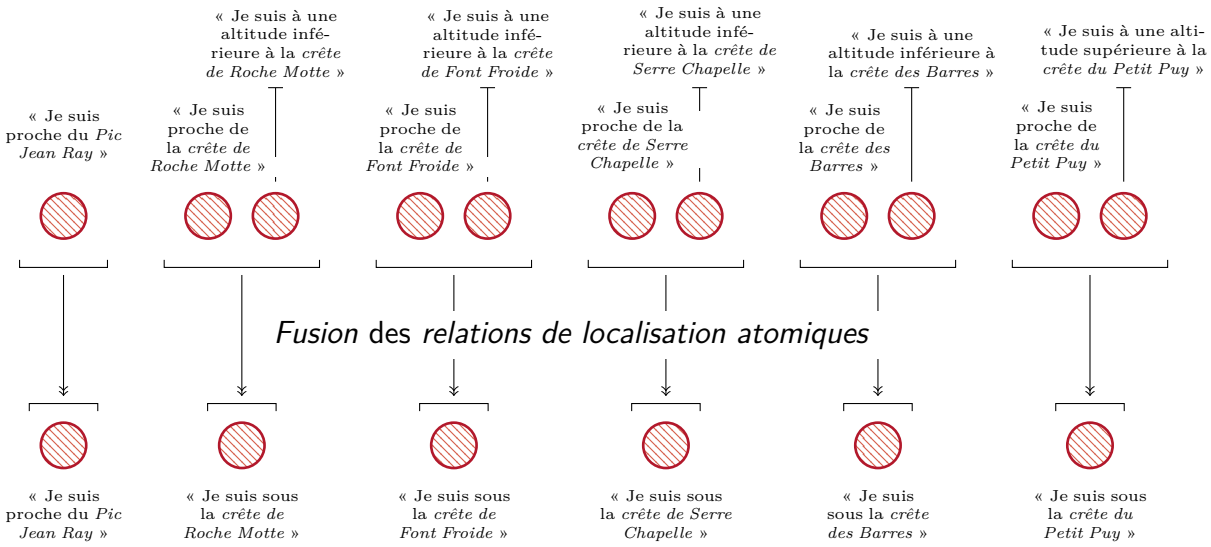


FIGURE 4.3 – Illustration de l'étape de *fusion des relations de localisation atomiques*

$$\mathsf{ZLP}_I = \bigcap_{i \in I} \mathsf{ZLC}_i \tag{4.13}$$

Avec ZLP la *zone de localisation probable, I*, l'ensemble des *indices de localisation* pris en compte, *i* un *indice de localisation* et ZLP un *zone de localisation compatible.*

4.3.3.4 Illustration de la *phase de fusion*

On peut illustrer l'ensemble de la *phase de fusion* à l'aide de l'exemple également utilisé pour décrire la *phase de décomposition* (cf. 4.3.1.4). Au terme de la *phase de décomposition,* on dispose de onze *indices de localisation* décomposés. Durant la phase de *spatialisation,* une ZLC est construite indépendamment pour chacun d'entre-eux. Au début de la phase de fusion, on dispose donc de onze ZLC (comme le montre la partie supérieure de la Figure 4.3) qu'il va falloir fusionner de sorte à obtenir une ZLP.

La Figure 4.3 propose une illustration de la première étape de la phase de *fusion,* la fusion des *relations de localisation atomiques.* L'objectif de cette étape est de regrouper les *zones* issues de la *spatialisation d'indices de localisation* créés suite à la décomposition d'une *relation de localisation.* Les *zones* spatialisées à partir *d'indices* issus de la même décomposition sont alors fusionnées indépendamment à l'aide d'un opérateur d'intersection permettant de construire une nouvelle *zone de localisation* ne contenant que les positions appartenant aux deux *zones de localisations* fusionnées. Si l'on reprend l'exemple précédent, on obtiendra, après la *fusion* des *relations de localisation atomiques,* sept *zones de localisation compatibles,* correspondant aux *indices de localisation :* « je suis proche du *Pic de Jean Ray* », « je suis sur la *crête de Roche Motte* », « je suis sur la *crête de Font Froide* », « je suis sur la *crête de Serre Chapelle* », « je suis sur la *crête des Barres* », et « je suis sur la *crête du Petit Puy* ».

L'étape de fusion des objets de référence indéfinis est, quant à elle, illustrée par la Figure 4.4. Comme précédemment on regroupe les *zones de localisation* en fonction de la décomposition

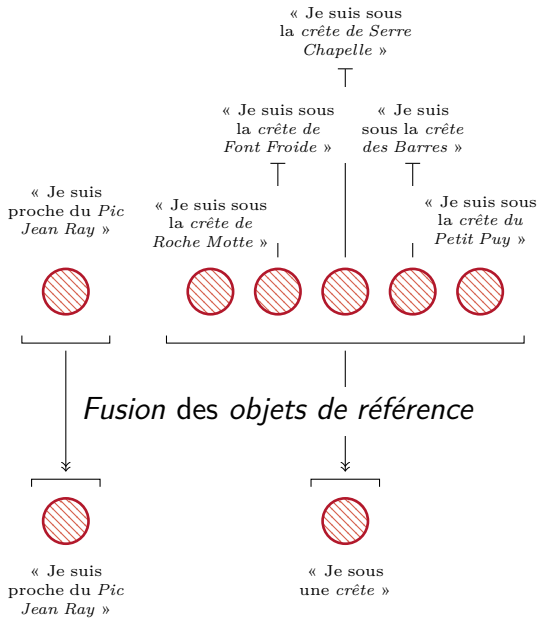


FIGURE 4.4 – Illustration de l'étape de *fusion des objets de référence indéfinis*

dont elles sont issues et on les combine en parallèle avec un opérateur ensembliste, ici l'union. Les *zones de localisation* résultantes sont alors composées des positions appartenant à, au moins, une des zones fusionnées. Au terme de cette étape de *fusion,* on obtient donc, deux *zones de localisation compatibles.* La première (inchangée depuis la *spatialisation*) correspond à *l'indice de localisation* « je suis proche du *Pic de Jean Ray* ». Comme *l'objet de référence* est unique, aucune *fusion* n'est à effectuer. La zone correspondant au second *indice de localisation,* « je suis sur une crête » correspond, quant à elle, à l'union des *zones de localisation compatibles* correspondant à chacune des crêtes candidates.

lL troisième et dernière étape de la *phase de fusion* correspond à la fusion des différents *indices de localisation* et à la construction de la *zone de localisation probable* (Figure 4.5). À la fin de la seconde étape de la phase de fusion, on dispose d'une *zone de localisation compatible* pour chaque *indice de localisation* contenu dans *l'ensemble des indices de localisation* I (Figure 4.6). Pour obtenir une seule zone à partir de ces différentes *zones de localisation compatibles,* on utilise une nouvelle fois un opérateur d'intersection qui permet de construire une zone contenant les positions qui appartiennent à toutes les ZLC fusionnées. Ainsi, dans notre exemple, la *zone de localisation probable* correspond à *l'intersection* de deux *zones de localisation compatibles,* celle construite à partir de *l'indice de localisation* « je suis proche du *Pic de Jean Ray* » et celle construite à partir de *l'indice de localisation* « je suis sur une crête ».

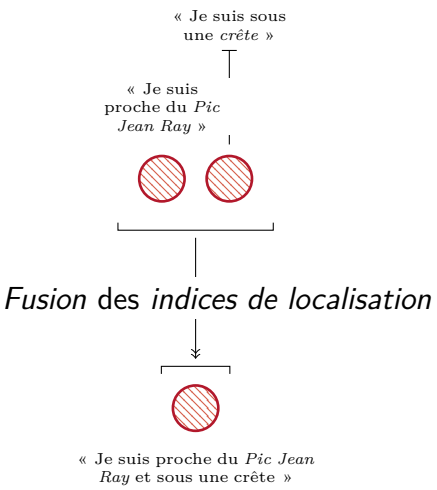


FIGURE 4.5 – Illustration de l'étape de fusion des *indices de localisation*

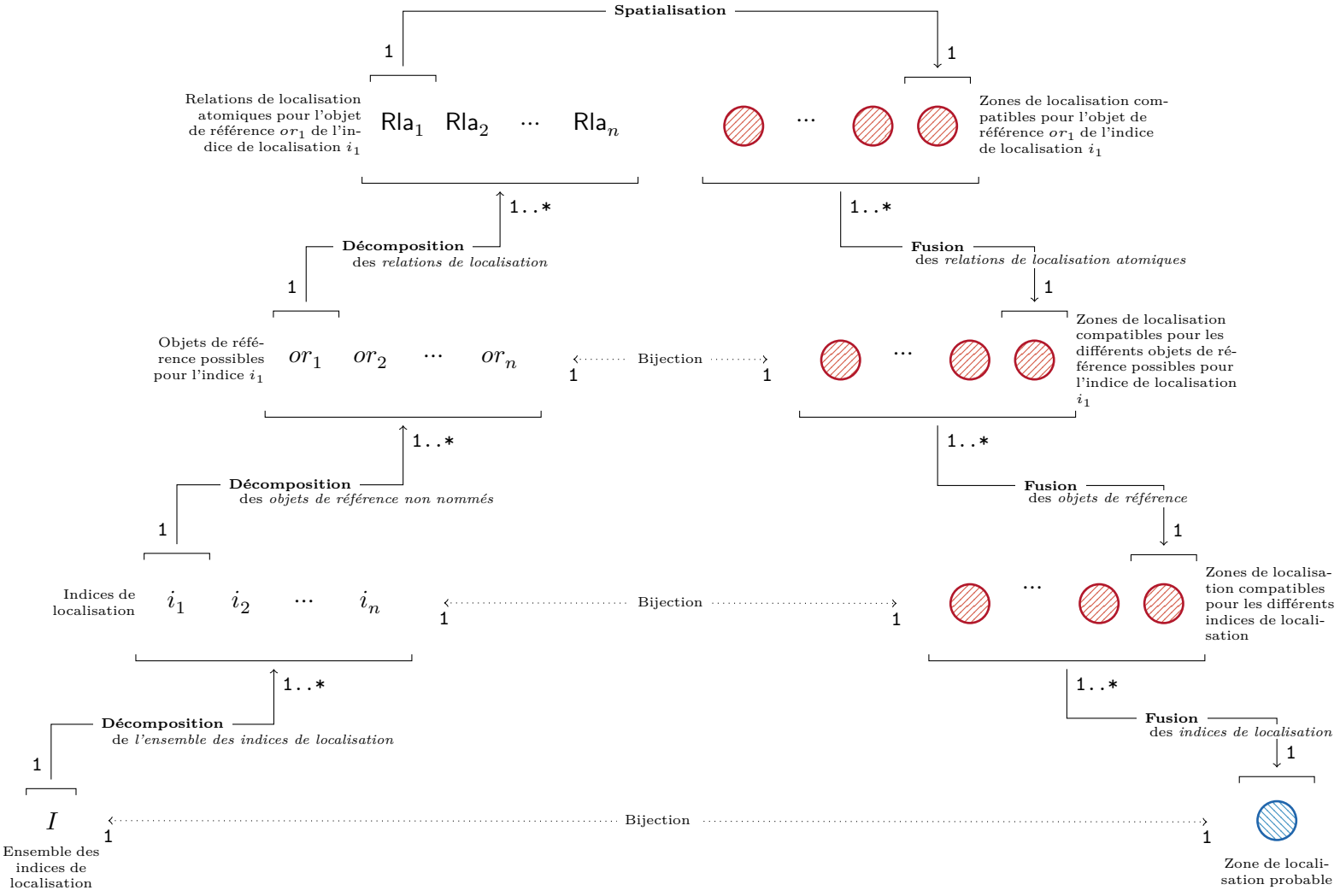


FIGURE 4.6 – Organisation générale de la méthode de construction de la *zone de localisation probable* à partir d'un ensemble d'indices de localisation

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir les grandes lignes de notre méthode de construction d'une *zone de localisation probable* à partir d'une description de position.

Cette méthode est organisée autour de trois phases distinctes et successives (*décomposition, spatialisation* et *fusion*). C'est au cours de la première d'entre elles que les *indices de localisation* saisis et transmis par le secouriste sont traités en vue d'obtenir un ensemble d'indices décomposés et indépendants qui seront ensuite *spatialisés.* Cette décomposition, qui s'applique aux *relations de localisation non atomiques* et aux *objets de référence indéfinis* conduit à la multiplication des *indices de localisation* à *spatialiser* mais offre en revanche la possibilité de les traiter de manière totalement indépendante, les résultats d'un *spatialisation* n'ayant d'impact sur les autres *spatialisation* que lors de la dernière phase de la méthode, la *fusion.* Cette dernière phase permet de regrouper les différentes *zones de localisation compatibles,* jusqu'à aboutir à une seule zone, la *zone de localisation probable.*

Telle que présentée, cette méthode ne permet pas de prendre en compte *l'incertitude* et *l'imprécision.* Cependant, ces différents éléments serons ajoutés à la méthode au fur et à mesure des chapitres de cette seconde partie.

Chapitre 5

La phase de *décomposition*

Introduction 129
5.1 La décomposition des *relations de localisation* 130
5.1.1 La décomposition des *relations de localisation* 130
5.1.2 Vers la définition d'une ontologie des règles de décomposition des *relations de localisation* 132
5.2 Définition du contenu de l'ontologie des relations de décomposition 133
5.2.1 La retranscription et l'analyse des alertes 133
5.2.1.1 Les corpus d'alertes 133
5.2.1.2 Template de retranscription 134
5.2.1.3 Analyse des retranscriptions 137
5.2.2 Construction des ontologies 138
5.2.2.1 L'ontologie des *relations de localisation* 138
5.2.2.2 L'ontologie des *relations de localisation atomiques* 141
Conclusion 143

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail la première partie de notre méthode de construction de *zones de localisation probables :* la *phase de décomposition.* Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, cette phase se compose de trois étapes distinctes : (a) la *décomposition* de *l'ensemble des indices de localisation ;* (b) la *décomposition* des *objets de référence non nommés* et (c) la *décomposition* des *relations de localisation.* Ces différentes étapes ne sont pas d'une difficulté comparable. Si la *décomposition* des *relations de localisation* nécessite une formalisation a priori (on ne demande pas au secouriste de saisir les relations de localisation sous leur forme décomposée), ce n'est pas le cas des deux premières étapes, où les différents éléments (*indices de localisation* et *objets de référence,* même *indéfinis*) sont distingués dès la saisie. Ainsi, seule la dernière étape de cette phase nécessite l'élaboration d'une méthode spécifique , c'est pourquoi ce chapitre, destiné à détailler la phase de *décomposition,* traitera exclusivement de sa dernière étape : la *décomposition des relations de localisation.*

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons en détail le processus de décomposition des *relations de localisation.* Puis, dans une seconde partie, nous présenterons le processus de définition des ontologies servant à définir les règles de décomposition.

5.1 La décomposition des *relations de localisation*

Parmi les trois étapes constitutives de la phase de décomposition, seule la décomposition des *relations de localisation* nécessite le développement d'une méthode spécifique. En effet, les étapes de décomposition de l'ensemble des *indices de localisation* et des *objets de référence indéfinis* ne font qu'expliciter un découpage présent dès la saisie dans l'interface utilisateur. Ces deux opérations ne nécessitent donc pas l'apport de connaissances supplémentaires, contrairement à la décomposition des *relations de localisation.*

En effet, les *principes de décomposition* et *d'intégration dans le contexte métier* s'opposent en partie. Si la décomposition permet de faciliter la *spatialisation* des *indices de localisation* en permettant de manipuler des concepts précis et en minimisant les redondances, elle implique également de travailler à l'aide de *relations de localisation* (atomiques) *ad hoc,* qui ne sont pas destinées à être manipulées directement par l'utilisateur. Il est donc inenvisageable de demander à l'utilisateur de saisir des *relations de localisation atomiques,* qui ne sont pas prévues à cet effet. C'est pourquoi nous proposons d'automatiser l'étape de décomposition des *relations de localisation atomiques.*

5.1.1 La décomposition des *relations de localisation*

Nous avons précédemment abordé la décomposition des *relations de localisation* en la présentant comme le processus permettant de passer d'une *relation de localisation* à un ensemble de *relations de localisations atomiques* liées par des conjonctions. Chaque *relation de localisation atomique* est adossée à une méthode de *spatialisation,* permettant de construire la *zone de localisation compatible* correspondant à la *relation de localisation atomique* pour un *objet de référence* donné. La difficulté majeure de cette décomposition consiste donc à identifier la manière dont les *relations de localisation* utilisées par le requérant se décomposent. Notre objectif étant de proposer une décomposition selon des critères sémantiques, propres à chaque *relation de localisation,* il est nécessaire de disposer de connaissances a priori sur la sémantique des *relations de localisation.*

Nous proposons donc de créer une base de règles, formalisant la décomposition de chaque *relation de localisation* en des *relations de localisation atomiques* spatialisables. Ceci permet de décomposer les *relations de localisation* avec une méthode en trois étapes : (1) réception de la *relation de localisation* (Rl) à décomposer, (2) lecture de la base de règles et identification des règles définies pour la *relation de localisation* Rl et (3) application des règles de décomposition à la *relation de localisation* Rl. Ce processus de décomposition, illustré par la Figure 5.1, nécessite donc deux entrées : une *relation de localisation* à décomposer et une base de règles, définissable en amont et qui ne sera modifiée que lorsque nécessaire (*e.g.* correction d'erreurs, ajustement, ajout de nouvelles règles, *etc.*)

La constitution d'une telle base de règles pose cependant plusieurs problèmes, que ce soit au niveau de la définition de sa structure ou de son contenu. Il est en effet nécessaire qu'elle permette de formaliser toutes les variations de décompositions souhaitées, qu'il faut alors identifier. De plus, cette organisation ne permet de décomposer que des *relations de localisation* incluses dans la base de règles. Il est donc indispensable qu'elle contienne l'ensemble des *relations de localisation* pertinentes dans notre contexte et leur décomposition. La constitution d'une telle base de règles nécessite donc au préalable un travail d'identification et de définition des *relations de localisations* utilisées dans notre contexte.

Dans l'exemple utilisé pour présenter le *principe de décomposition* (cf. 4.3.1.4) une *rela-*

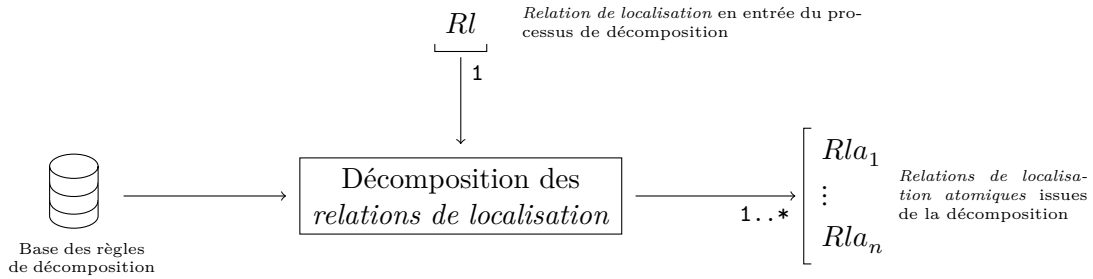


FIGURE 5.1 – Illustration du processus de décomposition des relations de localisation

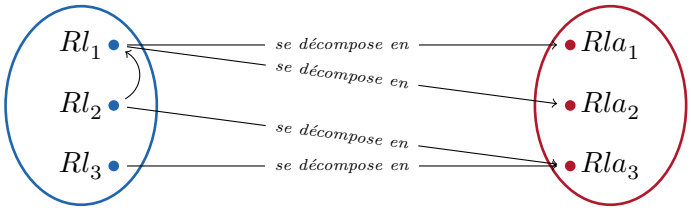
tion de localisation (« sous ») était décomposée en deux *relations de localisation atomiques* (« proche » et « altitude inférieure »). Si cette configuration a pour mérite de bien illustrer le fonctionnement et l'objectif du *principe de décomposition,* elle ne présente qu'une des configurations possibles. Tout d'abord, il est possible qu'une *relation de localisation* soit décomposable en plus de deux *relations de localisations atomiques.* Par exemple, VANEGAS et al. (2011) proposent de décomposer la *relation de localisation* « entouré de » (dans *l'indice de localisation* « A est entouré de B »), avec des *relations de localisation* directionnelles, donnant les *indices de localisation :* « B est au nord de A », « B est à l'est de A », « B est au sud de A » et « B est à l'ouest de A ». Ainsi, il n'y a aucune raison de limiter le nombre de *relations de localisation atomiques* décomposant une *relation de localisation,* même s'il est peu probable que ce nombre puisse atteindre de très grandes valeurs. À l'inverse, on peut se questionner sur la possibilité que certaines *relations de localisation* ne soient pas décomposables. Par exemple, la *relation de localisation* « à » (*e.g.* je suis au sommet) ne nous semble pas décomposable. Pourtant il s'agit bien d'une *relation de localisation,* que l'on est amené à utiliser fréquemment. Dans ce cas, *relation de localisation* et *relation de localisation atomique* sont confondues. Cet exemple illustre le fait que les deux types de *relations de localisation* peuvent se confondre. En effet, dans notre acception, les *relations de localisation atomiques* sont définies selon un critère théorique et computationnel et donc directement spatialisables. La définition des *relations de localisation* est plus proche des considérations de l'utilisateur, puisque l'on utilise ce terme pour désigner toute relation conçue pour être directement manipulable par l'utilisateur, là où la plupart des *relations de localisation atomiques* désignent des concepts plus fins que ceux que nous sommes habitués à manipuler en langage naturel. Dans le cas où la *décomposition* n'est pas possible, c'est-à-dire lorsque la *relation de localisation* et la *relation de localisation atomique* sont confondues, la relation est à la fois directement spatialisable — puisque atomique — et directement manipulable par l'utilisateur. Il est aussi envisageable que certaines *relations de localisation* (décomposables en *relations de localisation atomiques*) soient elles-mêmes le résultat de la décomposition d'autres *relations de localisation.* Pa conséquent, une règle de décomposition n'aboutit pas nécessairement à une *relation de localisation atomique,* bien qu'elle parte, systématiquement d'une *relation de localisation.* Les décompositions peuvent donc être récursives.

Ainsi, pour représenter l'ensemble des décompositions possibles, il est nécessaire que la base de règles définie puisse : (1) permettre que la décomposition d'une *relation de localisation* se fasse en un nombre, possiblement élevé, de *relations de localisation atomiques,* (2) permettre des décomposition récursives (*i.e.* qu'une *relation de localisation* se décompose en des *relations de localisation* non atomiques), (3) autoriser que certaines *relations de localisation* ne soient

pas décomposables, (4) garantir l'unicité des *relations de localisation,* qu'elles soient atomiques ou non et (5) interdire les décompositions concurrentes d'une même *relation de localisation.*

5.1.2 Vers la définition d'une ontologie des règles de décomposition des *relations de localisation*

Nous avons choisi de formaliser les règles de décomposition des *relations de localisation* à l'aide d'une ontologie de décomposition. Le choix d'utiliser une ontologie présente l'avantage de définir un cadre théorique et pratique, nous permettant de nous focaliser sur la définition de son contenu. Pour permettre la décomposition des *relations de localisation* telle que nous l'avons présentée, cette dernière doit contenir, a minima, trois types d'objets : (a) *les relations de localisation* à décomposer, (b) les *relations de localisation atomiques* qui les décomposent et (c) les *relations de décomposition* formalisant la décomposition d'une *relation de localisation* en plusieurs *relations de localisations atomiques* (Figure 5.2). L'ensemble des *relations de localisation* définies dans l'ontologie forme un vocabulaire contrôlé, qui peut répondre à plusieurs besoins du projet Choucas, notamment permettre la définition d'une liste de relations de localisation accessible à l'utilisateur via l'interface et lui permettant de saisir les *indices de localisation* durant la phase d'alerte[1]. Le travail de décomposition ne consiste alors qu'à appliquer la règle de décomposition — définie dans l'ontologie — correspondant à la *relation de localisation* saisie.



Ensemble des *relations de localisation*

Ensemble des *Relations de localisation atomiques*

FIGURE 5.2 – Concepts et relations nécessaires à la définition d'une ontologie permettant de décomposer une *relation de localisation* $(Rl_1, \dots, Rl_n)$ en un ensemble de *relations de localisation atomiques* $(Rla_1, \dots, Rla_n)$.

La Figure 5.2 présente un aperçu de l'organisation globale de l'ontologie des règles de décomposition. Comme nous l'avons indiqué précédemment, les liens de décomposition partent toujours d'une *relation de localisation* et peuvent aboutir à une autre *relation de localisation* ou à une *relation de localisation atomique.* Pour construire la base des relations de localisation, des relations de localisation atomiques et des relations de décomposition entre ces deux ensembles, nous avons adopté, conformément au principe d'intégration dans le contexte métier, une démarche centrée sur le besoin de l'utilisateur, c'est-à-dire fondée sur la définition préalable des *relations de localisation.* Les relations de localisation atomiques et les relations de décomposition ont été définies ultérieurement en fonction des relations de localisation et non l'inverse, car cela aurait pu conduire à la définition de concepts inadaptés à notre contexte applicatif. En procédant de la sorte, nous garantissons que les concepts mis à disposition des

1. Comme nous l'avons déjà indiqué, la saisie des indices par le secouriste correspond à la première étape de la phase de décomposition.

utilisateurs correspondent à la réalité du contexte applicatif. Pour mettre en place cette démarche, il a été nécessaire d'identifier les *relations de localisations* utilisées dans notre contexte et les spécificités de leur usage. La suite de ce chapitre (section 5.2) présente la manière dont nous avons procédé pour construire une telle ontologie.

5.2 Définition du contenu de l'ontologie des relations de décomposition

Une fois que la structure globale de l'ontologie des règles de décomposition a été fixée, il est nécessaire de définir son contenu en détail (*i.e.* les *relations de localisation,* les *relations de décomposition* et les *relations de localisation atomiques*). Pour ce faire, nous pouvons nous appuyer sur les différents travaux formalisant des *relations de localisation* (Aurnague et al. 1997 ; Borillo 1998 ; Vandeloise 1986), pour identifier des *relations de localisation* et en proposer une décomposition. Cependant, bien que cette approche soit pertinente, elle ne nous semble pas être pleinement adaptée à notre cas d'application. En effet, ces travaux traitent des *relations de localisation* dans leur acception générale, alors que nous travaillons sur un contexte particulier, avec un relief et des *objets de référence spécifiques* (*e.g.* montagne, col, *etc.*). Si l'on augure que le contexte influence l'utilisation des *relations de localisation* et donc impacte leur sémantique, — comme l'illustre l'aphorisme de Wittgenstein (1953) : « la signification c'est l'usage » —, il est alors nécessaire de prendre en compte les spécificités des descriptions de positions en milieu montagneux, afin de proposer une ontologie la plus pertinente possible.

Pour ce faire, nous avons entrepris de recenser et d'étudier les *relations de localisation* utilisées lors de cas réels. Les PGHM disposant d'un enregistreur d'appels, nous avons pu obtenir des enregistrements de discussions contenant des descriptions de positions. En analysant le contenu de ces enregistrements, il est alors possible d'identifier les *relations de localisation* les plus fréquentes et leur sémantique.

5.2.1 La retranscription et l'analyse des alertes

L'exploitation des enregistrements nécessite leur retranscription préalable. Pour ce faire, nous avons élaboré un *template* (ou canevas) de retranscription qui, en fixant un format, facilite le travail de saisie et d'analyse des enregistrements. Le travail de définition du template et de retranscription a été effectué collaborativement (Bunel et al. 2019a), les résultats pouvant être exploités par différents membres du projet Choucas.

5.2.1.1 Les corpus d'alertes

Les retranscriptions ont été réalisées à partir d'un ensemble de 52 enregistrements d'appels de demande d'assistance auprès des PGHM de Chamonix (5 alertes) et de Grenoble (47 alertes). Ces fichiers audio, sélectionnés et compilés par le PGHM de Grenoble, forment deux corpus d'alertes distincts, qui nous ont respectivement été transmis en 2017 et en 2019. Ces deux corpus sont relativement similaires, que ce soit par le nombre d'alertes, leur durée — qui varie de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes (Figure 5.3) — ou leur contenu. Si nous disposons de relativement peu d'alertes à analyser, ces dernières ont été sélectionnées par les secouristes de Grenoble de manière à offrir une vision représentative du processus de localisation des victimes.

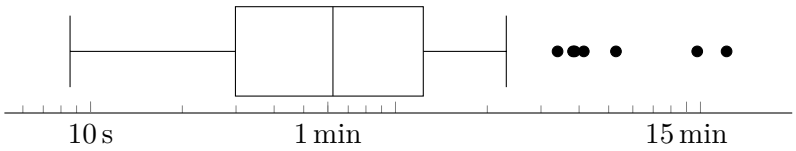


FIGURE 5.3 – Distribution de la durée des alertes

Malheureusement, nous n'avons que peu d'informations exogènes sur ces différentes alertes. Pour certaines d'entre elles, les secouristes nous ont transmis les coordonnées effectives de la victime ou la date et l'heure de l'intervention, mais dans la plupart des cas ces informations nous sont inconnues, à moins qu'elles soient explicitement données dans l'alerte (*e.g.* énoncé oral de coordonnées GPS, précision de l'heure, *etc.*). Cette absence d'informations exogènes peut, dans de rares cas, empêcher la *spatialisation d'indices de localisation* (mais non leur analyse). C'est par exemple le cas pour *l'indice de localisation,* tiré du *fil rouge* (chapitre 1) : « La victime vient de passer du Soleil à l'ombre ». En effet, la *spatialisation* de cet *indice de localisation* ne peut être faite sans connaissance de l'heure de l'appel. Une autre particularité importante de ces enregistrements est qu'ils sont réalisés au niveau de la ligne téléphonique des PGHM et non des CODIS, généralement contactés par les requérants (chapitre 2). De plus, les fichiers qui nous ont été transmis ont été montés, de sorte à censurer les informations personnelles ou médicales. Les enregistrements retranscrits ne sont donc qu'un extrait des alertes et non les appels dans leur ensemble.

5.2.1.2 Template de retranscription

Notre parti pris n'a pas été de travailler à partir d'une retranscription libre des alertes, mais à l'aide d'un tableau prédéfini, un *template de retranscription* (Tableau 5.1) dont la structure reprend celle des *indices de localisation* telle que nous l'avons définie (chapitre 4). Ce choix présente deux avantages. Tout d'abord il permet de faciliter l'analyse des alertes en imposant, dès la saisie, la définition de certains critères. Pour faciliter les saisies et leur répartition entre transcripteurs, un fichier de retranscription utilisant ce template est créé pour chaque alerte.

Dans sa forme finale, ce template de transcription se présente sous la forme d'un fichier tabulaire structuré, auto-documenté et exemplifié, composé de trois onglets principaux — (a) *métadonnées*, (b) *interprétation des expressions* et (c) *toponymie* —, permettant de transcrire différents aspects des alertes. L'ensemble du fichier est conçu pour faciliter le processus de retranscription et limiter au maximum l'influence du transcripteur sur la saisie. Chaque onglet et champ à saisir est documenté, des instructions de saisie présentant l'ensemble des tâches à effectuer sont données et un exemple de saisie complet et complexe est détaillé. De plus, la structure même du document est conçue pour faciliter la saisie. Les onglets sont placés dans leur ordre de consultation ou de saisie (*e.g.* on commence par lire les instructions dans l'onglet (1) *Instructions & Consignes,* puis on saisit les informations générales sur l'alerte dans l'onglet (2) *métadonnées,* avant de saisir l'alerte en détail dans les onglets (3) *interprétation des expressions* et (4) *toponymie, etc.*).

L'onglet *métadonnées* permet de renseigner toutes les informations d'ordre général sur une alerte, telles que l'identité du requérant (victime, témoin, *etc.*) ou l'activité pratiquée lors de l'accident. C'est également ici que sont saisies toutes les informations exogènes, comme la date et l'heure de l'appel ou la position réelle de la victime.

L'onglet *interprétation des expressions* se compose, quant à lui, de 15 colonnes (Tableau 5.1),

Colonne	**Contenu**
Identifiant de l'extrait	Permet d'identifier une expression
Identifiant de l'expression	Permet d'identifier une expression au sein d'un extrait en comprenant plusieurs
Extrait	Verbatim de la phrase transcrite
Confiance	Permet au transcripteur de saisir sa confiance en *l'indice de localisation* (uniquement si la saisie est faite par un secouriste)
Timestamp	Début de l'extrait dans le fichier audio source
Locuteur	Permet d'identifier le locuteur (*e.g.* secouriste, requérant, témoin, *etc.*)
Verbe	Verbe utilisé dans *l'indice de localisation*
Modifieur du verbe	Modifieur du verbe (*e.g.* marcher *vite*)
Sujet	Sujet de *l'indice de localisation*
Modifieur du sujet	Modifieur du *sujet*
Relation de localisation	*Relation de localisation* utilisée dans l'extrait
Modifieur de la *relation de localisation*	Modifieur de la *relation de localisation* (*e.g.* *très* loin)
Objet de référence	Nom ou type de *l'objet de référence* (cette colonne peut être multipliée si la *relation de localisation* est bi ou n-aire)
Modifieur de *l'objet de référence*	Modifieur de *l'objet de référence* (*e.g.* « un grand lac ». Cette colonne peut être multipliée si la *relation de localisation* est bi ou n-aire)
Commentaires	Champ permettant au transcripteur de commenter sa saisie ou les indications données par le requérant (erreurs potentielles, fautes de prononciation, *etc.*)

Table 5.1 – Structure de l'onglet « *expressions* » du template de retranscription.

que l'on peut regrouper en trois catégories : (a) *extrait*, (b) *contexte* et (c) *expression.*

La première d'entre elles regroupe les colonnes décrivant l'extrait audio traité, comme les deux colonnes « *identifiant* », la colonne « *extrait* » et la colonne « *timestamp* ». Les colonnes « *identifiant* » permettent de donner une référence unique à chaque élément transcrit. La présence de deux colonnes permet de faire la distinction entre les *extraits,* qui correspondent au découpage rythmique de la conversation (changement de locuteur, nouvelle phrase, *etc.*), et les *expressions,* contenues dans les *extraits,* correspondant au découpage en *indices de localisation.* Par exemple, si la conversation entre le secouriste (S.) et le requérant (R.) est :

S. : « Vous êtes au sommet ? »

R. : « Non, je suis bien en dessous. »

On identifiera deux *extraits :* (a) « Vous êtes au sommet ? » et (b) « Non, je suis bien en dessous », délimités par le changement de locuteur. Si le premier ne contient qu'une seule *expression,* le second en contient deux, la négation de la question, dont la sémantique correspond à *l'expression* « je ne suis pas au sommet » et *l'expression* « je suis bien en dessous ». Ainsi, cet exemple est composé de deux *extraits* et de trois *expressions.* Pour faciliter l'analyse et la vérification des transcriptions, nous avons défini une colonne « *extrait* », permettant de saisir le *verbatim* de l'extrait analysé, et une colonne « *timestamp* » indiquant la position de l'extrait dans le fichier audio correspondant.

La seconde catégorie regroupe les colonnes permettant de décrire le contexte de chaque expression. On y retrouve la colonne « *locuteur* », renseignant sur la personne ayant prononcé l'extrait étudié (*e.g.* secouriste, requérant) et la colonne « *confiance* », permettant au transcripteur (dans le cas où il s'agit d'un secouriste) de juger de la plausibilité de l'information donnée par l'extrait. Si nous distinguons ces deux colonnes des *métadonnées* de l'extrait (*i.e.* le groupe de colonnes précédent) c'est car ces dernières demandent une interprétation de l'extrait, contrairement aux *métadonnées.*

Enfin, la troisième catégorie, qui regroupe la majorité des colonnes, permet l'interprétation et la saisie de chaque expression. On y retrouve les colonnes *verbe, sujet, relation de localisation* et *objet de référence,* correspondant aux éléments du même nom dans la formalisation des *indices de localisation* et les *modifieurs* qui y sont associés. Les colonnes « *objet de référence* » et « *modifieur de l'objet de référence* » ont la particularité de pouvoir être doublées (voir plus si nécessaire) dans le cas où la *relation de localisation* le nécessiterait.

Si l'on reprend le second extrait de l'exemple précédent (*i.e.* « Non, je suis bien en dessous »), deux extraits sont à saisir. Le premier est la négation de la question du secouriste (*i.e.* « Vous êtes au sommet »), que l'on peut interpréter comme *l'indice de localisation* « je ne suis pas au sommet ». Ici, le verbe de l'expression est « être », le sujet est le requérant, la *relation de localisation* est la préposition « à » et l'objet de référence est — implicitement — « le sommet » [2]. La forme négative de la phrase est transcrite avec un *modifieur du verbe* et les autres modifieurs ne sont pas renseignés. Pour la seconde expression (*i.e.* « je suis bien en dessous »), le *sujet* ainsi que son modifieur et *l'objet de référence* et son modifieur sont inchangés, il s'agit toujours du *requérant* qui se situe par rapport au *sommet.* Le *verbe* est toujours « être », mais son modifieur disparait, l'expression n'étant pas une négation. Pour finir, la *relation de localisation* devient « *en dessous* » et son modifieur est « *bien* ».

Enfin, le dernier onglet du template de transcription est destiné à la saisie détaillée des *objets de référence utilisés.* Comme pour l'onglet des *extraits,* chaque ligne correspond à une

2. Le « à le » est contracté en « au » dans l'extrait

expression issue de l'alerte. Par ailleurs, toutes les lignes de ce troisième onglet doivent être saisies, il y a donc une bijection entre les enregistrements de l'onglet « expressions » et ceux de l'onglet « objets de référence ». Le but de cet onglet est de permettre la saisie d'informations complémentaires sur les *objets géographiques* utilisés dans les expressions, comme les *objets de référence* ou le *sujet,* notamment dans le cas où l'expression décrit la position d'un autre objet qu'une personne (*e.g.* « le chalet à côté de la cascade »). En effet, lorsqu'on saisit un *objet géographique* (*e.g. l'objet de référence*) dans l'onglet *expression,* on utilise le terme employé par le locuteur dans l'expression (*e.g.* « La Bérarde », « un sommet », *etc.*) sans modification. Ainsi, les objets définis sont désignés par leur nom (ou tout du moins le nom que le locuteur leur donne) et les objets indéfinis par leur type. L'onglet *toponymie* permet alors de préciser le type de tous les objets géographiques, en vue de leur analyse ultérieure. Si l'on reprend l'exemple précédent (*i.e.* « Non, je suis bien en dessous »), nous ne sommes pas en mesure d'ajouter des informations sur *l'objet de référence* « sommet », son nom étant inconnu.

5.2.1.3 Analyse des retranscriptions

Les deux corpus d'alertes ont été transcrits séparément. Le premier d'entre eux a été transcrit au cours de l'année 2018 par un secouriste du PGHM de Grenoble. Ce premier essai a mis en évidence de nombreuses lacunes dans le processus de retranscription. La version originale du template n'était pas assez documentée et ne contenait pas d'exemples. Par conséquent, le processus de saisie était assez délicat et les résultats étaient très dépendants du transcripteur. Nous avons donc clarifié le template pour faciliter la transcription — aboutissant à la version présentée ci-dessus — et avons corrigé collégialement les transcriptions pour aboutir à une version qui fasse l'objet d'un consensus. Compte tenu des problèmes que nous avions rencontrés lors de la saisie du premier corpus, nous avons adopté une démarche de transcription plus avancée. La trentaine d'alertes à transcrire a été répartie entre trois chercheurs, dont nous-même (Bunel et al. 2019a). Après une première transcription, les fichiers produits ont été amendés et commentés par un second transcripteur, en vue d'aboutir, en collaboration avec le transcripteur initial, à une seconde version. Une fois l'ensemble du second corpus retranscrit, nous avons procédé à une harmonisation collégiale des saisies, de manière à obtenir un ensemble de retranscriptions le plus cohérent possible. Finalement, la retranscription des 52 alertes nous a permis d'identifier 374 expressions différentes, que nous avons ensuite analysées.

L'étude détaillée des *relations de localisation* utilisées dans les *indices* nous a permis de constater que tous les indices ne permettent pas de construire *directement* une *zone de localisation compatible.* Par exemple, *l'indice de localisation :* « Je marche vers le nord » ne peut pas être *spatialisé,* à moins de le combiner avec d'autres *indices* (*e.g.* « Je marche depuis une heure, vers le nord, en étant parti de tel endroit ») ou de l'approximer avec d'autres relations de localisation (*e.g.* « Je suis en direction du nord »). Ces *indices de localisation,* qui dénotent une *configuration spatiale,* décrivent généralement une trajectoire, suivie par le *sujet* et partant de *l'objet de référence* (souvent sous-entendu). Par conséquent, cette distinction recoupe celle qui est généralement faite en linguistique entre les *relations de localisation statiques,* décrivant une position fixe et les *relations de localisation dynamiques,* décrivant un mouvement (Borillo 1998). Comme l'ontologie que nous développons est avant tout destinée à la *spatialisation* des *indices de localisation,* nous avons pris la décision de ne pas y intégrer les *relations de localisation* décrivant une *configuration spatiale,* la *spatialisation* de trajectoires ne faisant pas partie de nos objectifs.

	ORL	ORLA
Objectif	Recense et définit les *relations de localisation* utilisées pour décrire une position dans le contexte de la localisation de personnes en montagne	Définit les *relations de localisation atomiques,* la décomposition des relations définies dans ORL et formalise le processus de *spatialisation* des *relations spatiales atomiques.*
Contenu	Définition de 51 *relations de localisation,* regroupées en 11 classes abstraites.	Définition de 25 *relations de localisation atomiques,* décomposant une partie des 51 *relations de localisation* définies dans ORL.
Modélisation	L'ensemble des concepts sont définis pour être facilement différentiables et proches de la perception humaine des localisations dans l'espace	Les *relations de localisation atomiques* ne sont pas conçues pour être manipulées directement par les utilisateurs. Elles sont généralement plus abstraites que les *relations de localisation* qu'elles décomposent.

TABLE 5.2 – Éléments de comparaison des ontologies ORL et ORLA.

5.2.2 Construction des ontologies

Nous avons choisi de scinder l'ontologie des règles de décomposition en deux ontologies complémentaires, pour faciliter leur manipulation et leur diffusion. La première d'entre elles est *l'ontologie des relations de localisation* (ORL). Son objectif est de constituer un thésaurus des *relations de localisation* utilisées dans le contexte de la description d'une position en montagne. Chacune des notions est définie et une grande partie d'entre elles sont illustrées par des extraits des retranscriptions. La seconde ontologie définie est celle des *relations de localisation atomiques* (ORLA), dont l'objectif est de définir les *relations de localisation atomiques,* les décompositions dont elles résultent et le processus de *spatialisation*[3]. Ces deux composantes, fortement liées, auraient pu être combinées dans une même ontologie. Cependant, alors que la décomposition est fortement liée à notre travail, le thésaurus des relations de localisation peut être exploité pour d'autres travaux au sein du projet Choucas ou à l'extérieur. C'est pourquoi nous avons décidé de séparer les deux ontologies et de ne diffuser que l'ontologie des *relations de localisation.* Le tableau 5.2 résume les caractéristiques de ces deux ontologies.

5.2.2.1 L'ontologie des *relations de localisation*

La construction de l'ontologie des relations de localisation (Figure 5.4) s'est faite en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons défini les concepts à partir des *relations de localisation* utilisées dans les alertes, puis nous avons hiérarchisé ces concepts.

Pour chaque expression, nous avons cherché à définir un concept permettant d'exprimer la sémantique de la *relation de localisation* utilisée. Pour ce faire, nous avons systématiquement cherché à identifier le concept de l'ontologie GUM-Space de BATEMAN et al. (2010), le plus proche de la sémantique de la relation de localisation utilisée par le requérant. À la suite de cette étape, toutes les *relations de localisations* sont associées à un concept tiré de l'ontologie

3. Ce point spécifique sera détaillé dans le chapitre 6.

de Bateman et al. (2010). Cependant, dans la majorité des cas, le concept issu de GUM-Space ne nous a pas donné entière satisfaction, soit parce que le concept retenu ne fonctionnait qu'au prix d'une interprétation très « flexible » de la définition de Bateman et al. (2010), soit parce-que la description donnée par le requérant n'était que grossièrement retranscrite par les concepts de GUM-Space.

On peut prendre pour exemple la *préposition spatiale* « entre » utilisée dans l'extrait suivant :

S. : « Vous êtes entre Grand Veymont et Pas de la Ville ? »

R. : « Je suis entre le Grand Veymont, sous le Grand Veymont et Pas de la Ville, tout à fait. Je suis côté… heu… côté sud. »

L'ontologie GUM-Space ne propose pas de concepts permettant une retranscription satisfaisante de la sémantique de cette *relation spatiale.* On peut faire appel aux concepts gum#`Distribution` ou gum#`Surrounding`, mais le premier ne s'applique qu'au cas où *l'objet de référence* est une collection (*e.g.* « entre les arbres », « parmi la foule »), et le second correspond plus à la *relation de localisation* « entouré de », qui, bien que proche, n'est pas une approximation satisfaisante de la *relation de localisation* utilisée par le requérant.

De la même manière, dans l'extrait :

R. : « On est à 10 minutes du sommet de la Bastille. »

Le requérant décrit sa position à l'aide d'une durée de marche à partir du *sommet de la Bastille :* il s'agit ici d'une *distance-temps quantitative.* Cependant, l'ontologie GUM-Space ne possède qu'un seul concept permettant d'exprimer une distance quantitative, gum#`QuantitativeDistance`. Au vu de la description qui est faite de ce concept dans Bateman et al. (2010), on peut légitimement penser que ce concept a essentiellement été prévu pour conceptualiser uniquement des distances métriques. On pourrait se contenter de cette situation, considérant que ces distances sont équivalentes. Cependant, comme nous l'expliquions dans l'état de l'art (chapitre 3), les distances-temps sont beacoup plus imprécises que les distances métriques et leur *spatialisation* implique dès lors des méthodes plus avancées. Par conséquent, il nous semble nécessaire de développer un nouveau concept, `ADistanceTemps`, plus précis et adapté.

Au final, 51 *relations de localisation* ont été définies dont seules 8 sont des concepts originaux de GUM-Space (Figure 5.4 [4]). Les 43 concepts restants sont soit des précisions de concepts existants (*e.g.* `ADistanceTemps`) soit des concepts totalement nouveaux (*e.g.* `EntreXEtY`).

Une fois que l'ensemble des *relations de localisation* nécessaires à la retranscription des alertes a été défini, nous avons procédé à leur hiérarchisation. Pour ce faire nous avons défini de nouvelles classes, permettant de regrouper les relations de localisation par similarité sémantique. Ces nouvelles classes sont abstraites, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas des *relations de localisation* destinées à être instanciées, elles ne servent qu'à leur regroupement.

Pour définir cette hiérarchie, nous nous sommes appuyé sur différentes propositions précédentes et principalement de l'ontologie GUM-Space (Bateman et al. 2010).

Au premier niveau de l'ontologie, on trouve trois classes principales, orl#`RelationSpatialeDeProximite`, orl#`RelationSpatialeFonctionelle` et orl#`RelationSpatialePositionRelative`, regroupant l'ensemble des *relations de localisation* et deux *relations de localisation* isolées et complémentaires, orl#`CibleVoitSite` et orl#`SiteVoitCible` qui n'entrent dans aucune des ces classes. Les trois classes principales sont similaires aux trois classes du premier

4. Certaines relations de localisation apparaissent plusieurs fois dans la Figure 5.4 du fait de la représentation sous forme d'arbre, même lorsqu'un concept a plusieurs parents.

niveau hiérarchique de l'ontologie GUM-Space. La classe orl#`RelationSpatialeDeProximite`, qui correspond à la classe gum#`SpatialDistanceModality` de GUM-Space, regroupe les *relations de localisation* dont la sémantique traduit une proximité spatiale. On y retrouve, par exemple, la relation orl#`PresDe` ou la relation orl#`ADistanceTemps`, qui modélise une distance exprimée en temps de déplacement.

La seconde classe, orl#`RelationSpatialeFonctionelle` est le pendant de la classe gum#`FunctionalSpatialModality` de l'ontologie GUM-Space. Elle regroupe les *relations spatiales* qui décrivent une situation où le sujet et *l'objet de référence* ont un lien, non seulement spatial, mais aussi fonctionnel. C'est, par exemple, le cas de la *relation de localisation* orl#`Proximal` qui implique une proximité entre le *sujet* et *l'objet de référence*, mais qui, contrairement à la relation orl#`PresDe`, peut être fonctionnelle et pas seulement spatiale. C'est également le cas de la *relation de localisation* orl#`SituéSurItineraireOuReseauSupport`, la seule autre *relation fonctionnelle* que nous avons définie.

Enfin, la classe orl#`RelationSpatialePositionRelative`, similaire à la classe gum#`RelativeSpatialModality`, regroupe toutes les *relations* qui décrivent la position du *sujet* en fonction de celle du *site* mais sans notion de distance. C'est cette classe qui regroupe le plus de *relations de localisation.* On y retrouve, par exemple, les relations traduisant un contact [5] (*e.g.* orl#`DansPlanimetrique`, orl#`ALaFrontièreDe`), les relations de direction [6] (*e.g.* orl#`AuNordDe`, orl#`DansLaDirectionDe`) ou les relations verticales [7] (*e.g.* orl#`SousProcheDe`, orl#`AuDessusDe`). Au total, l'ontologie des *relations de localisation* contient 11 classes servant à la définition de la hiérarchie. Ces classes, qui ne correspondent à aucune *relation de localisation,* ne sont ni décomposables, ni spatialisables. C'est pourquoi nous les qualifions de *classes abstraites,* et nous les signalons comme telles dans l'ontologie, pour éviter qu'elles soient manipulées comme des *relations de localisation.*

On peut remarquer que certaines des *relations de localisation* que nous avons présentées appartiennent à plusieurs *classes abstraites.* C'est par exemple le cas de la *relation* orl#`Proximal`, que nous avons décrite comme appartenant à la *classe abstraite* orl#`RelationSpatialeFonctionelle`, mais qui traduit également une notion de proximité spatiale. La *relation* orl#`Proximal` pourrait donc également appartenir à la *classe abstraite* orl#`RelationSpatialeDeProximite`. De fait, les regroupements que nous avons définis n'ont pas été conçus pour être mutuellement disjoints [8]. Ainsi une même *relation* peut, comme orl#`Proximal`, appartenir à plusieurs classes. Ce découpage ne pose cependant pas de problèmes particuliers, quel que soit le cas d'utilisation de l'ontologie. Nous pensons même qu'il peut être utile pour certaines applications, comme la recherche de *relations de localisation* par les secouristes utilisant l'interface.

Les concepts définis dans ORL étant fortement inspirés, voire repris, de l'ontologie GUM-Space, nous avons complété l'ontologie en liant, autant que possible pour chaque concept, le concept équivalent (ou similaire) de l'ontologie GUM-Space. Plus spécifiquement, deux types de liens sont définis : la relation *seeAlso,* utilisée 24 fois et la relation *equivalentClass,* utilisée 8 fois. Cette dernière traduit une équivalence parfaite entre concepts, alors que la relation *seeAlso* est avant tout informative et traduit une certaine proximité sémantique entre deux concepts sans qu'ils soient équivalents ou même similaires. Ainsi, seules 8 des 62 *relations de localisation* définies dans ORL sont identiques à celles définies par Bateman et al. (2010), les

5. Correspondant à la classe orl#`RelationSpatialeDeContact`.
6. Correspondant à la classe orl#`RelationSpatialeDeDirection`.
7. Correspondant à la classe orl#`RelationSpatialeDeVerticale`.
8. C'est également le cas de la hiérarchie proposée dans GUM-Space (Bateman et al. 2010).

autres concepts sont définis de manière significativement différente.

5.2.2.2 L'ontologie des *relations de localisation atomiques*

Le processus de construction de *l'ontologie des relations de localisation atomiques* (ORLA) est assez différent de celui de *l'ontologie des relations de localisation.* Là où ORL a été construite d'un trait, à partir d'un ensemble de cas réels, *l'ontologie des relations de localisation atomiques* a été développée progressivement, au fil du traitement de nouvelles alertes. Dans sa version actuelle, ORLA ne propose pas une décomposition pour toutes les *relations de localisation* définies précédemment. Seules les relations de localisation les plus fréquemment utilisées dans les alertes ont été modélisées. Notre démarche de définition d'ORLA a consisté à définir des *relations de localisation atomiques* et des décompositions au fil de l'eau, en fonction des *relations de localisation* identifiées dans les alertes traitées.

Pour modéliser les *relations topologiques,* nous utilisons quatre relations de localisation atomiques : `orla#InterieurDe`, `orla#ALaFrontiereDe`, `orla#ExterieurDe` et `orla#Contact`. Deux de ces *relations atomiques* (`orla#InterieurDe` et `orla#ALaFrontiereDe`) peuvent être utilisées directement. Elles correspondent alors aux *relations de localisation* `orl#DansPlanimetrique` et `orl#ALaFrontiereDe`. Les deux autres *relations atomiques* ne sont utilisées que dans des compostions. La *relation atomique* `orla#ExterieurDe` est par exemple utilisée pour définir les *relations* de cardinalité `orl#AEstDeExterne` ou `orl#AuNordDeExterne`. De par l'importance que revêtent les relations topologiques (chapitre 3) dans le référencement spatial indirect, on retrouve ces *relations de localisation atomiques* dans de nombreuses *relations de localisation.*

Les *relations de localisation atomiques* formalisant une distance sont également très utilisées. Seules deux de ces relations sont définies dans ORLA : `orla#DistanceQuantitativePlanimetrique`, équivalente à son homonyme dans ORL et `orla#ADistanceTemps`, qui elle n'est utilisé dans aucune combinaison. La relation `orla#DistanceQuantitativePlanimetrique`, est utilisée dans de nombreuses *relations de localisation,* comme `orl#Proximal`, `orl#AuxAlentoursDe` ou `orl#PresDe`.

Pour représenter les *relations de localisation* orientaionelles seule une *relation de localisation atomique* a été définie : `orla#DansLaDirectionDe`. Cette *relation atomique* sert de base à toutes les relations de cardinalité (*i.e.* `orl#AuNordDe`, `orl#ALOuestDe`, *etc.*) et leurs dérivées composées (*e.g.* `orl#AuSudDeExterne`), mais est également utilisée directement. Elle correspond alors à la *relation* homonyme définie dans *l'ontologie des relations de localisation.*

La notion de verticalité est exprimée à l'aide de trois principales *relations de localisation atomiques* complémentaires : `orla#AltitudeEquivalente`, `orla#AltitudeStrictementSuperieure` et `orla#AltitudeStrictementInferieure`. Chacune d'entre elles exprime une relation strictement verticale entre le *sujet* et *l'objet de référence.* Ces trois *relations atomiques* sont à la base de toutes les *relations spatiales* où est présente une notion de verticalité. Elles peuvent être utilisées telles quelles, pour désigner des positions relatives sur l'axe vertical ou être combinées avec d'autres *relations atomiques.* Dans le cas où ces relations sont utilisées seules, elles sont équivalentes aux *relations de localisation* `orl#ALaMemeAltitudeQue`, `orl#AuDessusAltitude` et `orl#SousAltitude`, qui n'imposent aucune contrainte sur la distance entre *l'objet de référence* et *le sujet* (*e.g.* « le sommet de la tour Eiffel est moins haut que celui de l'Everest »). Si on les combine avec la *relation* `orla#DistanceQuantitative` on peut construire les relations de localisation `orla#SousProcheDe` ou `orla#AuDessusProcheDe` qui sont très utilisées dans les alertes retranscrites. Enfin, ces relations peuvent également être combinées avec des

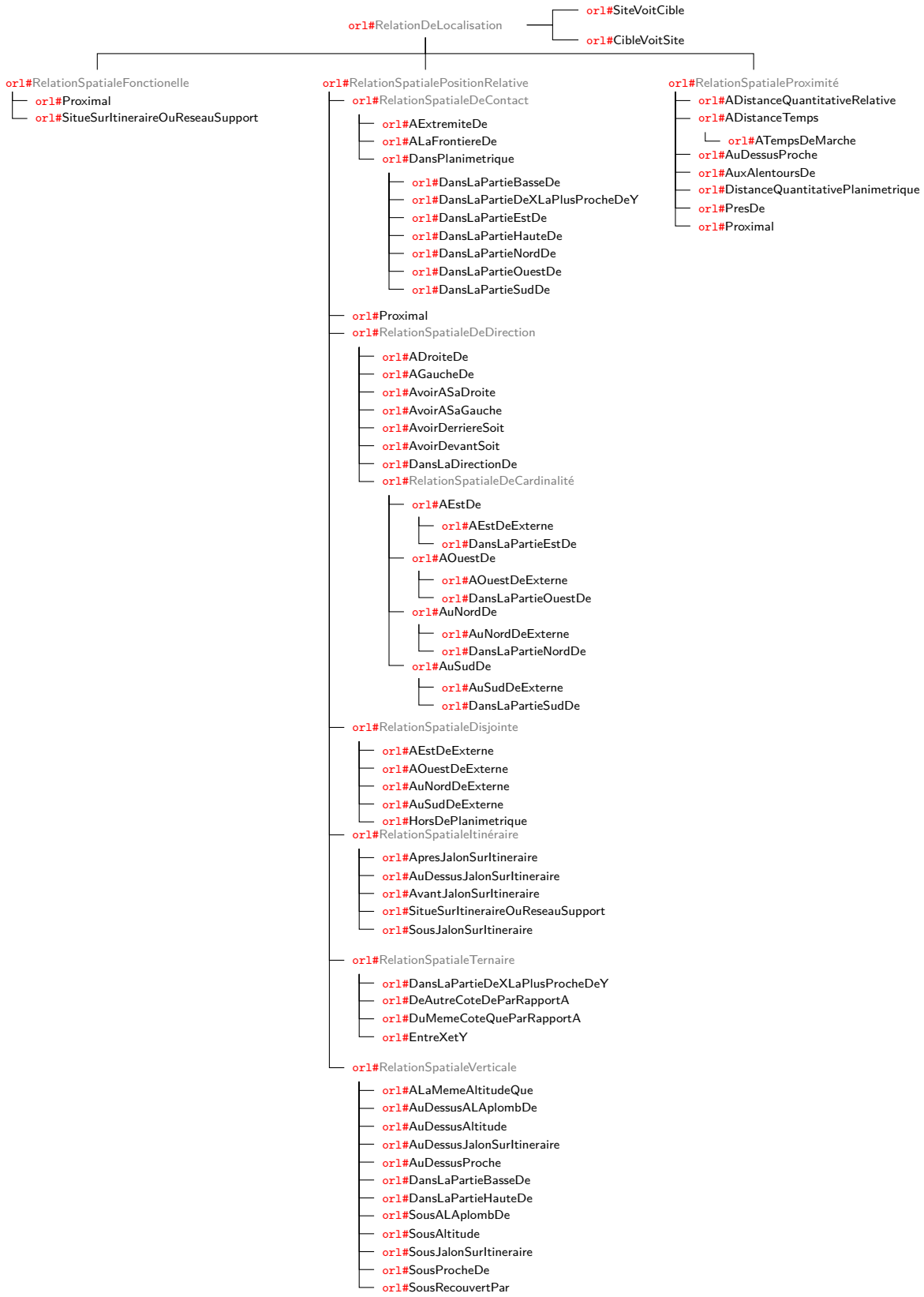


FIGURE 5.4 – Ontologie des *relations de localisation* ORL

	Équivalente	Supérieure	Inférieure
Moyenne	orla#**AltitudeÉquivalente**	orla#AltitudeSupérieure	orla#AltitudeInférieure
Maximum	orla#AltitudeÉquivalenteMaximum	orla#**AltitudeStrictementSupérieure**	
Minimum	orla#AltitudeÉquivalenteMinnimum		orla#**AltitudeStrictementInférieure**
Voisin	orla#AltitudeÉquivalentePlusProcheVoisin	orla#AltitudeSupérieurePlusProcheVoisin	orla#AltitudeInférieurePlusProcheVoisin

TABLE 5.3 – *Relations de localisation atomiques* de verticalité et leurs variantes.

relations atomiques topologiques, comme orla#InterieurDe ce qui permet la définition de *relations* comme orl#DansLaPartieBassede ou orl#DansLaPartieHautede.

Ces trois *relations atomiques* ont la particularité d'être fortement dépendantes de la valeur d'altitude utilisée comme point de référence. C'est pourquoi nous avons défini, pour chacune de ces trois *relations de localisation atomiques* des variantes, utilisant une valeur d'altitude différente (Tableau 5.3). Par exemple, les *relations de localisation atomiques* orla#AltitudeStrictementSuperieure et orla#AltitudeStrictementInferieure se basent, respectivement, sur les altitudes maximale et minimale de *l'objet de référence.* Ce parti pris n'est cependant pas compatible avec certaines *relations de localisation.* Par exemple, les *relations* orl#DansLaPartieBassede ou orl#DansLaPartieHautede se référent à l'altitude moyenne de l'objet et non à son maximum ou son minimum. Ainsi, les trois *relations de localisation atomiques* de verticalité principales sont complétées par des variantes basées sur l'altitude moyenne, sur l'altitude du plus proche voisin et sur les altitudes maximales ou minimales (Tableau 5.3), ce qui permet de disposer d'une expressivité maximale.

La dernière catégorie des *relations de localisation atomiques* concerne les *relations* de visibilité. Cette catégorie présente la particularité de définir des *relations de localisation atomiques* qui ne sont utilisables que telles quelles (*i.e.* qu'elles ne sont composées à aucune autre *relation atomique*). Les deux relations de visibilité définies dans ORL (*i.e.* orl#CibleVoitSite et orl#SiteVoitCible) sont donc peu liées aux autres *relations,* d'une part car elles ne sont pas décomposables et d'autre part, car les *relations atomiques* qui y correspondent ne sont utilisées dans aucune autre décomposition.

Chacune des *relations de localisation atomique* définie dans ORLA est associée à un ensemble de règles supplémentaires, permettant sa *spatialisation.* Ces différentes règles seront explicitées lors de la présentation de la phase de spatialisation (chapitre 7).

Conclusion

La phase de décomposition des *indices de localisation* se compose de trois étapes (décomposition de l'ensemble des indices de localisation, décomposition des objets de référence non nommées et décomposition des relations de localisation), dont seule la dernière fait l'objet d'une automatisation. En effet, là où les indices de localisation et les objets de référence non

nommés sont saisis de manière décomposée et où la décomposition n'est donc qu'une formalité, les *relations de localisation* sont sélectionnées sous une forme composée, conçue pour être manipulable par l'utilisateur. L'application de la décomposition des *relations de localisation* nécessite donc de disposer d'une base de règles, formalisant le processus de décomposition à suivre pour chaque *relation de localisation* spatialisable.

Nous avons choisi de construire cette base de règles à l'aide de deux ontologies *ad hoc* et fortement liées : ORL et ORLA. La première est une ontologie des *relations de localisations* qui propose de recenser et de définir toutes les *relations de localisation* pertinentes dans notre contexte. L'ontologie des *relations de localisation atomiques* définit quant à elle l'ensemble des *relations de localisations atomiques* et la manière dont elles se composent pour créer les relations de localisation définies dans ORL. Le peuplement de ces ontologies s'est fait en deux temps. Tout d'abord, nous avons identifié et défini toutes les *relations de localisations* pertinentes dans notre contexte. Pour ce faire, nous avons retranscrit et analysé un grand nombre d'enregistrements d'alertes, dans le but d'identifier les *relations de localisation* utilisées par les requérants pour décrire leur position. Nous avons ensuite défini les *relations de localisation* permettant de modéliser ces alertes. Les *relations de localisation atomiques* ont, quant à elles, été définies au fil de l'eau, en fonction des relations de localisation utilisées dans les alertes traitées.

Chapitre 6

La modélisation des *zones de localisation*

Introduction 145
6.1 Critères de choix de la modélisation 146
6.1.1 Critères portant sur la phase de *spatialisation* 146
6.1.2 Critères portant sur la phase de *fusion* 147
6.2 Choix du modèle théorique 148
6.3 Choix de l'implémentation 149
6.3.1 Définition d'un exemple comparatif 150
6.3.2 Implémentation raster 154
6.3.3 Implémentation par *Alpha-cuts* 156
6.3.4 Comparaison et choix de l'implémentation 157
Conclusion 162

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'approche retenue pour modéliser les *zones de localisation compatibles* (*i.e.* qui vérifient un indice de localisation donné, éventuellement après décomposition) et *probable* (qui vérifie tous les indices d'une alerte donnée). Cette question est centrale dans notre travail de recherche, car nous souhaitons prendre en compte *l'imprécision* des *relations de localisation* et des *zones de localisation* en résultant, ce qu'aucune modélisation courante des objets géographiques ne permet.

Il existe cependant [1] de nombreux modèles alternatifs, fondés sur diverses théories et implémentés de différentes manières, permettant de modéliser *cette imprécision.* Le choix d'une *modélisation* des objets spatiaux *imprécis* nécessite donc de choisir un modèle théorique et une de ses implémentations. Pour ce faire, nous allons identifier les différentes caractéristiques que nous souhaitons voir validées par notre *modélisation* et permettant d'appliquer tous les principes méthodologiques précédemment définis. Nous sélectionnerons ensuite un *modèle théorique* et confronterons ses implémentations afin d'identifier la modélisation la plus adaptée à notre cas d'application.

La *modélisation* ici identifiée ne se destine qu'à représenter les *zones de localisation compatibles* et *probable.* Notre objectif n'est pas de représenter *l'imprécision* des *objets de référence* utilisés en entrée de notre processus de *spatialisation.* Cette approche, notamment utilisée

1. Voir l'état de l'art (chapitre 3).

par Bloch (1996), n'a pas été retenue pour notre travail, bien qu'elle en soit une extension possible.

Nous commencerons donc par lister les différents critères de sélection que nous avons retenus (6.1), puis nous sélectionnerons un modèle théorique (6.2). Enfin, nous confronterons les implémentations du modèle théoriques et sélectionnerons l'une d'entre elles (6.3).

6.1 Critères de choix de la modélisation

Les *zones de localisation* sont des objets qui sont construits lors de la phase de *spatialisation* et qui sont traitées jusqu'à la fin de la phase de *fusion.* Chacune de ces deux phases a des contraintes spécifiques, nécessitant des caractéristiques de *modélisation* des *zones de localisation* spécifiques. Nous allons à présent présenter ces différentes caractéristiques, en les regroupant par phase.

6.1.1 Critères portant sur la phase de *spatialisation*

Chacune des nombreuses *relations de localisation* utilisées par les requérants pour décrire leur position a une sémantique qui lui est propre, ce qui conduit donc à des *zones de localisation* très différentes. La *modélisation* utilisée doit donc permettre une représentation optimale de situations potentiellement très différentes.

Un premier point à considérer est celui de *l'imprécision* des *zones de localisation.* Si nous avons détaillé cette notion et justifié sa prise en compte lors de la *phase de spatialisation* (chapitre 4), nous n'avons pas présenté ses possibles variations. Or, de la même manière que la forme d'une *zone de localisation* varie d'une *relation de localisation* à l'autre, leur *imprécision* peut être plus ou moins importante. Par exemple, la *relation de localisation* « proche de » [2], qui décrit une relation de proximité géographique entre *le sujet* et *l'objet de référence,* est fortement *imprécise* [3]. Ainsi, les limites de la *zone de localisation* lui correspondant sont continues, sans réelle rupture entre son intérieur et son extérieur. À l'inverse, la *zone de localisation* construite à partir de la *relation de localisation* « en dessous de » [4] a des limites plus *précises.* Pour l'illustrer, on peut imaginer une situation où l'altitude du *sujet,* alors clairement situé « en dessous » de *l'objet de référence*, augmente peu à peu, jusqu'à dépasser celle de *l'objet de référence,* passant alors de la *zone de localisation* à son extérieur. Cependant, contrairement à la *zone de localisation* construite à partir de la *relation de localisation* « proche », cette transition est, sinon immédiate [5], tout du moins assez brusque. Ainsi, s'il est abusif de considérer que l'appartenance à cette *zone de localisation* est bivalente, on peut remarquer que la longue transition entre l'intérieur et l'extérieur de la *zone de localisation* construite d'après la *relation de localisation* « proche de » est ici fortement réduite. Entre ces deux cas archétypaux on trouve une multitude d'autres situations, où les limites de la *zone de localisation* sont plus ou moins marquées, c'est-à-dire plus ou moins *imprécises.* Il est donc nécessaire que la *modélisation* des *zones de localisation* retenue propose une prise en compte satisfaisante de ces différentes situations et soit à même de modéliser des *zones de localisation* aux limites presque *nettes* ou fortement *imprécises.*

2. Formalisée dans l'ontologie des r*elations de localisation* par le concept `orl#PrésDe`.
3. Comme nous l'avons illustré avec l'exemple du *paradoxe sorite* dans le second chapitre (2.2.2).
4. Formalisée avec le concept `orl#SousAltitude`.
5. Ce qui impliquerait que la *relation de localisation* soit d'une précision absolue, ce qui, comme nous l'expliquions dans les chapitres 2 et 3, n'est pas possible.

Un problème similaire se pose lorsque l'on traite, non plus de la rapidité de la transition entre l'intérieur et l'extérieur d'une *zone de localisation*, mais de sa forme. Une *relation de localisation* comme « proche de » voit, toutes choses égales par ailleurs, sa validité diminuer linéairement avec l'éloignement à *l'objet de référence.* On ne s'éloigne pas plus (ou moins) vite à 5 qu'à 50 mètres. Cette observation est également vraie pour la *relation de localisation* « en dessous de ». La zone *d'imprécision* est certes plus réduite, mais la relation entre la différence d'altitude et l'appartenance à la *zone de localisation* est linéaire, il n'y a ni cassures, ni variations. Cependant, la linéarité de cette relation n'implique qu'il en soit de même pour les frontières. En effet, contrairement à la *relation de localisation* « proche de », qui ne dépend que d'une distance planaire dans un espace que l'on considère généralement comme isotrope, la *zone de localisation* issue de la *spatialisation* de la *relation* « en dessous de » dépend des variations du relief qui sont tout sauf linéaires. On pourrait augurer que cette considération n'a un intérêt que conceptuel et que l'hypothèse d'une transition linéaire entre l'intérieur et l'extérieur des *zones de localisation* est satisfaisante. Toutefois, c'est oublier que l'appartenance à la *zone de localisation* n'a pas à être strictement décroissante à mesure que l'on s'en éloigne. Ainsi, une *zone de localisation* construite à partir de la *relation de localisation* « en dessous de » pourrait posséder une *zone de transition* avec des variations importantes, émaillée de parties presque situées en dehors (ou dans) de la *zone de localisation* (*i.e.* dont l'altitude est proche, voire légèrement supérieure, à celle de *l'objet de référence*). Si ces variations sont suffisamment importantes pour que cette région soit clairement située à l'extérieur (ou à l'intérieur) de la *zone de localisation,* le résultat sera alors fragmenté, mais sans que cela ne pose de problèmes particuliers. Par contre, si ces variations restent suffisamment faibles pour rester dans la *zone de transition,* elles ne seront pas prises en compte par une *modélisation* simplifiant à outrance cette zone de transition. Ainsi, en fonction de la morphologie de la région étudiée, les *zones de localisation* pourront être fragmentées ou compactes et avoir des zones frontières plus ou moins larges (en fonction de la pente) et plus ou moins linéaires (en fonction de la forme du relief). Cet exemple montre donc que nous ne pouvons nous contenter d'une *modélisation* ne permettant que la manipulation de *zones de localisations* dont *l'imprécision* ne peut être modélisée que par des variations linéaires, de nombreuses autres configurations étant possibles.

6.1.2 Critères portant sur la phase de *fusion*

La méthodologie de construction des *zones de localisation* présentée dans le chapitre 4 et plus précisément la *phase de fusion,* impose de combiner des *zones de localisation* par des opérations d'union et d'intersection. La *modélisation* retenue doit donc permettre de réaliser ces opérations, mais également garantir leur commutativité. En effet, l'utilisation d'un opérateur d'union ou d'intersection non commutatif aurait pour conséquence de modifier le résultat de la *phase de fusion* en fonction de l'ordre de traitement des *zones de localisation compatibles.* Par exemple, si l'on souhaite construire la *zone de localisation probable* (ZLP) correspondant à l'ensemble *d'indices de localisation* : « Je suis à côté d'une maison et dans une forêt », il sera nécessaire d'identifier les positions situées dans les *zones de localisation compatibles* correspondant au premier (ZLC_1 : « Je suis à côté d'une maison. ») et au second (ZLC_2 : « Je suis dans une forêt. ») *indice,* à l'aide d'un opérateur d'intersection. Si cet opérateur n'est pas commutatif, alors l'intersection de ZLC_1 avec ZLC_2 pourra donner un résultat différent de l'intersection de ZLC_2 avec ZLC_1. Un tel comportement est incompatible avec plusieurs des principes que nous avons définis, notamment l'autonomie de la *spatialisation* ou le *principe de décomposition,* qui se fondent sur l'hypothèse — implicite — d'une commutativité des

opérateurs utilisés durant la phase de fusion.

De plus, il est nécessaire que les *zones de localisation* produites au cours de la *phase de fusion* restent facilement interprétables. On pourrait en effet imaginer une approche tendant à fragmenter à outrance les résultats, ce qui conduirait à une zone difficilement interprétable visuellement et contrevenant donc au *principe d'intégration.*

6.2 Choix du modèle théorique

Tous les modèles théoriques que nous avons présentés dans l'état de l'art de cette thèse ne sont pas nécessairement adaptés aux exigences de modélisation que nous avons formulé.

Ainsi, les modèles « exacts »[6] ou basés sur la *théorie des ensembles approximatifs* (Pawlak 1982), imposent une modélisation discrète de *l'imprécision* spatiale. Si cette approche a pour avantage sa grande simplicité, elle ne remplit pas toutes les conditions que nous jugeons nécessaires. Tout d'abord, bien que ces modèles permettent de modéliser toute forme de *zone de localisation*[7], il leur est impossible de rendre compte de la variation de *l'imprécision* au sein de la zone frontière, cette dernière n'étant définie que par ses bornes supérieure et inférieure. On peut illustrer ce problème par la Figure 6.1, où deux frontières imprécises, très différentes, sont représentées. Dans les deux situations, la zone *imprécise* débute et se termine au même endroit. Dans une telle situation, ces deux frontières seraient « lissées » par l'utilisation d'un modèle « exact ». Il serait pourtant intéressant de pouvoir prendre en compte ces différences, d'autant plus que la zone *imprécise* est étendue.

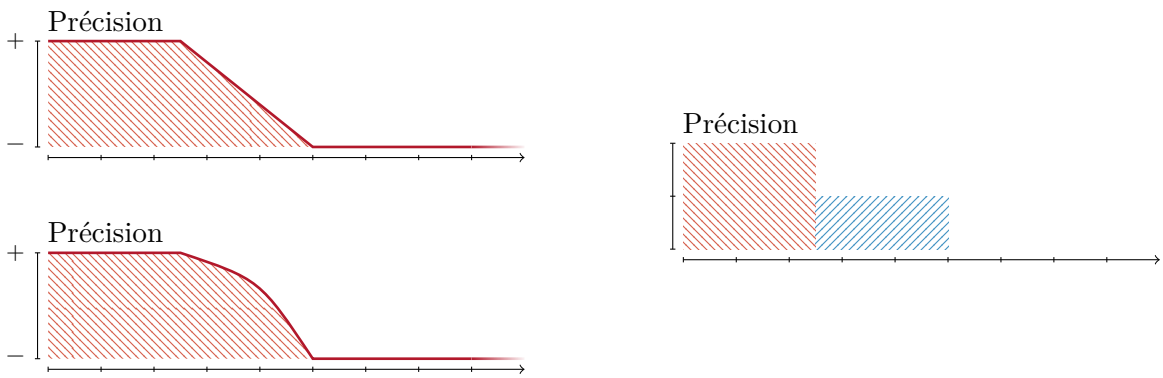


Figure 6.1 – Illustration du passage de différents types de frontières *imprécises* (à gauche) à une modélisation « exacte » (à droite). La discrétisation inhérente à la représentation de frontières imprécises par un modèle exact lisse les variations et abouti au même résultat, malgré un comportement initial différent.

De plus, si les *zones de localisation* construites par la *spatialisation* d'une *relation de localisation* seraient relativement simples[8] et donc faciles à interpréter, elles se complexifieraient rapidement au fil des unions et des intersections. En effet, contrairement aux intersections

6. Comme les modèles *egg-yolk* (Cohn et al. 1996), *min-max* (Clementini et al. 1996), *etc.*

7. À l'exception de zones *nettes,* qui ne sont modélisables qu'avec le modèle de Bejaoui et al. (2009). Cette caractéristique n'est cependant pas limitante dans notre cas, aucune *relation de localisation* ne pouvant définir une zone précise.

8. Elles ne sont constituées que de deux polygones marquant les limites de la zone frontière (cf. chapitre 3).

et unions d'objets « classiques », il est ici nécessaire de manipuler, pour chaque objet, deux géométries, la frontière supérieure et la frontière inférieure. Ainsi, si les *zones de localisation compatibles* modélisées avec un modèle « exact » pourraient être faciles à interpréter, il n'en sera pas de même avec la *zone de localisation probable,* issue de la fusion de toutes ces zones. Par conséquent, les modèles « exacts » ou basés sur la *théorie des ensembles approximatifs* n'ont pas les caractéristiques attendues et ne permettent donc pas de modéliser les *zones de localisation compatibles* et *probables* comme nous le souhaitons.

En permettant de définir, pour chaque position, un *degré d'appartenance* compris entre 1 (appartenance totale à la *zone de localisation*) et 0 (non-appartenance), la *théorie des sous-ensembles flous* permet de contourner le premier problème posé par l'utilisation de *modèles exacts.* Cette approche permet, en effet, de distinguer des zones *imprécises* qui auraient été considérées comme équivalentes dans un *modèle exact* (Figure 6.1). De plus, les opérations d'union et d'intersection des *zones de localisation compatibles* nécessaires à la mise en place de notre méthodologie peuvent être facilement effectuées à l'aide des opérateurs *t-norme* et *t-conorme* (chapitre 3) qui prennent et renvoient un *degré d'appartenance.* Ainsi, la sémantique des sous-ensembles flous n'est pas altérée par les unions et les intersections, ce qui garantit leur interprétabilité.

Les *sous-ensembles flous* offrent donc un cadre théorique permettant de répondre à tous les critères de modélisation que nous avons définis. De plus, cette méthode a pour avantage d'avoir été régulièrement utilisée dans la littérature (cf. chapitre 3), ce qui est un atout supplémentaire. Ce modèle apparaît comme la solution la plus pertinente pour modéliser des *zones de localisation* et plus généralement des *objets géographiques imprécis.* Cependant, de nombreuses implémentations de ce modèle théorique ont été proposées (cf. chapitre 3). Il est donc nécessaire de se pencher sur ces différentes solutions afin d'identifier celle qui est la plus pertinente pour notre cas d'utilisation.

6.3 Choix de l'implémentation

Parmi les nombreuses implémentations des *sous-ensembles flous spatialisés* présentées jusqu'ici (cf. 3), on retrouve aussi bien des approches vectorielles (Dilo et al. 2007 ; Kanjilal et al. 2010 ; Zoghlami et al. 2016) ou raster (Bloch 1996), que des approches fondées sur la sélection d'objets préexistants (Ďuračiová et al. 2017). Toutes ont des avantages et des inconvénients qu'il est nécessaire d'étudier, d'autant que ses solutions ne conservent pas nécessairement toutes les qualités du modèle théorique. Par exemple, les approches vectorielles proposées par Kanjilal et al. (2010) et Zoghlami et al. (2016) se basent sur la discrétisation vectorielle d'un sous-ensemble flou. Ces implémentations ont donc une précision de représentation qui dépend du nombre de régions utilisées pour discrétiser le *sous-ensemble flou.* Si elles sont au nombre de deux, ces implémentations se comportent comme les modèles « exacts » et ne sont pas plus utilisables que ces derniers. L'augmentation du nombre de vecteurs permet de régler ce problème et de représenter tout type de *zones de localisation.*

Chacune de ces deux implémentations permet la construction de *zones de localisation compatibles* à partir de *relations de localisation* non linéaires. En effet, bien qu'elles imposent toutes deux un échantillonnage des sous-ensembles flous, elles permettent de rendre des variations non linéaires. De la même manière, ces deux approches permettent de construire des *zones de localisation* dont les limites peuvent être *imprécises* ou assez précises. Nous proposons de confronter les deux implémentations qui nous semblent être les plus prometteuses : l'utilisation

d'alpha-cuts vectorielles et l'utilisation de rasters.

6.3.1 Définition d'un exemple comparatif

Les implémentations de la *théorie des sous-ensembles flous* à l'aide d'une approche par *alpha-cuts* ou par raster nous semblent toutes les deux pertinentes pour notre cas d'utilisation. Nous proposons donc de les comparer en les utilisant pour spatialiser un même exemple (Bunel et al. 2019b). Pour ce faire, nous allons utiliser l'un des *indices de localisation* de l'alerte « *fil rouge* » (sous-sous-section 1.1.2.3) : « La victime est située sous une ligne électrique 3 brins ». Cet *indice* présente le double avantage d'être simple à modéliser — et donc à comparer —, tout en utilisant une *relation de localisation* décomposable, ce qui permet de tester également les opérations de fusion inter *zones de localisation.*

Pour faciliter la comparaison de ces deux implémentations, nous nous sommes focalisé sur une petite partie de la zone du *fil rouge* (Figure 1.3), ce qui nous permet de ne travailler qu'avec un seul *objet de référence* candidat (Figure 6.2). Ainsi, pour cet exemple, nous ne nous focalisons que sur une partie de la méthodologie présentée dans le chapitre 4. En effet, la présence d'un seul *indice de localisation* à *spatialiser* ne nécessite pas de *décomposer l'ensemble des indices de localisation* puis de fusionner les ZLC correspondantes [9]. De même, comme nous ne travaillons que sur un *objet de référence,* il n'est pas nécessaire de procéder à la *décomposition* d'un *objet de référence* non nommé puis à la *fusion* des ZLC issues de leur spatialisation [10]. L'absence de ces quatre étapes ne pose pas de problèmes pour la comparaison des implémentations, d'une part car le choix de la *modélisation* des *zones de localisation* n'a pas impact sur la *phase de décomposition* (aucun *objet géographique* n'étant encore construit), de l'autre, car toutes les étapes de la *phase de fusion* emploient les mêmes outils théoriques [11], ce qui rend leur comportement similaire. Il n'est donc pas nécessaire de tester chaque étape de la *phase de fusion* pour estimer l'adéquation d'une implémentation.

La *relation de localisation* la plus adaptée à la formalisation de *l'indice de localisation* « la victime est située sous une ligne électrique trois brins », est donc `orl#SousProcheDe`, qui traduit une relation sur l'axe vertical (l'altitude du *sujet* est plus basse que celle de *l'objet de référence*), contrainte par une distance planimétrique (Appendice B). Cette *relation* se décompose en deux *relations de localisation atomiques* : `orla#AltitudeStrictementInferieure` et `orla#PresDe`, traduisant respectivement la notion de position sur l'axe vertical et la contrainte posée sur la distance planimétrique. Conformément au *principe de décomposition* et à notre méthodologie (Chapitres 2 et 4), la *zone de localisation compatible* correspondant à la *relation de localisation* `orl#SousProcheDe` peut être créée en intersectant les deux *zones de localisation compatibles* résultant de la *spatialisation* indépendante de ces *relations de localisation atomiques.*

La construction de ces deux *zones de localisation compatibles* nécessite de définir des *fonctions d'appartenance* (f_A) qui associent, à chaque élément de l'ensemble traité, un degré — compris entre 0 et 1 — définissant l'appartenance de l'élément au *sous-ensemble flou* (Section 3.1.2.1). Dans notre contexte, où les *sous-ensembles flous* représentent des *objets géographiques* et chaque

9. Ce qui correspond, respectivement à la première étape de la *phase de décomposition* et à la dernière étape de la *phase de fusion* (Figure 4.6).

10. Ce qui correspond, respectivement aux secondes étapes des *phases de décomposition* et de *fusion* (Figure 4.6).

11. C'est-à-dire des unions et des intersections ensemblistes, faisant appel aux *t-normes* et *t-conormes* de la *théorie des sous-ensembles flous.*

Ligne électrique utilisée comme *objet de référence*

500 m

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.2 – Zone utilisée pour la comparaison des implémentations.

élément une position, ces fonctions définissent l'appartenance de chacune d'entre elles à la *zone de localisation compatible* construite. La définition des *fonctions d'appartenance* est donc une étape extrêmement importante, puisqu'en définissant les règles de construction des *zones de localisation* elle fixe la sémantique des *relations de localisation atomiques.* Leur définition se fait en deux étapes : tout d'abord il faut identifier une *métrique,* c'est-à-dire une valeur quantitative ou qualitative, calculable en chaque position de la *zone initiale de recherche* et qui peut servir de mesure à la sémantique de la *relation de localisation atomique* (*e.g.* une distance, un angle). Puis on définit la *fonction d'appartenance,* transformant les valeurs de la *métrique* en un *degré d'appartenance.*

Dans notre exemple, les *métriques* à utiliser sont assez instinctives et simples à calculer. Par exemple, la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe` traduit le fait que la distance planimétrique entre le *sujet* et *l'objet de référence* est faible. La métrique adaptée est donc la distance euclidienne entre chaque position et le point le plus proche de *l'objet de référence* (Figure 6.3). La *relation de localisation atomique* `orla#AltitudeStrictementInferieure` traduit, quant à elle, un positionnement relatif sur l'axe vertical. La *métrique* la plus adaptée est donc la différence entre l'altitude de chaque position et l'altitude du point le plus proche de *l'objet de référence* (Figure 6.4).

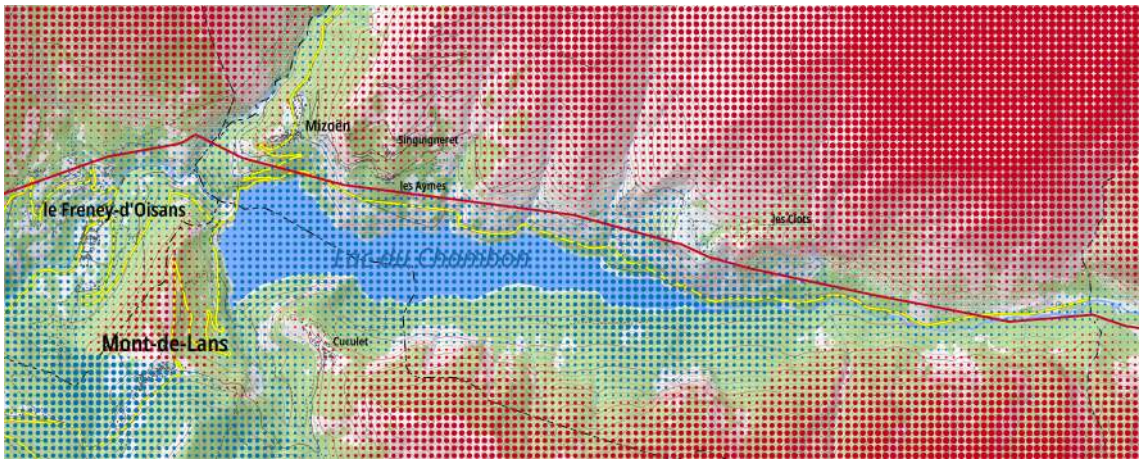
La transformation des valeurs de ces deux métriques en degré d'appartenance se fait à l'aide d'une fonction d'appartenance qu'il convient de définir. Pour ce faire, nous procédons en deux étapes. La première consiste à identifier la forme de *la fonction d'appartenance* qui nous semble être la plus pertinente pour retranscrire la sémantique de la *relation de localisation atomique,* puis, lors de la seconde étape, nous identifions les seuils de cette fonction. Ainsi, la première étape permet [12] de fixer la sémantique de la *relation,* alors que la seconde étape fait plus office de paramétrisation fine. La sélection de la forme de la fonction ne pose pas de problèmes particuliers, contrairement à la définition des seuils qui, comme nous allons le voir, est généralement assez arbitraire. Cependant, pour cet exemple particulier les seuils définis ont

12. Conjointement à la sélection d'une *métrique.*

Ligne électrique utilisée comme *objet de référence* — Isolignes d'éloignement à *l'objet de référence* (équidistance 250 m) — 500 m

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.3 – *Métrique* pour la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe` : La distance planaire à la ligne électrique trois brins.



Ligne électrique utilisée comme *objet de référence* — 500 m

Différence d'altitude avec la ligne électrique :

$< -500\,\mathrm{m}$ — $0\,\mathrm{m}$ — $> 500\,\mathrm{m}$

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.4 – Différence entre l'altitude locale et l'altitude de la ligne électrique la plus proche.

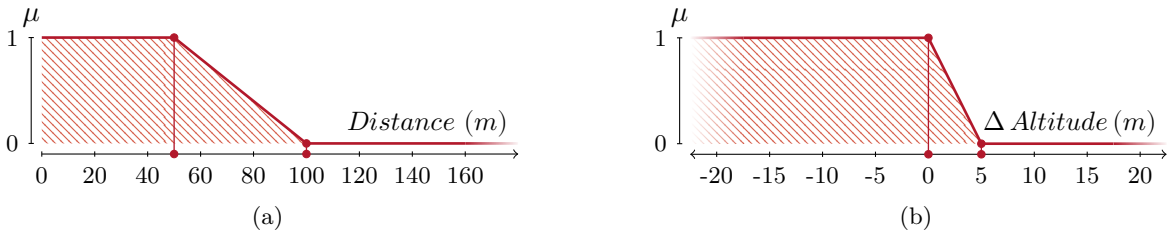


FIGURE 6.5 – Fonctions d'appartenance pour les *relations de localisation atomiques* orla#`PresDe` (a) et orla#`AltitudeStrictementInferieure` (b), utilisées pour construire la *zone de localisation probable* de *l'indice de localisation* « je suis sous une ligne électrique trois brins ».

été validés par un secouriste du PGHM.

La *relation de localisation atomique* orla#`PresDe` est utilisée pour figurer le fait que le *sujet* n'est pas très éloigné de *l'objet de référence.* Ainsi, une position « proche » de *l'objet de référence* doit avoir un *degré d'appartenance* à la *zone de localisation compatible* correspondant à cette *relation de localisation atomique* plus élevé qu'une position qui en est éloignée. Le degré d'appartenance doit donc diminuer lorsque la distance à *l'objet de référence* (*i.e.* la valeur de la métrique) augmente. La forme de la fonction d'appartenance étant fixée, nous pouvons à présent en définir les seuils. Deux valeurs sont à fixer : la première est la distance à partir de laquelle le degré d'appartenance décroit. Si elle est nulle, le degré d'appartenance décroit dès que la distance augmente, sinon il y aura une zone, dont la largeur dépend de la valeur choisie, où le degré d'appartenance sera maximal. Définir ce premier seuil revient à se demander quelle est la distance à partir de laquelle on ne peut plus considérer que l'on est « proche » d'une ligne électrique. Pour cet exemple, nous avons fixé empiriquement cette valeur à 50 mètres. Le second seuil à fixer est la distance à partir de laquelle le degré d'appartenance est nul. De manière tout aussi empirique, nous avons fixé cette valeur à 100 mètres. Ainsi, entre 0 et 50 mètres, le degré d'appartenance est de 1, puis il décroit jusqu'à être nul à 100 mètres et le reste au-delà, comme le montre la figure 6.5a.

La définition de la forme de la fonction d'appartenance pour la *relation de localisation atomique* orla#`AltitudeStrictementInferieure` ne pose pas non plus de problèmes particuliers. Comme cette *relation* traduit une position relative sur l'axe vertical, le degré d'appartenance doit être à 1 lorsque l'altitude de la position est inférieure à celle de *l'objet de référence* (*i.e.* que la métrique est négative) et nul dans le cas contraire (*i.e.* que la métrique est positive). Il faut alors définir les valeurs de la métrique à partir desquelles le degré d'appartenance est de 1 ou de 0. Étant donné que la différence d'altitude est calculée à partir du sommet de la ligne électrique, nous avons considéré que toute position dont l'altitude était inférieure au point le plus proche de la ligne électrique (*i.e.* dès que la valeur de la métrique est négative) avait un degré d'appartenance de 1. Nous avons fixé le second seuil à 5 mètres, ce qui permet d'ajouter une petite marge d'erreur. Ainsi, le degré d'appartenance est de 1 jusqu'à ce que la différence d'altitude soit nulle, puis il décroit rapidement jusqu'à atteindre la valeur de 0 lorsque la différence est de 5 mètres (*i.e.* que la position est 5 mètres au-dessus du sommet de la ligne électrique) et la valeur reste nulle au-delà (Figure 6.5b).

La construction de la *zone de localisation probable* nécessite de *fusionner* — à l'aide d'une intersection — les deux *zones de localisations compatibles* correspondant aux *relations de localisation atomiques* orla#`AltitudeStrictementInferieure` et orla#`PresDe`. Si son application

est dépendante de l'implémentation, la méthode utilisée est fixée par le modèle théorique. La *théorie des sous-ensembles flous* nécessite d'employer une *t-norme.* Étant donné que cette comparaison ne porte que sur les implémenations et non sur les opérateurs d'union et d'intersection, nous avons choisi d'utiliser les opérateurs les plus courants, ceux proposés par Zadeh (1965), où la fonction *minimum* fait office de *t-norme.*

6.3.2 Implémentation raster

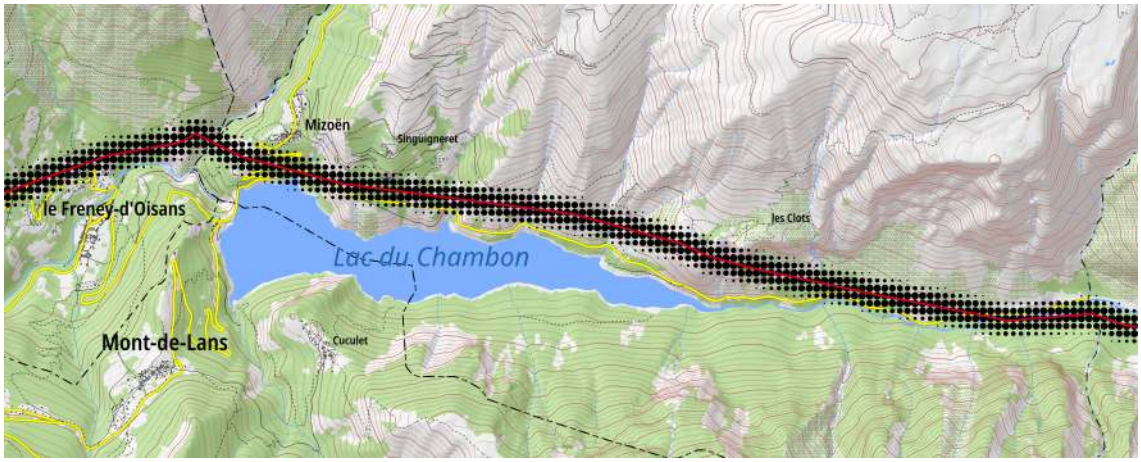
L'implémentation raster a l'avantage d'être assez facile à mettre en place. Une fois que les *métriques* et les *fonctions d'appartenance* ont été définies, elle se résume à calculer, pour chaque pixel d'une grille échantillonnant l'espace, la valeur de la *métrique,* puis du degré d'appartenance à la *zone de localisation compatible spatialisée*[13]. Cette opération est répétée pour chaque *relation de localisation atomique,* puis les *zones de localisation compatibles* résultantes sont *fusionnées* à l'aide des opérateurs d'intersection et de fusion sélectionnés. Le seul choix imposé par l'utilisation de cette implémentation et celui de la résolution du raster. Ce critère fixe la taille de pixels du raster et influe, par conséquent, sur la précision et la durée du calcul. Cette résolution doit être suffisamment fine pour permettre le calcul des fonctions *d'appartenance définies.* Par exemple, la *fonction d'appartenance* définie pour la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe` (figure 6.5a) a deux seuils, 50 et 100 mètres.

L'application de la fonction d'appartenance (figure 6.5a) à la métrique précédemment calculée (figure 6.3) permet d'obtenir la figure 6.6, représentant la *zone de localisation compatible* de la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe`. Le degré d'appartenance de chaque pixel à la *zone de localisation compatible* est représenté par un cercle, centré sur le pixel et dont le diamètre augmente avec celui-ci. Lorsque le degré d'appartenance est maximal, le diamètre du cercle est égal à la maille du raster (50 mètres dans le cas présent). Le diamètre est minimal lorsque le degré d'appartenance est à peine supérieur à zéro et les valeurs nulles sont filtrées pour faciliter la lisibilité.

Une méthode identique est utilisée pour construire la *zone de localisation compatible* issue de la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* `orla#AltitudeStrictementInferieure`. La *métrique* identifiée (figure 6.4) est calculée pour chaque pixel, puis ces valeurs sont transformées en *degrés d'appartenance* à l'aide de fonction d'appartenance définie précédemment (Figure 6.5b). La figure 6.7, qui résulte de ce processus, représente le degré d'appartenance de chaque pixel à la *zone de localisation compatible.*

Les rasters représentant les deux *zones de localisation compatibles* à intersecter possédant les mêmes résolutions et étendues, il y a bijection entre deux ensembles de pixels. On peut alors, sans effectuer de ré-échantillonnage, appliquer un opérateur d'intersection à chaque paire de pixels représentant la même position. Après l'intersection des *zones de localisation compatibles* figurées sur les figures 6.6 et 6.7 on obtient la *zone de localisation probable* (figure 6.8) correspondant à l'ensemble des positions situées *à proximité* et à une *altitude inférieure* de la ligne à haute-tension. Comme on peut le voir, le résultat obtenu est semblable à la figure 6.6 et assez différent de la figure 6.7. L'étendue de la *zone de localisation probable* est donc plus contraint par l'éloignement à la ligne électrique que par la différence d'altitude. Pour le dire autrement, il y a peu de positions « proches » et « au-dessus » d'une ligne électrique.

13. L'opération d'affectation du degré d'appartenance est appelée fuzzyfication.



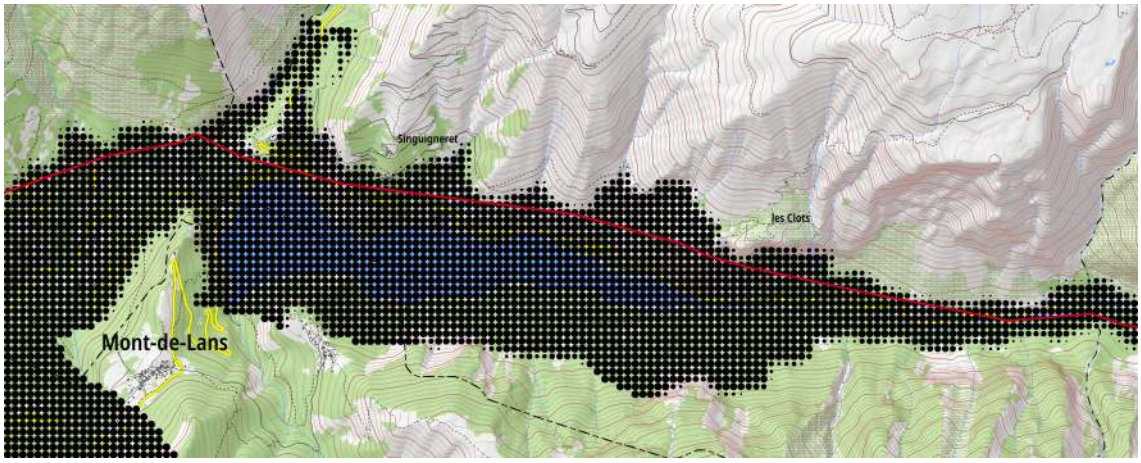
Ligne électrique utilisée comme *objet de référence*

500 m

0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,65 1

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.6 – *Zone de localisation compatible* pour la *relation de localisation atomique* orla#PresDe.



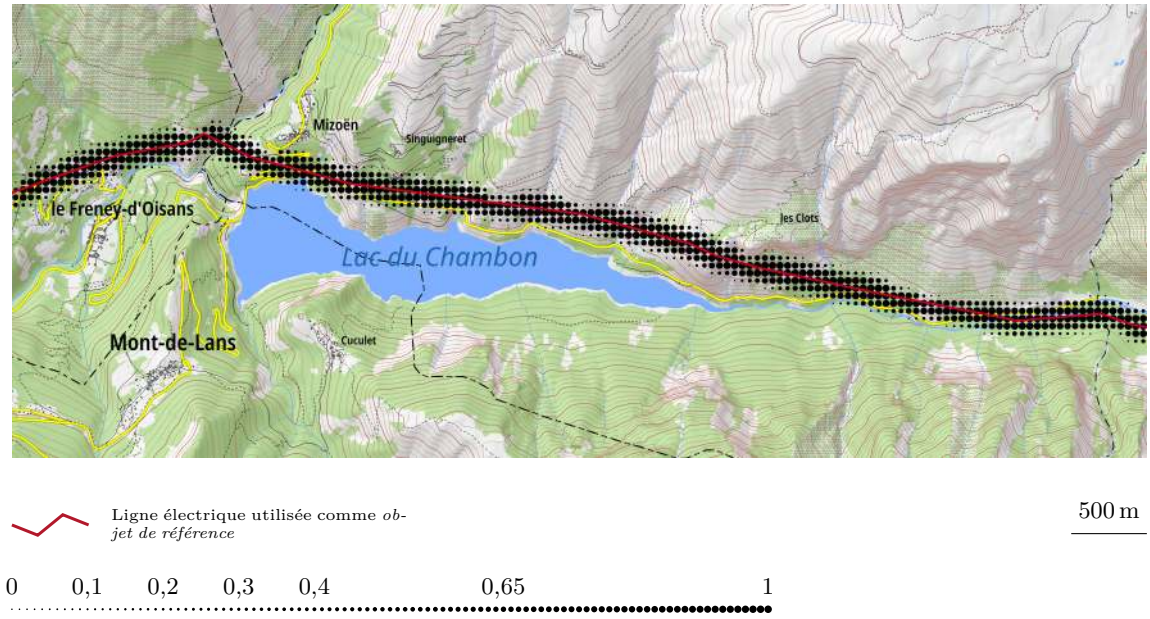
Ligne électrique utilisée comme *objet de référence*

500 m

0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,65 1

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.7 – *Zone de localisation compatible* pour la *relation de localisation atomique* orla#AltitudeStrictementInferieure.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 6.8 – *Zone de localisation probable,* construite avec une approche raster, pour *l'indice de localisation* « Je suis sous une ligne électrique trois brins ».

6.3.3 Implémentation par *Alpha-cuts*

Bien que fondée sur les mêmes aspects théoriques que l'implémentation raster, l'implémentation par *alpha-cuts* propose une approche très différente. On pourrait construire des *alpha-cuts* de plusieurs manières. Une première solution serait de partir des résultats de l'implémentation raster (Figure 6.8) et d'en extraire les pixels dont le degré d'appartenance est supérieur à un seuil fixé. Cette construction par sélection [14] n'est cependant rien de plus qu'un post-traitement des résultats de l'implémentation raster et elle ne possède pas d'avantages (ou inconvénients) qui lui soient propres. Une approche différente est cependant envisageable. RUNZ (2008) et ZOGHLAMI et al. (2016), par exemple, calculent des *alpha-cuts* directement, sans passer par une étape préalable de calcul des degrés d'appartenance, soit une *construction en intension* (chapitre 3). La construction *d'alpha-cuts* en intension demande d'identifier les critères jouant sur la forme de la *zone de localisation,* soit, dans notre exemple, la distance et la différence d'altitude par rapport à la ligne électrique. Conformément au *principe de décomposition,* on peut alors définir une méthode géométrique permettant de construire, pour chaque *relation de localisation atomique* et chaque *alpha-cut* construite, une région, correspondant à une *alpha-cut* de la *zone de localisation compatible* traitée. Ces différentes *alpha-cuts* sont alors intersectées deux à deux, par même degré d'appartenance en vue d'obtenir les *alpha-cuts* de la *zone de localisation probable* et ce, de manière fortement similaire à l'implémentation raster. Pour cette comparaison, nous avons choisi de construire trois *alpha-cuts,* celle dont le degré est égal à 1, délimitant le *noyau* du *sous-ensemble flou,* celle dont le degré d'appartenance est supérieur à 0, délimitant le *support* et enfin *l'alpha-cut* de degré 0,5.

Pour chaque segment de la ligne électrique traitée, nous construisons un polyèdre, correspon-

14. Fortement semblable à la *construction en extension d'ordre supérieur* présentée dans le chapitre 3.

dant à une *alpha-cut* tridimensionnelle. Étant donné qu'aucun SIG ne permettant de construire ce type d'objet, nous avons été contraint de nous orienter vers une solution de plus bas niveau : la bibliothèque de calcul géométrique CGAL (The CGAL Project 2019), ce qui a considérablement complexifié la tâche d'implémentation. Le polyèdre construit se compose de 6 faces, définies par autant de demis-plans (Figure 6.9). Comme les *alpha-cuts* délimitent une *zone de localisation* dépendante, toutes choses égales par ailleurs, de la position de *l'objet de référence,* la position de tous ces demi-plans est exprimable en fonction de la position de la ligne électrique traitée. Toutefois, certains d'entre eux ont une position variante par translation, en fonction de *l'alpha-cut* considérée.

Les demi-plans dont la position varie en fonction de *l'alpha-cut* considérée sont ceux dont la position délimite une zone de même degré d'appartenance. Par exemple, les demis-plans latéraux (*i.e.* situés à gauche et à droite par rapport au sens de la ligne électrique et parallèlement à celle-ci) permettent de délimiter une distance planimétrique à *l'objet de référence* et donc de représenter la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe`. Si l'on cherche à construire *l'alpha-cut* délimitant le support, il faudra placer ces demi-plans latéraux de manière à ce qu'aucune position située au-delà (par rapport à la ligne électrique) ne puisse avoir un degré d'appartenance non nul. Dans le cas de *l'indice de localisation* considéré, seule la *relation* `orla#PresDe` impacte la position de ces deux demi-plans. On peut alors se fonder sur la fonction d'appartenance correspondante (Figure 6.5a) et identifier la distance correspondant au degré d'éloignement considéré, soit 100 mètres pour un degré d'appartenance non nul. Les demi-plans avant et arrière délimitent également la distance planimétrique à la ligne électrique. Cependant, nous avons choisi de ne pas les faire varier. D'une part, car nous travaillons sur un seul *objet de référence,* traversant l'aire étudiée de part en part et sans changement de direction marqués, par conséquent, les polyèdres modélisant les *alpha-cuts* de chaque segment sont toutes en contact par leurs faces avant et arrières, la prise en compte de leur décalage par rapport à la ligne électrique n'est donc pas nécessaire. De plus, contrairement aux faces latérales, les limites avant et arrières des *alpha-cuts* ne peuvent être délimitées de manière satisfaisante par des demi-plans. Comme les demi-plans latéraux, la position du demi-plan supérieur dépend de la ligne électrique considérée et de *l'alpha-cut* traitée. Sa position varie en fonction de la *relation de localisation atomique* `orla#AltitudeStrictementInferieure`. Ainsi, si *l'alpha-cut* modélisée est la limite du *support,* le demi-plan supérieur doit être placé de manière à ce que toutes les positions situées au-delà aient un degré d'appartenance nul. Il est donc placé 5 mètres au-dessus de la ligne électrique. Enfin, le demi-plan inférieur ne sert qu'a fermer le polyèdre, aucune des *relations de localisation* n'imposant une limite d'altitude minimale. Pour éviter de réduire artificiellement l'étendue des *alpha-cuts,* nous avons placé ce demi-plan à une altitude nettement plus faible que l'altitude minimale de la *zone initiale de recherche* (ZIR), simulant ainsi un demi-plan virtuellement à l'infini. Le résultat de l'implémentation par *alpha-cuts* est visible sur la Figure 6.10.

6.3.4 Comparaison et choix de l'implémentation

Bien que *l'indice de localisation* utilisé pour cet exercice de comparaison soit peu complexe, il a permis la mise en évidence de nombreuses différences entre les approches raster et par *alpha-cuts.*

Ces deux approches aboutissent à une *zone de localisation probable* similaire, sans différences notables et de qualité semblable (Bunel et al. 2019b). Cependant, de par sa construction, l'implémentation par *alpha-cuts* devrait être, dans le cas général, plus précise que l'approche raster,

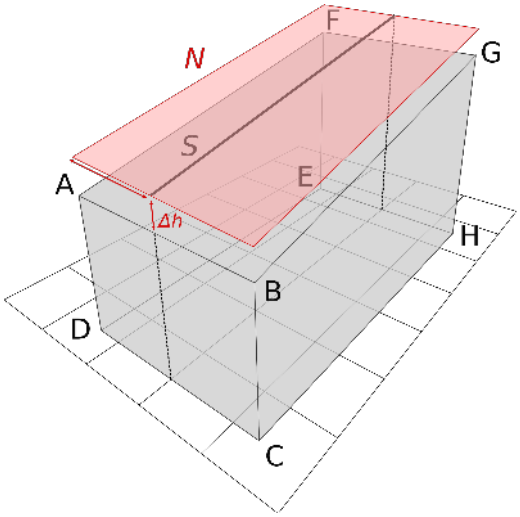


FIGURE 6.9 – Plans utilisés pour définir une *alpha-cut.*

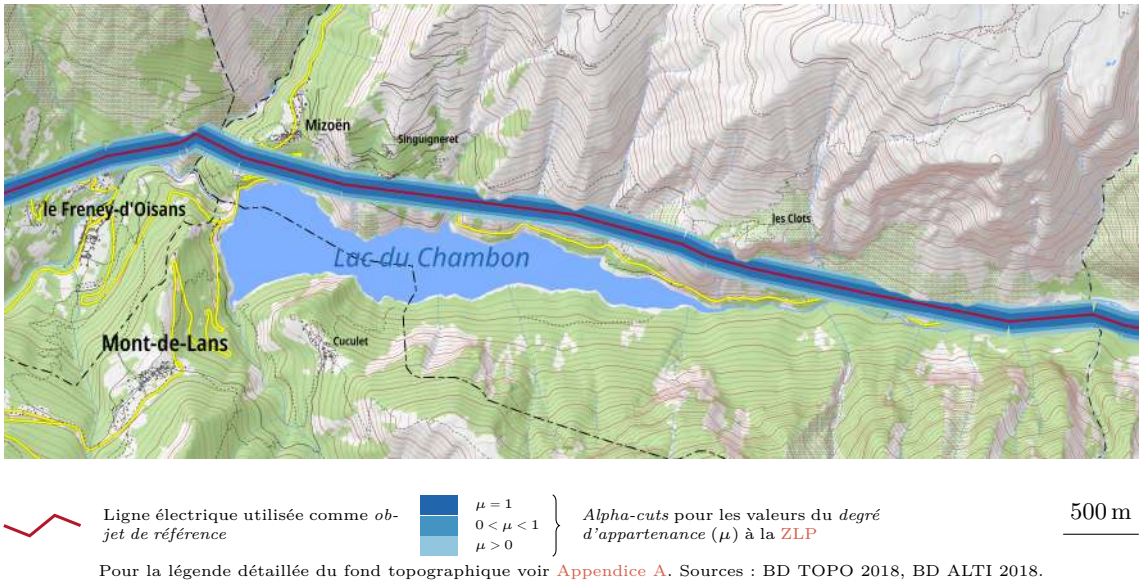


FIGURE 6.10 – *Zone de localisation probable* construire avec une modélisation par *alpha-cuts.*

puisque ne nécessitant pas un échantillonnage préalable. Toutefois, la précision de toutes les implémentations dépend également de la précision des données. Par exemple, la *spatialisation* de la *relation de localisation* `orl#SousProcheDe` a nécessité l'emploi de données altimétriques, diffusées sous la forme d'un MNT de résolution donnée. La *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* `orla#AltitudeStrictementInferieure` ne peut donc pas, quelle que soit l'implémentation choisie, être plus précise que la donnée en entrée. Or, comme l'implémentation raster a été calculée à partir d'un raster dont la résolution est calquée sur celle du MNT, sa précision est identique à celle des données. Dans cette configuration, l'implémentation par *alpha-cuts* ne peut donc pas être plus précise. Ainsi, la précision de l'ensemble de la modélisation est avant tout limitée par l'élément le moins précis, qui dans le cas des deux implémentations est la précision du MNT.

Si les implémentations par *alpha-cut* et raster proposent une modélisation de qualité comparable, leur difficulté de mise en place et de manipulation sont très différentes. La mise en place de ces deux implémentations a nécessité des développements *ad hoc.* Nous n'avons pas éprouvé de difficulté particulière à mettre en place l'implémentation raster, contrairement à l'approche par *alpha-cuts* qui a nécessité des développements conséquents et de bas niveau. Si les problématiques techniques (*e.g.* difficulté d'implémentation, temps de calcul, *etc.*) ne sont pas un critère de décision suffisant, elles impliquent un investissement plus important sur des tâches de développement, ce qui limite le temps disponible pour la définition de nouvelles méthodes de *spatialisation.* De plus, cela complique également l'extension de la modélisation. L'ajout de nouvelles méthodes de *spatialisation* ou l'utilisation de nouveaux opérateurs flous nécessiterait d'importants développements pour être utilisés avec l'approche par *alpha-cuts,* la méthode de construction du polyèdre utilisée ne pouvant fonctionner qu'avec les *relations de localisation atomiques* `AltitudeStrictementInferieure` et `orla#PresDe` et les opérateurs de Zadeh (1965). De plus, la généralisation de l'utilisation de l'implémentation par *alpha-cuts* nécessite de compléter notre proposition pour offrir une meilleure prise en compte des jointures entre les polyèdres modélisant les *alpha-cuts,* car toutes les configurations ne permettent pas l'approximation faite ici.

La généralisation de l'implémentation par *alpha-cuts* impose également de multiplier les étapes de *fusion*[15] et donc les intersections et unions entre *alpha-cuts.* Si leur mise en place n'est pas problématique, cela tend à complexifier les *zones de localisations,* les *alpha-cuts* devenant à chaque fusion plus fragmentées et difficiles à interpréter visuellement, d'autant plus si elles sont modélisées en trois dimensions. Le problème ne se pose pas avec l'implémentation raster, puisque les intersections et les unions sont réalisées au niveau des pixels. Le raster produit par ces opérations est donc de forme identique à ceux intersectés. Ainsi, alors que les *alpha-cuts* tendent à ce complexifier à chaque *fusion,* les rasters restent de résolution similaire et donc de complexité similaire.

D'autres critères techniques peuvent également être pris en compte pour cette comparaison, comme le temps de calcul nécessaire au fonctionnement des deux implémentions ou le volume des données qu'elles imposent de manipuler. Si l'on compare le temps nécessaire à la construction des deux *zones de localisations probables* (Figures 6.8 et 6.10), l'implémentation raster est plus rapide. Mais cette performance est plus liée à des facteurs exogènes, comme la qualité du développement et l'optimisation des bibliothèques logicielles utilisées qu'à la complexité des algorithmes utilisés. De plus, l'implémentation par *alpha-cuts* ayant été plus longue et difficile à

15. Seule la *fusion* des *zones de localisation compatibles* résultant de la *spatialisation* des *relations de localisation atomiques* (première étape de la phase de fusion, cf. Figure 4.6) est ici prise en compte.

mettre en place, peu de temps a été consacré à l'optimisation, même basique, de son code : ses performances sont donc très certainement améliorables. Le temps de calcul de l'implémentation raster a également tendance à augmenter plus rapidement avec le nombre *d'objets de référence* à traiter (ou avec la résolution utilisée). Cette méthode est donc potentiellement moins performante que l'approche par *alpha-cuts,* même si la *spatialisation* de *l'indice de localisation* : « Je suis sous une ligne électrique trois brins » semble indiquer le contraire.

L'implémentation par *alpha-cut* a également l'avantage — cette fois encore plus net — si l'on se penche sur la question du volume des données produites et manipulées. Là où les *alpha-cut* sont construites directement, l'implémentation raster nécessite de pré-calculer un raster par *métrique* et par *objet de référence* avant de pouvoir construire les *zones de localisation compatibles.* Le nombre de raster peut augmenter fortement avec le nombre *d'objets de référence* ou *d'indices de localisation,* conformément au *principe de décomposition*, et leur taille quadratiquement avec la résolution. L'utilisation d'une implémentation raster respectant les *principes de modélisation* définis est donc assez contraignante du point de vue des données à manipuler.

Ces différents éléments de comparaison (Tableau 6.1) nous ont notamment conduit à privilégier l'implémentation raster. Bien que potentiellement moins performante que l'implémentation par *alpha-cuts,* cette approche s'est révélée plus simple et rapide à mettre en place. De plus, les développements nécessaires à la généralisation de la méthode (*e.g.* changement d'opérateurs d'intersection et d'union, ajout de nouvelles méthodes de *spatialisation, etc.*) sont moins contraignants et moins couteux. Le choix d'une implémentation raster nous permet donc d'aboutir plus rapidement à une méthode générique et fonctionnelle, ce qui nous permettra de nous concentrer sur la *spatialisation* (et donc de traiter plus de types d'indices) et non sur des problèmes techniques de programmation.

Le choix de l'implémentation raster nécessite la définition préalable d'une résolution de traitement, de laquelle dépendra, toutes choses égales par ailleurs, la précision de la *spatialisation,* mais également le temps de calcul et le volume des résultats. Si cette résolution peut être fine pour de petites ZIR [16], elle doit nécessairement être réduite lorsque la ZIR grandit [17] ou lorsque les *indices de localisation* se multiplient ou se complexifient [18].

16. Comme la *zone initiale de recherche* de *l'indice de localisation* traité ici. Cette dernière étant suffisamment réduite pour que nous puissions travailler avec la résolution maximale, celle de la moins précise des données (en l'occurrence le MNT).
17. Plus de pixels sont alors à traiter.
18. Plus de *zones de localisation compatibles* sont alors à construire

Critère comparatif	***Alpha-cuts***	**Raster**
Précision de la modélisation	Dépend avant tout de la précision des données.	Dépend avant tout de la résolution, puis de la précision des données.
Difficulté de mise en place	Assez importante. La mise en place de cette implémentation nécessite de nombreux développements *ad hoc* de bas niveau	Peu importante. Il est assez rapide d'aboutir aux premières *spatialisations.*
Difficulté d'extension	Importante ; il est difficile de généraliser l'implémentation pour y adjoindre de nouvelles méthodes de *spatialisation.*	Faible ; une fois les premières *spatialisations* effectuées, peu de modifications sont à prévoir.
Temps de calcul	Assez faible pour l'exemple traité, risque de varier fortement en fonction de la *relation de localisation* traitée.	Conséquent. Augmente quadratiquement avec la résolution.
Volume des données	Assez faible.	Assez faible pour aboutir à la Figure 6.8, mais augmente rapidement avec le nombre *d'objets de référence* candidats.
Contraintes spécifiques	Nécessité de choisir le nombre et le degré d'appartenance des *alpha-cuts.*	Nécessité de définir une résolution de modélisation.

TABLE 6.1 – Synthèse de la comparaison des implémentations par *alpha-cuts* et raster.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la manière dont les *zones de localisation* construites par notre méthodologie seront modélisées. Notre volonté de prendre en compte l'imprécision des relations de localisation et de la répercuter sur les zones de localisation impose de recourir a une représentation des objets géographiques différente de celles généralement utilisées dans le domaine des SIG.

Différents modèles théoriques permettent de modéliser *l'imprécision.* Nous avons choisi d'utiliser la *théorie des sous-ensembles flous,* qui offre un cadre théorique permettant de traiter tous les aspects que nous avons identifiés comme essentiels, à savoir la possibilité de représenter des *zones de localisation* de formes et d'imprécision très diverses et la possibilité de réaliser les opérations de fusion définies dans la méthodologie, tout en garantissant l'interprétabilité des résultats.

Pour sélectionner une implémentation de la théorie des *sous-ensembles flous,* nous avons confronté les deux implémentations qui nous semblaient être les plus intéressantes, l'approche par *alpha-cut* et l'approche raster, lors de la modélisation d'un *indice de localisation* réel issu du cas *fil rouge* : « Je suis sous une ligne électrique trois brins ». Les deux implémentations permettent une modélisation de qualité similaire, mais avec des contraintes différentes. Là où l'approche par *alpha-cuts* est plus difficile à mettre en place, mais plus sobre, l'approche raster est rapide à utiliser et à étendre, mais plus couteuse en temps de calcul et en volume de données. Au terme de cette comparaison, nous nous sommes donc orientés vers l'implémentation raster, qui nous permet d'implémenter plus rapidement notre méthodologie de *spatialisation* et, par conséquent, de traiter un maximum de *relations de localisations* et donc de types d'indices utilisés dans les alertes.

Chapitre 7

La phase de *spatialisation*

Introduction 163
7.1 Présentation générale de la méthode de *spatialisation* 164
7.1.1 Contraintes à la définition d'une *méthode de spatialisation* 164
7.1.2 Définition de la méthode de *spatialisation* 165
7.2 La *rasterisation* des *objets de référence* 168
7.2.1 Considérations générales sur la *rasterisation* 168
7.2.2 Les différentes méthodes de *rasterisation* 169
7.3 Le calcul de la *métrique* 173
7.3.1 Classification 173
7.3.2 Les différentes *métriques* 173
7.4 La *fuzzyfication* de la *métrique* 177
7.4.1 La méthode de *fuzzyfication* 177
7.4.2 Les différents *fuzzyficateurs* 179
7.4.3 Les *modifieurs* 182
7.5 Représenter des connaissances *relatives à la spatialisation* 185
Conclusion 187

Introduction

Ce chapitre est dédié à la phase de *spatialisation,* étape primordiale et centrale de notre méthode de transformation d'un référencement spatial indirect en référencement spatial direct, présentée dans le chapitre 4 (Figure 4.6). L'objectif de la spatialisation est de créer la *zone de localisation compatible* correspondant à un *indice de localisation décomposé.* Il s'agit de la seule étape de notre méthodologie aboutissant à la création d'objets géographiques, les étapes composant les phases de *décomposition* (chapitre 5) et de *fusion* (chapitre 8) ne faisant que transformer des objets, respectivement des *indices de localisation* et des *zones de localisation compatibles,* préexistants.

Notre méthode de *spatialisation* est composée de trois parties : la *rasterisation,* le calcul de la *métrique* et la *fuzzyfication,* que nous avons rapidement évoqués dans le chapitre précédent. Nous allons ici les présenter en détail et exposer la manière dont ils se combinent pour aboutir à la construction d'une ZLC.

Dans la première partie de ce chapitre (section 7.1), nous présenterons l'organisation générale de la *méthode de spatialisation,* puis nous en détaillerons les différentes parties : la *rasterisation*

(section 7.2), le *calcul de la métrique* (section 7.3) et la *fuzzyfication* (section 7.4). Enfin, nous aborderons la représentation des connaissances relatives à la *méthode de spatialisation* (section 7.5).

7.1 Présentation générale de la méthode de *spatialisation*

La *spatialisation* est la phase de notre méthodologie (chapitre 4) où les *indices de localisation,* décomposés de manière à contenir une seule *relation de localisation atomique* et un seul *objet de référence nommé* (chapitre 5), sont interprétés pour construire une *zone de localisation compatible,* délimitant la région où *l'indice de localisation* est vrai, représentée par un raster flou (chapitre 6).

7.1.1 Contraintes à la définition d'une *méthode de spatialisation*

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 4 et conformément au *principe de modélisation autonome,* la *spatialisation* est une étape effectuée indépendamment et parallèlement pour tous les *indices de localisation* résultant de la *phase de décomposition.* Le processus que nous détaillons ici est donc conçu pour traiter des *indices de localisation* décomposés, c'est-à-dire qui ne sont composés que d'une *relation de localisation atomique* et d'un *objet de référence nommé*[1].

La définition d'une méthode de *spatialisation* est cependant fortement contrainte par le choix de l'implémentation raster précédemment annoncé (chapitre 6). La méthode développée doit donc être à même de produire des *zones de localisation compatibles* (ZLC) sous la forme de rasters de degrés d'appartenance et ce, à partir *d'objets de référence* généralement représentés sous forme vectorielle. Il est pour ce faire nécessaire de définir une méthode de rasterisation, permettant de transformer ces *objets de référence* vectoriels en des rasters à mêmes d'être utilisés pour générer des ZLC raster.

Un point essentiel de la représentation raster *d'objets géographiques* est qu'elle impose, contrairement à une représentation vectorielle, de définir explicitement une résolution et une zone de modélisation fixant les limites du raster. Un même objet peut donc être représenté par des rasters de taille très différentes, à des résolutions qui le sont tout autant. La définition d'une résolution et d'une limite à la *rasterisation* est une phase importante dans notre méthode. En effet, les rasters construits lors de cette étape sont à la base de notre méthode de *spatialisation.* Par conséquent, tous les traitements ultérieurs, que ce soit au sein de la phase de *spatialisation* ou durant la phase de *fusion* (Chapitres 4 et 8), sont impactés par le choix d'une résolution et des limites de la zone de traitement, puisqu'ils en héritent et qu'il n'y aucune pertinence à envisager des opérations de changement de résolution ou de région de traitement au cours des phases de *spatialisation* et de *fusion.* Dans notre cas, la définition d'une zone de modélisation ne pose pas de problèmes particuliers : en effet, le secouriste définit une *zone initiale de recherche* ZIR, fixant aussi l'aire de recherche maximale et donc les limites de la zone où devra être calculée la *spatialisation,* quel que soit *l'indice de localisation* considéré. Nous avons donc choisi de *rasteriser* tous les objets de référence d'une même alerte à l'aide d'un raster de même dimension et correspondant aux délimitations de la ZIR. Le choix de la résolution influençant la qualité (et la durée) de la *spatialisation,* nous avons choisi de le laisser à l'appréciation du

1. Sauf dans le cas particulier des *relations de localisation* nécessitant plus d'un objets de référence, comme « entre x et y, » (*i.e.* binaires).

secouriste. Pour ce faire, nous avons défini quatre valeurs (10, 25, 50 et 100 m), associées à autant de qualificatifs (haute, moyenne, basse et très basse résolution), décrivant la précision de la *spatialisation.* Le secouriste peut donc définir une précision de modélisation sans avoir à sélectionner directement une valeur.

7.1.2 Définition de la méthode de *spatialisation*

Pour définir une *méthode de spatialisation,* le mieux est encore de s'interroger sur la nature des résultats que nous souhaitons obtenir : les *zones de localisations compatibles.* Ces dernières doivent délimiter la région correctement décrite par *l'indice de localisation* spatialisé, c'est-à-dire qu'en toute position de la ZLC, l'assertion : « *l'indice de localisation* est vrai » est correcte. L'utilisation de la *théorie des sous-ensembles flous* (chapitre 6) permet une modélisation plus fine, considérant des nuances de vérité et permettant de distinguer les positions où l'assertion précédente est parfaitement correcte (*i.e.* où le *degré d'appartenance* est de 1), de celles où elle l'est partiellement (*i.e.* où le *degré d'appartenance* est entre 0 et 1). Le choix d'une implémentation raster (chapitre 6) facilite, quant à lui, la définition de zone de la ZLC, en résumant sa construction au calcul d'un *degré d'appartenance* pour chaque pixel d'un raster échantillonnant la ZIR. Ces deux éléments ne définissent cependant que la manière de représenter la *zone de localisation compatible* et non la façon de la construire, cette tâche incombant à la *méthode de spatialisation.*

Définir une *méthode de spatialisation* revient donc à identifier une procédure permettant de vérifier, pour chaque pixel d'un raster donné et à l'aide de la *théorie des sous-ensembles flous,* la validité de l'assertion « *l'indice de localisation* est vrai ». Or, le *principe de décomposition* nous a amené à définir des *relations de localisation atomiques* très différentes les unes des autres et nécessitant, par conséquent, des *méthodes de spatialisation* qui le sont tout autant. Il semble donc nécessaire de développer une *méthode de spatialisation* pour chaque *relation de localisation atomique* définie dans ORLA. C'est, par exemple, ce que proposent Vanegas et al. (2011) ou Takemura et al. (2012) en proposant des *méthodes de spatialisation* dédiées à une *relation de localisation donnée.* Nous proposons cependant d'utiliser, à nouveau, une démarche de décomposition.

Prenons par exemple les deux *relations de localisation atomiques,* `orla#Interieur` et `orla#Exterieur`[2]. Ces deux concepts décrivent deux *relations* entre le *sujet* et *l'objet de référence,* opposée, mais de même nature (*i.e.* topologique). Aussi, on peut considérer que ce qui distingue ces deux *relations de localisation atomiques* n'est pas la nature de la configuration spatiale qu'elles décrivent, mais la manière dont elles évaluent la validité de l'assertion : « *l'indice de localisation* est vrai ». Pour illustrer cette affirmation, prenons l'exemple de la Figure 7.1. Un *objet de référence* (en rouge) est situé dans le coin supérieur droit d'un raster de 4 pixels représentant une ZIR simplifiée. Imaginons que l'on cherche à construire, sans prendre en compte *l'imprécision,* les ZLC correspondant aux *relations* `orla#Interieur` et `orla#Exterieur`, pour cet *objet de référence.* L'approche raster nous permet de construire ces deux ZLC en sélectionnant les pixels situés, respectivement, à l'intérieur et à l'extérieur de *l'objet de référence.* Pour cela, il est tout d'abord nécessaire d'identifier la relation topologique entre chaque pixel et *l'objet de référence.* Étant donné que *l'imprécision* n'est pas considérée ici, nous pouvons décrire ces relations topologiques à l'aide d'une fonction f, attribuant une valeur égale à 1 si

2. Ces deux *relations de localisation atomiques* sont utilisées pour décomposer des *relations* comme `orl#DansLaPartieSudDe` ou `orl#AuNordDeExterne`, mais également directement dans les *relations* `orl#DansPlanimétrique` et `orl#HorsDePlanimétrique`.

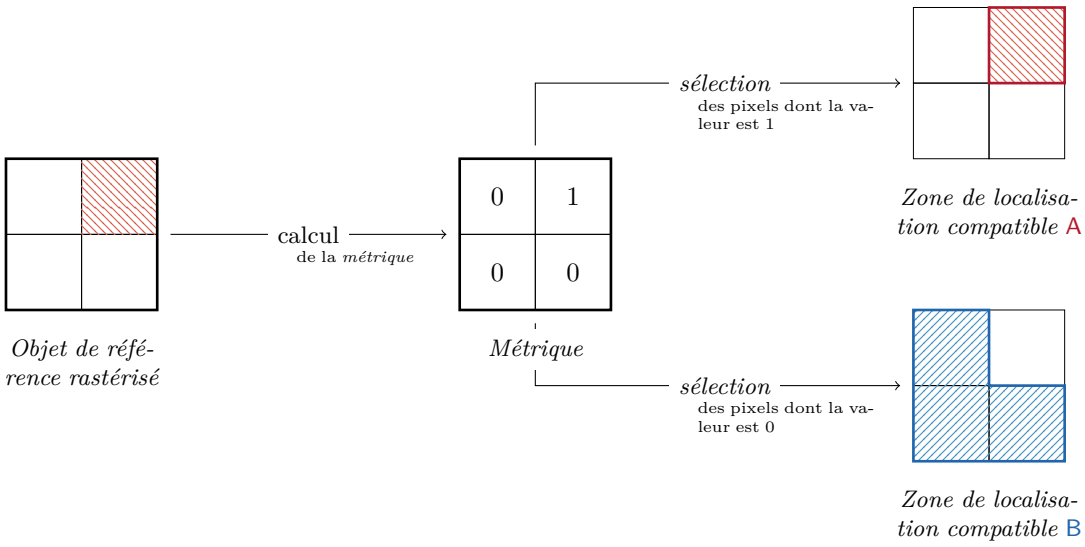


FIGURE 7.1 – Illustration du processus de construction d'une ZLC nette.

la position (représentée par un pixel) est confondue avec *l'objet de référence* et une valeur de 0 dans la cas contraire[3]. En calculant la valeur de la fonction f pour chaque pixel de la ZIR (Figure 7.1) on obtient alors un raster contenant (explicitement) une information permettant de distinguer les pixels situés à l'intérieur et à l'extérieur de *l'objet de référence.* On peut alors construire :

— La ZLC A, correspondant à la *relation de localisation atomique* `orla#Interieur`, en sélectionnant l'ensemble des pixels pour lesquels la valeur de la fonction f est égale à 1.

— La ZLC B, correspondant à la *relation* `orla#Exterieur`, en sélectionnant les pixels pour lesquels la valeur de la fonction f est égale à 0.

Ces deux ZLC, bien qu'ayant une sémantique et une emprise spatiale qui ne peuvent être confondues, sont *spatialisées* avec une méthode similaire, dont seule la dernière étape — la sélection des pixels satisfaisant la *relation de localisation atomique* — diffère. Ainsi, ce qui distingue ces deux *relations de localisation atomiques* n'est pas le critère utilisé pour les modéliser (*i.e.* les matrices 4IM), mais la manière dont les valeurs obtenues sont filtrées pour construire les ZLC. On peut alors identifier deux parties distinctes dans cette *méthode de spatialisation :* le calcul du critère de modélisation de la *relation de localisation atomique* — nous parlerons dorénavant de *métrique* — et la *sélection* des pixels dont la valeur de la *métrique* correspond à la sémantique de la *relation de localisation atomique* spatialisée.

Cependant, ces deux parties ne sont pas suffisantes pour distinguer toutes les *relations de localisation atomiques.* Par exemple, les descriptions de position : « Je suis à 300 mètres de ma maison » et « Je suis à la frontière du bois de Vincennes », décrivent des situations en apparence très différentes, elles sont d'ailleurs modélisables avec des *relations de localisation atomiques* distinctes, `orla#DistanceQuantitive` et `orla#ALaFrontiereDe`. Pourtant, si l'on se penche sur leur signification, on peut s'apercevoir qu'elles partagent leur *métrique,* mais également son interprétation. En effet, d'une part, ces deux *relations de localisation atomiques*

3. Nous aurions pu utiliser une des formalisations des relations topologiques présentées dans le chapitre 3 (RCC-8, 4IM, 9IM, DE-9IM, *etc.*). Cependant, ces modèles ne sont pas destinés à représenter des relations topologiques entre raster. Il nous à donc semblé plus simple de ne pas les utiliser pour illustrer cet exemple.

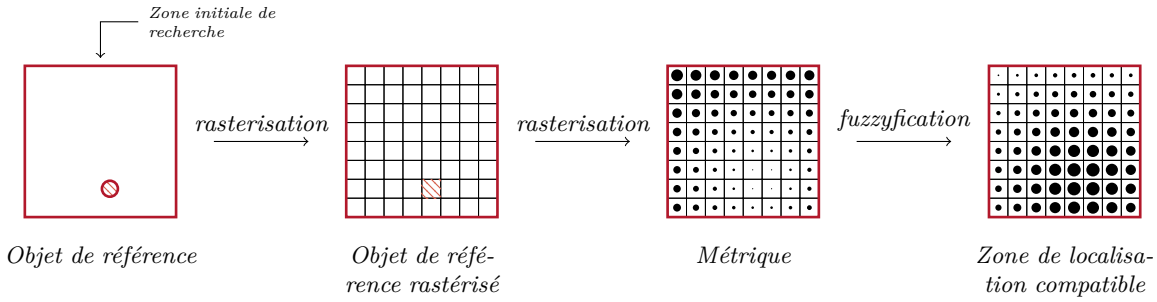


FIGURE 7.2 – Méthode de *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique* donnée.

décrivent un éloignement spatial entre le *sujet* et *l'objet de référence,* si ce n'est qu'il est explicite et quantifié dans un cas et sous-entendu dans l'autre. Elles peuvent donc être modélisées avec la même métrique : la distance à *l'objet de référence.* D'autre part, on pourrait penser que ces *relations* se distinguent par leur interprétation de cette même *métrique,* comme c'est le cas pour les *relations de localisation atomiques* `orla#Exterieur` et `orla#Intérieur`. Ce n'est pourtant pas le cas. La *relation* `orla#DistanceQuantitive` indique explicitement que la distance entre le *sujet* et *l'objet de référence* est proche d'une valeur donnée (ici 300 m), mais c'est également le cas de la *relation* `orla#ALaFrontiereDe`, si ce n'est que cette distance est implicitement nulle. Bien entendu, la notion de « proximité », correspondant à *l'imprécision* de la zone modélisée peut être différente entre ces deux *relations,* mais cela ne change pas notre propos, `orla#DistanceQuantitive` et `orla#ALaFrontiereDe` décrivent toutes deux une situation où la distance à *l'objet de référence* (*i.e.* la métrique) est proche d'une valeur donnée. Ces deux *relations* ne sont différentiables qu'en ajoutant un nouveau paramètre de *spatialisation :* le point d'origine de la *métrique.* En effet, si ces deux *relations* décrivent un éloignement par rapport à *l'objet de référence,* elles ne se basent pas sur la même partie de *l'objet de référence.* Là où `orla#DistanceQuantitive` décrit un éloignement par rapport à l'objet dans son ensemble, `orla#ALaFrontiereDe` décrit, explicitement, un éloignement par rapport à sa frontière, ce qui est une distinction sémantique forte et qui modifie la manière dont les positions situées au sein de *l'objet de référence* sont interprétées. Dans la première situation, les positions situées au sein de *l'objet de référence* ont une distance à *l'objet de référence* nulle, alors que dans le second cas, cette distance est strictement positive, car calculée à partir de la frontière de *l'objet de référence.* Ainsi, il également nécessaire de prendre en compte, dans notre méthode, le point ou la partie de *l'objet de référence* faisant réellement office de référence et donc de point de calcul de la *métrique.*

Trois composantes sont donc à prendre en compte pour *spatialiser* une *relation de localisation atomique :* une *métrique,* la partie de *l'objet de référence* servant d'origine à son calcul, et une *méthode de sélection* permettant d'identifier les valeurs de la *métrique* correspondant à la sémantique de la relation de *localisation atomique spatialisée.* À ces trois composantes s'ajoutent trois contraintes à respecter : la nécessité de limiter la *spatialisation* à la ZIR, de rasteriser les *objets de référence* et de construire une ZLC floue (contrairement aux résultats de la Figure 7.1).

Nous proposons de définir une *méthode de spatialisation* en trois parties, la *rasterisation,* le calcul de la *métrique* et la *fuzzyfication* (Figure 7.2). La *rasterisation* est la première partie de la *spatialisation.* Elle consiste à transformer les *objets de référence* vectoriels en des rasters à

partir desquels nous pourrons calculer la *métrique* nécessaire à la *spatialisation.* La rasterisation de *l'objet de référence* nécessite de définir une résolution et une taille de raster qui, dans notre cas, correspond à la ZIR. Ainsi, la zone de *rasterisation* correspond à la *zone initiale de recherche* et cette étape fait donc également office de délimitation de la zone de calcul. De plus, il est nécessaire d'identifier la partie de *l'objet de référence* qui est utile pour la *relation de localisation atomique* à spatialiser (*e.g.* frontière, centroide, *etc.*). Il est plus simple d'extraire cette partie dans un premier temps et de ne rasteriser ensuite que la partie extraite. Ainsi, l'étape de *rasterisation* remplit trois rôles : (a) la sélection de la partie de *l'objet de référence* à rasteriser, (b) la prise en compte de la ZIR, et (c) la rasterisation de *l'objet de référence.* Comme nous le verrons dans la partie qui lui est dédiée (section 7.2), l'opération de rasterisation peut donner des résultats très différents en fonction des paramètres retenus. La seconde partie de la *spatialisation* est le calcul de la *métrique.* Ce calcul est effectué sur l'aire et à la résolution fixées lors de l'opération de *rasterisation.* Les *métriques* utilisables sont nombreuses et fortement liées à la sémantique de la *relation de localisation atomique* spatialisée, comme nous le verrons dans la partie dédiée à cette question (section 7.3). La dernière partie de la *méthodologie de spatialisation* est la *fuzzyfication.* C'est durant cette étape que les pixels sont filtrés en fonction de la valeur de la métrique et qu'un degré d'appartenance leur est affecté, de manière à délimiter la *zone de localisation compatible* correspondant à la *relation de localisation atomique* spatialisée. Contrairement à l'exemple présenté (Figure 7.1), cette opération doit aboutir à une ZLC floue, ce que nous détaillerons dans la section 7.4.

7.2 La *rasterisation* des *objets de référence*

La première partie de la méthode de *spatialisation* est la *rasterisation* des *objets de référence.* Cependant, le processus que nous venons de définir ne peut se résumer à un simple changement de représentation de la donnée géographique. Le terme de « *méthode de rasterisation* », tel que nous l'avons introduit, englobe plusieurs questions. Tout d'abord, la sélection de la partie de *l'objet de référence* qui va être *rasterisée,* mais également la manière dont on transforme cette sélection en un raster, c'est-à-dire comment on définit si un pixel appartient ou non à *l'objet de référence.* Toutefois, lorsque nous parlons de définition d'une *méthode de rasterisation,* nous ne traiterons que de ce second point. Il ne nous semble, en effet, pas pertinent de changer la manière dont la sélection des pixels est effectuée.

7.2.1 Considérations générales sur la *rasterisation*

Une première contrainte est que les *méthodes de rasterisation* doivent être à même de traiter différents types géométriques *d'objets de référence,* comme des *points,* utilisés pour représenter des points d'intérêt ou des lieux nommés, des *polylignes,* utilisées pour représenter tout type de réseau (*e.g.* voirie, transport d'eau ou d'énergie) et des *polygones,* utilisés pour représenter tout objet à l'implantation zonale.

Un autre point à prendre en considération lors de la définition d'une méthode de *rasterisation* est le processus de sélection des pixels appartenant à l'objet rasterisé. En effet, à moins d'être dans une configuration particulière (et rare), l'objet rasterisé intersecte les pixels de différentes manières : certains d'entre-eux peuvent être intégralement situés à l'intérieur de l'objet, d'autres partiellement, d'autre encore peuvent juste toucher la frontière de l'objet, *etc.* Pour mettre en place une méthode de rasterisation, il est donc nécessaire de définir dans quelles configurations les pixels sont considérés comme appartenant à l'objet rasterisé et

dans quelles conditions ils ne le sont pas. Plusieurs solutions sont envisageables. Par exemple, la bibliothèque GDAL (GDAL/OGR CONTRIBUTORS 2020), référence de facto dans le traitement des données géographiques, propose deux configurations possibles, "*standard*" et "*all touched*". Avec la première configuration, les régions sont rasterisées en sélectionnant les seuls pixels dont le centroïde est situé au sein de l'objet et les polylignes sont rasterisées avec l'algorithme de tracé de segment de BRESENHAM (1965), qui sélectionne les pixels situés sur le trajet de la polyligne. La seconde configuration sélectionne tous les pixels qui sont en contact avec l'objet, même s'ils ne partagent qu'un seul point, ce qui aboutit à la création d'une zone généralement plus large que l'objet. La Figure 7.3 illustre ces deux approches : un même *objet de référence* y est *rastérisé,* d'une part en sélectionnant uniquement les pixels dont le centroïde est à l'intérieur de *l'objet de référence* (aboutissant au raster A), d'autre part en sélectionnant tous les pixels touchant *l'objet de référence* (ce qui donne le raster B). Comme on peut le voir, la seconde solution aboutit à une zone plus large, la zone résultant de la *rasterisation* est alors plus importante que l'emprise réelle de l'objet. Cependant, cette seconde approche à l'avantage de toujours aboutir à un raster non nul. En effet, dans certaines configurations, il est possible qu'un *objet de référence,* de surface non nulle, ne contienne aucun centroïde de pixel, aboutissant à la construction d'un raster vide. Or, cette situation n'est pas acceptable, car, dans notre méthodologie, cela aboutirait à ignorer *l'objet de référence,* et donc à ne pas considérer l'ensemble des informations transmises par le requérant. Ce phénomène se produit lorsque la maille utilisée pour la *rasterisation* est trop grande comparativement aux objets que l'on souhaite *rasteriser,* donc à une mauvaise paramétrisation de la rasterisation. Ce problème est donc corrigeable par l'augmentation de la résolution du raster cible. Toutefois, cette solution n'est pas toujours possible lors d'une utilisation concrète d'une *rasterisation.* Prenons pour exemple la Figure 7.4, illustrant une situation où l'on cherche à *rasteriser* un bâtiment quelconque en vue de la *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique.* Le bâtiment, de taille moyenne (ici 200 m^2) est situé à cheval sur 4 pixels [4] sans contenir de centroïde d'aucun d'entre eux. Ainsi, si l'on emploie les deux méthodes de *rasterisation* présentées (Figure 7.3) on obtiendra soit une zone vide (variante A), soit une zone composée de 4 pixels (variante B). Pour que le raster produit par la première rasterisation soit non vide, il faudrait diviser la taille des pixels par 2 (environ), ce qui multiplierait le nombre de pixels par 4. Or, si cela ne pose pas de problème pour une petite zone, comme celle utilisée pour l'exemple, cela devient difficile, voire très difficile si l'on souhaite travailler sur une zone assez étendue (au-delà de la centaine de km^2).

Compte-tenu de ces limites, nous avons décidé d'opter pour la seconde approche, c'est-à-dire une *rasterisation* sélectionnant tous les pixels touchant *l'objet de référence.* Ce choix nous dispense de définir la résolution de la ZIR en fonction de la taille des *objets de référence* utilisés, mais conduit à une fréquente exagération de la taille des *objets de référence.*

7.2.2 Les différentes méthodes de *rasterisation*

La méthode de sélection des pixels ayant été fixée, le seul critère permettant de distinguer les différentes *méthodes de rasterisation* est la sélection de la partie de *l'objet de référence* à *rasteriser.* Ce choix est essentiel, car il contribue à définir la sémantique de la *relation de localisation atomique,* une même métrique calculée à partir de points différents d'un même *objet de référence* pouvant avoir des interprétations très diverses, comme nous l'avons montré

4. Dont chacun a une superficie de 625 m^2.

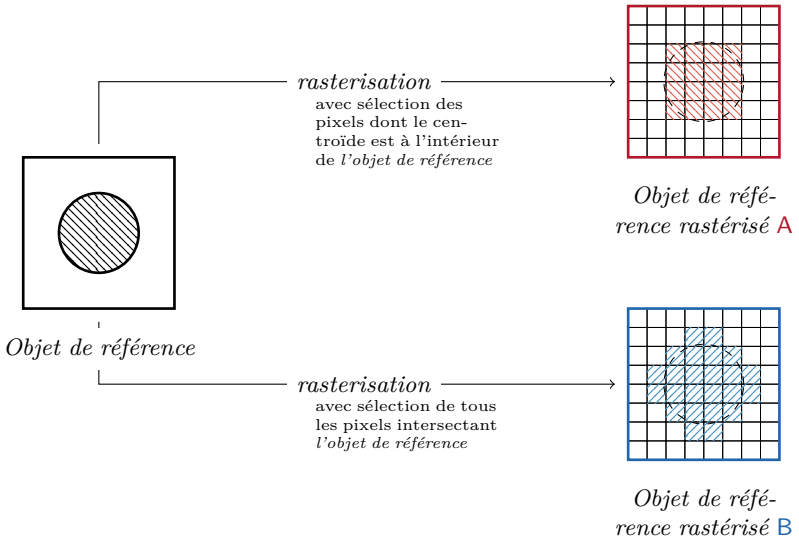


FIGURE 7.3 – Illustration de l'impact de la méthode de sélection des pixels sur le résultat d'une opération de *rasterisation.*

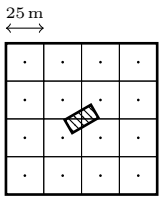


FIGURE 7.4 – Illustration d'une situation où la *rasterisation* aboutit à un raster vide

avec l'exemple des *relations de localisation atomiques* orla#`DistanceQuantitive` et orla#`ALaFrontiereDe` (section 7.1).

On peut imagier de nombreuses *méthodes de rasterisation* différentes en fonction de la partie de *l'objet de référence* sélectionné. Cependant, toutes ne sont pas pertinentes ici. Nous avons identifié trois *méthodes de rasterisation* différentes, présentées par la Figure 7.5. Le résultat de la *rasterisation* est présenté pour chaque type géométrique *d'objet de référence.*

Une première possibilité est de n'effectuer aucune sélection préalable et donc de *rasteriser l'objet de référence* dans son ensemble (Figure 7.5, première ligne). C'est cette solution, utilisée pour tous les exemples précédents (Figures 7.2, 7.3 et 7.4) qui est utilisée lorsque la *relation de localisation atomique* ne se réfère pas à une partie spécifique de *l'objet de référence.* C'est par exemple le cas des *relations* orla#`Interieur` ou orla#`Exterieur` qui s'appliquent à l'objet de référence dans son ensemble. On pourra remarquer que cette méthode de *rasterisation* s'applique à la majorité des *relations de localisation atomiques* définies jusqu'ici. En effet, le cas où la relation s'appuie sur l'objet de référence dans son ensemble est fortement majoritaire et seules quelques *relations de localisation atomiques* particulières nécessitent une méthode plus spécifique.

Mais il également possible de ne rasteriser qu'une partie de *l'objet de référence,* comme sa frontière ou son centroïde (Figure 7.5). Ainsi, la seconde méthode de rasterisation que nous avons définie : `Frontiere`, ne traite que la frontière de *l'objet de référence.* Comme on peut le voir sur la Figure 7.5, cette méthode n'impacte que la *rasterisation* des régions et des linéaires : les points, qui ne possèdent ni frontière, ni intérieur, sont toujours *rasterisés* des la même manière. Cette méthode a été développée pour *spatialiser* des *relations de localisation atomiques* se référant à la frontière et non à *l'objet de référence* dans son ensemble. C'est par exemple le cas d'une *relation de localisation atomique* comme orla#`ALaFrontiereDe`, décrivant une situation où le *sujet* est proche de la frontière de *l'objet de référence* et non de *l'objet de référence* (ce qui correspond à la relation orla#`PrèsDe`).

Enfin, un troisième *rasteriser,* ne traitant que le centroïde de *l'objet de référence,* a été défini. Contrairement aux autres méthodes de rasterisation présentées jusqu'ici, celui-ci conduit tout type géométrique d'objet (point, ligne, polygone) à être représenté par un seul point. Ainsi, tous les objets traités sont représentés pas un point, lui-même *rasterisé* en un unique pixel. Les utilisations de cette méthode de rasterisation sont un peu plus limitées. Nous l'employons pour spatialiser des *relations* exprimant un angle, comme orla#`DansLaDirectionDe`.

De nombreux autres *rasterisers* sont envisageables. On pourrait, par exemple, ne *rasteriser* que l'intérieur d'un objet et ignorer ses frontières, ce qui équivaudrait à soustraire le résultat du *rasteriser* `Frontiere` à celui du *rasteriser* `Geometrie`. On pourrait également ignorer les frontières intérieures des régions ayant une structure annulaire (*e.g.* une forêt avec des clairières), mais il est également possible d'employer des méthodes sensiblement différentes de celles présentées jusqu'ici, comme la *rasterisation* de l'enveloppe convexe ou de la boite englobante de *l'objet de référence.* De telles méthodes ne traitent plus de *l'objet de référence* ou l'une de ces composantes, c'est-à-dire un sous-ensemble de sa géométrie, mais d'une version modifiée de celui-ci. Cependant, aucune de ces solutions ne nous a semblé pertinente pour *spatialiser* des *relations de localisation atomiques.*

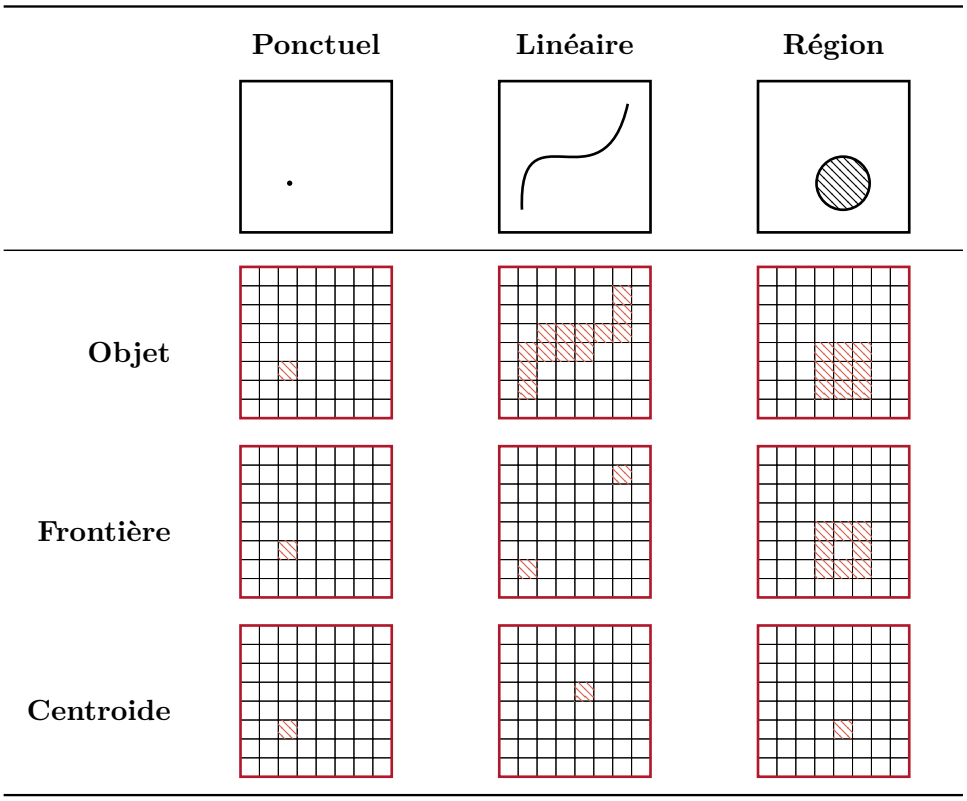


FIGURE 7.5 – illustration du raster résultant des différentes méthodes de *rasterisation* définies.

	Paramétriques	Non Paramétriques
Extrinsèques	`EcartAngulaire`, `DirectionDe`,`TempsDeMarche`	`Distance`,`DeltaAlt`
Intrinsèques		`Pente`

TABLE 7.1 – Types de métriques

7.3 Le calcul de la *métrique*

La seconde partie du processus de *spatialisation* est le *calcul de la métrique.* C'est durant cette phase qu'est calculée la mesure utilisée pour quantifier une grandeur que l'on veut représentative de la sémantique de la *relation de localisation atomique spatialisée.* Les *métriques* sont plus nombreuses et diverses que les *rasterisers.*

7.3.1 Classification

Les *métriques* que nous sommes amenées à construire peuvent être de nature et porter sur des phénomènes assez différents. Toutefois, on peut identifier une certaine récurrence dans leurs caractéristiques. Tout d'abord, certaines *métriques* quantifient des phénomènes exprimés par rapport à *l'objet de référence.* C'est par exemple le cas de la fonction que nous avons précédemment utilisée pour introduire la méthodologie de *spatialisation.* En effet, la valeur de cette fonction [5] calculée en un pixel dépend de la position et de la forme de *l'objet de référence :* si ce dernier change, la *métrique* change également. Cependant, des *métriques* comme la pente ou l'altitude, utilisées pour *spatialiser* des *indices de localisation* tels que : « Je suis à 2 500 m » ou « Nous sommes dans une zone de forte pente », ne dépendent pas d'un *objet de référence.* On parle dans ce cas de *métriques intrinsèques,* que l'on oppose aux *métriques extrinsèques,* telles que la distance à *l'objet de référence* ou une relation topologique. Un second critère peut être utilisé pour distinguer les *métriques.* En effet, certaines d'entre elles nécessitent un paramétrage pour être calculées. C'est par exemple le cas d'une *métrique* comme le temps de marche, qu'il est nécessaire de paramétrer en fonction de la vitesse de déplacement. Cependant, une grande partie des *métriques* ne nécessitent pas de paramétrage, c'est notamment le cas de la distance à *l'objet de référence* ou de l'altitude, déjà citées.

Le tableau 7.1 catégorise les différentes *métriques* présentées dans la section suivante en fonction de ces deux critères.

7.3.2 Les différentes *métriques*

Parmi tous les exemples que nous avons présentés, une *métrique* apparaît régulièrement : la *distance planimétrique* à *l'objet de référence.* Le processus de calcul de la *métrique* consiste à calculer, pour chaque pixel de la ZIR, la distance minimale à *l'objet de référence,* c'est-à-dire la distance au pixel, appartenant à *l'objet de référence* (défini lors de la *rasterisation*), le plus proche. Cette métrique a été utilisée lors de la *spatialisation* de *l'indice de localisation* « Je suis sous une ligne électrique » (Figure 6.3), mais elle est également utilisable pour spatialiser des relations topologiques tout en prenant en compte *l'imprécision* (*e.g.* deux objets très proches,

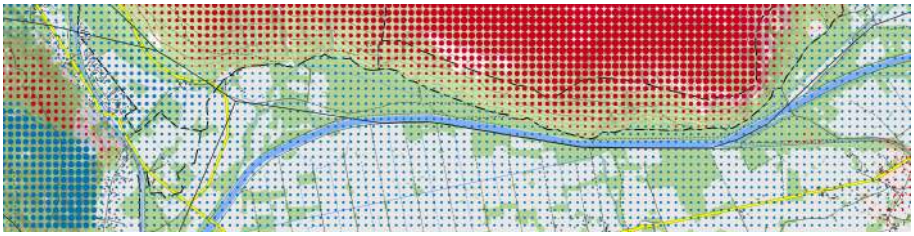
5. Qui, pour rappel, est de 1 si la position est confondue avec l'objet de référence et de 0 sinon.

mais qui ne partagent pas de positions peuvent, du point vue du requérant, être considérés comme en contact). Cette *métrique* est un exemple caractéristique des *métriques extrinsèques* et *non paramétriques.* Il est, en effet, nécessaire de la calculer pour chaque *objet de référence,* mais elle n'accepte pas de *paramètres.* On pourrait cependant en ajouter, par exemple en ajoutant un paramètre permettant d'employer d'autres distances, comme la distance de Manhattan, de Minkowski ou de Tchebychev. Cependant, nous avons estimé que ces distances alternatives, trop éloignées de la perception humaine des distances, ne présentent pas d'intérêt pour notre cas d'application.

Une autre *métrique,* également employée lors de la comparaison des implémentations (chapitre 6), est la différence d'altitude entre une position et *l'objet de référence.* Il s'agit d'une *métrique extrinsèque,* prenant en paramètre la méthode du calcul de l'altitude de référence, utilisée pour la comparaison. Comme nous l'avons précédemment indiqué (Tableau 5.3), plusieurs méthodes peuvent être employées pour sélectionner l'altitude à comparer. On peut par exemple calculer la différence d'altitude à partir des valeurs minimale, maximale ou moyenne de *l'objet de référence,* ce qui peut permettre une *spatialisation* plus ou moins stricte. Cependant, l'usage de ces valeurs de référence n'est pas pertinent pour des objets très étendus, comme des lignes électriques ou des forêts. C'est pourquoi, nous avons choisi de calculer par défaut cette différence à partir du pixel de l'objet de référence le plus proche. Dans cette configuration, la *métrique* `DeltaAlt` exprime alors une différence d'altitude contextuelle et non globale comme elle le ferait en calculant la différence par rapport au maximum ou au minimum. La Figure 7.6 donne un exemple — extrait de la spatialisation du *fil rouge* (chapitre 9) et de la comparaison des implémentations (chapitre 6) — du calcul de cette *métrique.* La différence d'altitude est ici calculée par rapport à l'altitude du pixel, de la ligne électrique, le plus proche. Une amélioration possible de cette *métrique* serait d'ajouter de nouveaux paramètres permettant de comparer l'altitude par rapport à des extremums locaux, par exemple, en prenant pour point de comparaison le minimum (ou le maximum ou la moyenne) de la zone la plus proche de *l'objet de référence.* Cette approche permettrait une plus grande finesse de *spatialisation,* en permettant des configurations plus fines. Cependant, la solution retenue par défaut à l'avantage d'être suffisamment robuste pour fonctionner dans toutes les situations que nous avons rencontrées et ce sans ajustements *ad hoc.* La métrique `DeltaAlt` peut également être utilisée pour calculer une différence par rapport à une altitude donnée explicitement, comme dans *l'indice de localisation,* « Il est à 300 mètres d'altitude. »

Pour *spatialiser* les *relations de localisation atomiques* directionnelles, la *métrique* `EcartAngulaire` a été développée. Il s'agit d'une *métrique* extrinsèque et paramétrique. `EcartAngulaire` est destinée à mesurer l'écart à une orientation donnée, fixée par un paramètre « angle » et exprimée à partir de *l'objet de référence.* Cette *métrique* est employée pour *spatialiser* l'ensemble des *relations de localisation atomiques* décrivant une orientation générale, comme les relations de cardinalité (*e.g.* `orla#AuNordDe`). La Figure 7.7 donne un exemple de cette *métrique.* À partir d'un point donné (au centre de la figure) et d'une direction (l'angle supérieur droit), on construit une demi-droite faisant office de direction de référence. Puis, pour chaque pixel, on calcule l'écart angulaire (modulo 2π) entre la direction de référence et la demi-droite reliant *l'objet de référence* à ce point. Sur la Figure 7.7, la valeur absolue de cet angle est figurée avec une variation de taille, et son signe par une variation de couleur. Cette *métrique* peut être utilisée pour *spatialiser* différentes *relations de localisation atomiques.*

Bien qu'elle puisse être utilisée à cet effet, la *métrique* `EcartAngulaire` n'est pas très adaptée à la *spatialisation* de *relations de localisations* qualifiant un déplacement vers un *objet de référence,* comme `orl#DansLaDirectionDe`. En effet, un déplacement dans une direction



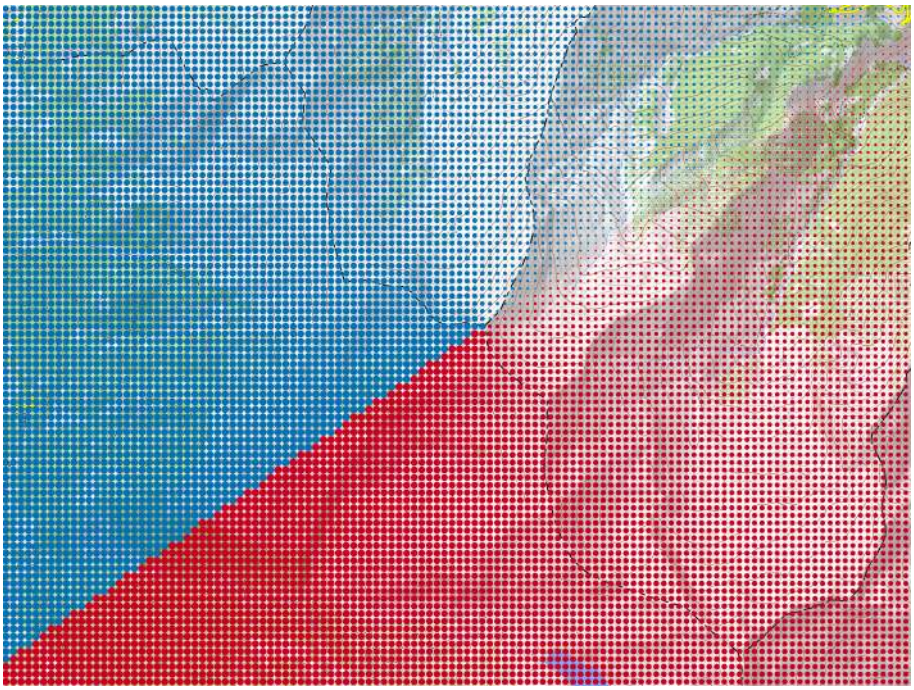
Différence d'altitude avec la ligne électrique :

500 m

$< -500\,\mathrm{m}$ 0 m $> 500\,\mathrm{m}$

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 7.6 – Exemple d'une *métrique* issue de la *spatialisation* du *fil rouge,* la différence d'altitude par rapport au pixel le plus proche de *l'objet de référence.*



Écart angulaire à la demi-droite passant par le centre et orientée au nord-est :

500 m

180 ° 0 ° −180 °

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 7.7 – Exemple du calcul de la *métrique* `EcartAngulaire` pour un point et une direction donnée.

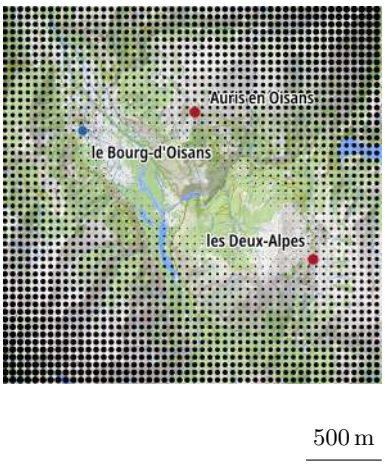


FIGURE 7.8 – Exemple du calcul de la *métrique* `DirectionDe`

globale peut conduire à s'éloigner ponctuellement de cette direction sans que l'on puisse considérer que la *relation de localisation spatialisée* soit fausse. Pour prendre en considération ces cas, nous avons développé une *métrique ad hoc,* `DirectionDe`, destinée à quantifier l'éloignement à un déplacement dans une direction donnée. On commence — comme pour la *métrique* `EcartAngulaire` — par définir un segment entre le centre du *l'objet de référence,* le point de départ, et le centre du second *objet de référence,* la destination. Ce segment définit la direction de référence, à partir de laquelle la *métrique* calcule un écart. On ne peut cependant pas calculer cet écart de la même manière que pour la *métrique* `EcartAngulaire`, cette mesure ne permettant pas de représenter des contournements ou des détours qui sont fréquents lors du suivi d'un itinéraire, d'autant plus dans un milieu montagneux. Nous avons donc opté pour la définition d'une ellipse, dont la longueur des deux demi-axes est proportionnel au segment reliant les deux *objets de référence.* Cette forme permet de définir une direction globale. L'écart à cette direction globale peut ensuite être calculé à l'aide d'une simple distance à l'ellipse. Une illustration de cette *métrique* est présentée sur la Figure 7.8.

D'autres *métriques,* plus spécifiques (*i.e.* employées par un petit nombre de *relations de localisation atomiques*), ont également été développées. C'est par exemple le cas de `TempsDeMarche` ou `PartVisible`, respectivement utilisées pour la *spatialisation* des *relations de localisation* `orla#CibleVoitSite` (et son opposée `orla#SiteVoitCible`) et `orla#ADistanceTemps`[6].

La *métrique* `TempsDeMarche` est une *métrique* extrinsèque, sans paramètre. Sa fonction est de calculer la durée minimale de déplacement nécessaire pour atteindre chaque pixel de la ZIR à partir de *l'objet de référence.* Le calcul de cette *métrique* peut s'effectuer avec un modèle de temps de marche tels que ceux présentés dans le chapitre 3 (voir Figure 3.19). Ces modèles peuvent calculer, à partir d'un raster de pente, la durée de traversée d'un pixel. Cette information est intrinsèque, elle peut donc être pré-calculée et réutilisée à chaque calcul de la *métrique.* À partir de cette information et de *l'objet de référence* rasterisé, il est ensuite possible de calculer le temps de parcours minimal de *l'objet de référence* à chaque pixel de la ZIR. Dans notre cas, nous avons décidé de calculer la durée de franchissement à l'aide du modèle de TOBLER (1993) (voir Équation 3.33), ce dernier présentant l'avantage d'être robuste

6. Ces trois *relations de localisation atomiques* peuvent être utilisées directement. Elles sont par conséquent également présentes dans ORL (Appendice B).

et paramétrable en fonction de la nature du terrain. On peut ainsi faire évoluer la méthode en modifiant la durée de franchissement en fonction de la nature du terrain.

Les deux dernières *métriques* que nous avons développées, `PartVisible` et `PartVue`, sont également des *métriques* extrinsèques et non paramétriques. Elles sont toutes deux destinées à *spatialiser* des *relations de localisations* traitant de visibilité. Ces deux *métriques* sont très similaires, si ce n'est que la première calcule une zone de visibilité active à partir de *l'objet de référence* (*i.e.* quels sont les pixels vus depuis *l'objet de référence*) et la seconde, une visibilité passive (*i.e.* quels sont les pixels qui voient *l'objet de référence*). La première *métrique* est utilisée pour *spatialiser* `orla#SiteVoitCible` et la seconde pour *spatialiser* `orla#CibleVoit-Voit`. La visibilité est généralement calculée de manière binaire : on vérifie si chaque pixel de la zone étudiée voit ou non un objet. Le problème d'une telle *métrique* est qu'elle ne nous permet pas de définir une visibilité *imprécise.* La zone étudiée est considérée comme visible ou non. Des pistes pour une modélisation *imprécise* de la visibilité ont été proposées par Fisher (1991, 1992). Une des solutions proposées étant d'étudier la variation des zones de visibilité en fonction des modifications du MNT de référence, pour identifier les zones où la visibilité est la plus variable et donc potentiellement la plus *imprécise.* Nous avons cependant opté pour une autre approche, considérant que *l'imprécision* de la visibilité doit quantifier la qualité de la perception de *l'objet de référence* que la qualité des données servant à son calcul. Nous avons donc construit des *métriques* calculant la part visible de *l'objet de référence.* Ainsi, pour chaque pixel de la ZIR, nous calculons, non pas si *l'objet de référence* est visible, mais quelle est la part de ses pixels qui le sont. On obtient alors un raster dont les valeurs varient de 0, lorsque l'objet n'est pas visible, à 1 lorsque tous les pixels qui le représentent le sont. On peut voir une illustration du calcul de la *métrique* `Partvisible` sur la Figure 7.9. Dans cet exemple, la taille du figuré représente la part de *l'objet de référence* (le lac au centre de l'image) qui est visible depuis chaque pixel.

7.4 La *fuzzyfication* de la *métrique*

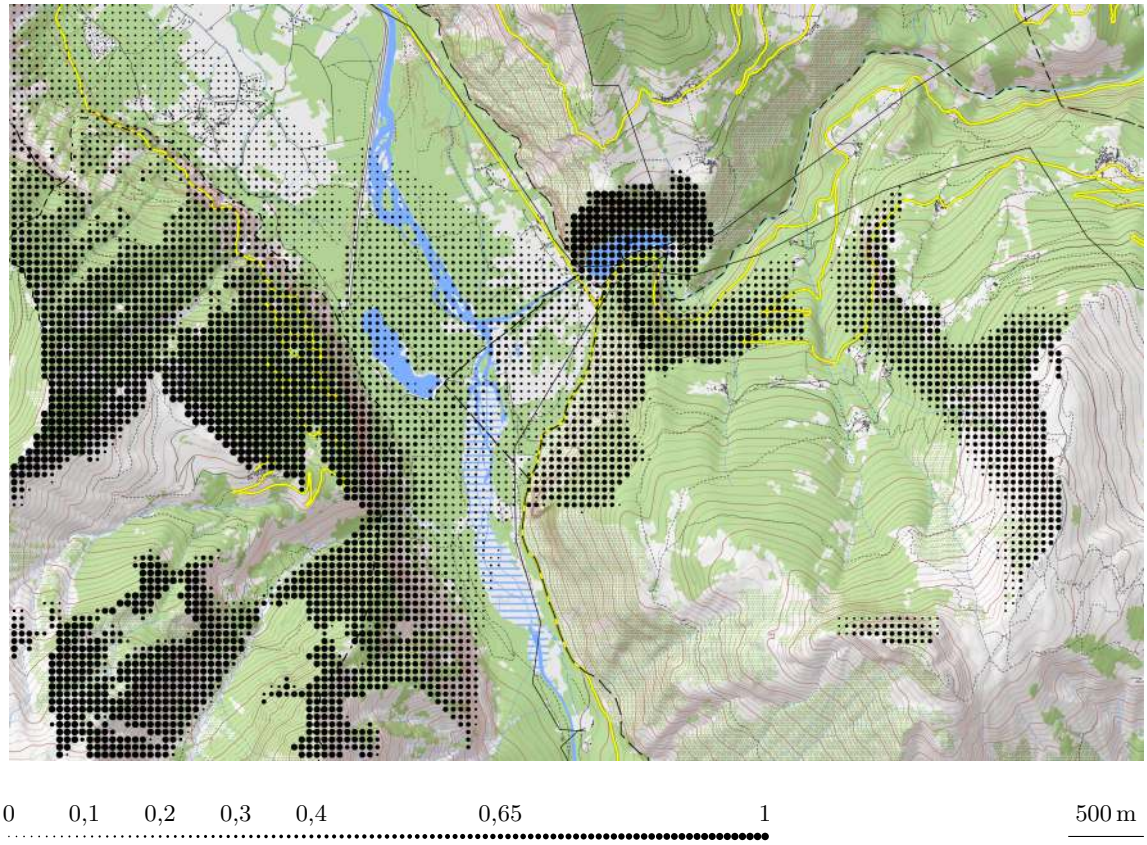
Une fois que la *métrique* identifiée pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* a été calculée, il est nécessaire de la *fuzzyfier* pour construire la *zone de localisation compatible.* Comme nous l'avons expliqué lors de la définition de la *méthode de spatialisation* (section 7.1), la *fuzzyfication* a deux rôles : le premier — illustré par la Figure 7.1 — consiste à sélectionner les pixels pour lesquels la valeur de la *métrique* correspond à ce qui est attendu au sein de la ZLC, le second est de produire une *zone de localisation compatible* floue, transcrivant *l'imprécision* de la *relation de localisation atomique.*

7.4.1 La méthode de *fuzzyfication*

Un simple filtre binaire, comme celui utilisé pour l'exemple de la Figure 7.1, ne permet pas de remplir les deux fonctions mentionnées ci-dessus. Nous devons donc étendre cette méthode pour lui permettre de générer des ZLC floues. Pour ce faire, on peut se tourner vers la sélection floue

À titre d'exemple, la Figure 7.10 présente une version améliorée de l'exemple de la Figure 7.1. La *métrique* a été remplacée par la distance euclidienne. Les valeurs de la *métrique* sont alors filtrées à l'aide de deux fonctions d'appartenance, transformant les valeurs de la *métrique*[7] en

7. Dont le domaine est $\mathbb{R}^+$.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 7.9 – Exemple d'une *métrique* issue de la *spatialisation* du *fil rouge :* la part de la surface visible d'un lac donné.

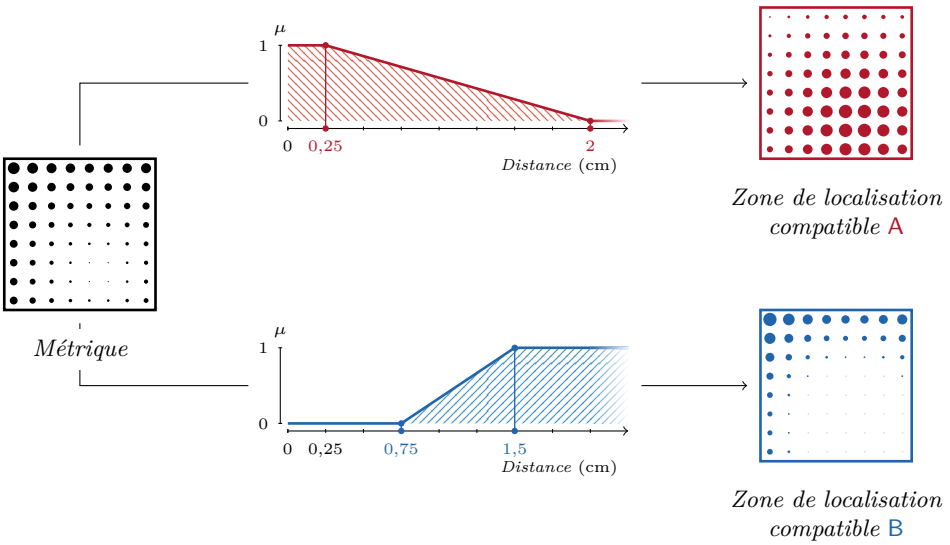


FIGURE 7.10 – Illustration de la construction de *zones de localisation compatibles* à partir d'une même *métrique* et de *fuzzyficateurs* différents.

un *degré d'appartenance.* La première *fonction d'appartenance* (définissant la ZLC A) attribue un degré d'appartenance maximal, lorsque la distance[8] est inférieure ou égale à 0,25 cm (soit le côté d'un pixel), puis le degré d'appartenance décroit jusqu'à atteindre 0 lorsque la distance est de 2 cm ou plus. La seconde *fonction d'appartenance* (cf. ZLC B) attribue un degré nul jusqu'à un éloignement de 0,75 cm, puis croit jusqu'à atteindre la valeur de 1 pour les éloignements supérieurs ou égaux à 1,50 cm. Comme on peut le constater, les *zones de localisation compatibles*, A et B, résultant de ces deux *fuzzyfications* ont une structure spatiale différente, pouvant approcher la sémantique de certaines *relations de localisation atomiques.* La *zone de localisation compatible* A peut, par exemple, être rapprochée de la sémantique de la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe`, alors que la ZLC B renvoie plutôt à une modélisation floue d'une *relation* telle que `orla#ExterieurDe`. Ainsi, comme le montre cet exemple, on peut étendre la logique de *spatialisation* en trois étapes utilisées pour construire la Figure 7.1 à un cadre flou.

Une autre conclusion que l'on peut tirer de la Figure 7.10 est la faible importance de la valeur des seuils, comparativement à la forme globale de la *fonction d'appartenance.*

Comme nous l'avons mentionné précédemment (chapitre 5), le choix de la forme de la fonction d'appartenance est essentiel à la *spatialisation,* puisqu'il définit la sémantique de la fonction d'appartenance.

7.4.2 Les différents *fuzzyficateurs*

Nous proposons la définition de trois fonctions de *fuzzyfication* principales, déclinées en plusieurs variantes, portant le total des *fuzzyficateurs* à sept.

Le premier d'entre eux est le *fuzzyficateur* `EqVal`, qui définit une fonction d'appartenance triangulaire (Figure 7.11a). L'objectif de ce *fuzzyficateur* est de décrire des situations où la *zone de localisation compatible* est définie par un ensemble de pixels dont la valeur de la métrique

8. Exprimée en centimètres à l'échelle de la feuille.

est égale à une valeur donnée. C'est par exemple le cas pour une *relation de localisation atomique* comme `orla#DistanceQuantitativePlanimétrique`, définissant une ZLC située à un éloignement donné de *l'objet de référence* (*e.g.* « à 50 m »), ou pour la *relation* `orla#AltEq`, définissant une ZLC située à une altitude donnée. La forme triangulaire de cette *fonction d'appartenance,* permet d'attribuer un degré d'appartenance non nul aux pixels ayant une valeur de la *métrique* proche de celle attendue. Ainsi, si l'on souhaite construire la ZLC à 100 mètres de *l'objet de référence,* on pourra, en fonction des seuils fixés, inclure des positions situées à 75 ou 110 mètres de *l'objet de référence.* De la même manière, ce *fuzzyficateur* permet de prendre en considération des pixels situés à une altitude donnée. La « largeur » de la fonction est définie par un paramètre *delta*, indiquant l'écart entre la valeur de la métrique minimale permettant d'obtenir un degré d'appartenance supérieur à 0 (x_1) et la valeur de la métrique maximale pour obtenir un degré d'appartenance supérieur à 0 (x_2). La fonction d'appartenance du *fuzzyficateur* `EqVal` est donc définie de la manière suivante :

$$f(x, v, \delta) = \begin{cases} \dfrac{x - x_1}{\Delta x} & \text{si } v - \frac{\delta}{2} \leq x \leq v \\ \dfrac{x_2 - x}{\Delta x} & \text{si } v \leq x \leq v + \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{si } x < v - \frac{\delta}{2} \text{ ou } x > v + \frac{\delta}{2} \end{cases} \tag{7.1}$$

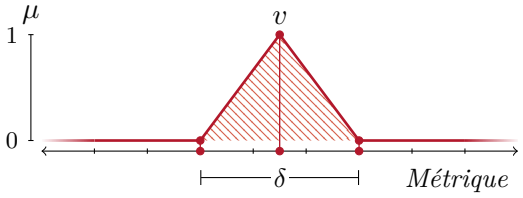
Avec x la valeur de la *métrique,* v la valeur de référence et δ l'écart à la valeur de référence.

Au fil de la *spatialisation* de nouvelles *relations de localisation atomiques.* Il s'est avéré que nous recourions fréquemment à des métriques relatives, comme la différence d'altitude par rapport à *l'objet de référence,* c'est pourquoi nous avons construit un second *fuzzyficateur,* `EqVal0`, spécialisant le premier 7.11c. Il s'agit également d'une *fonction de fuzzyfication* triangulaire et symétrique, dont la « largeur » est définie par un paramètre δ. Cependant, son paramètre v, indiquant la valeur de la *métrique* sur laquelle la courbe est centrée, est fixé à 0, sa fonction d'appartenance est donc : $f(x, \delta) = f_{EqVal}(x, 0, \delta)$. Nous avons également défini une seconde variante de ce *fuzzyficateur,* `EqAngle`, fortement similaire à `EqVal`, mais destinée aux cas spécifiques où la *métrique* est un angle. Ce *fuzzyficateur* permet donc de traiter ces valeurs en prenant en compte leur périodicité.

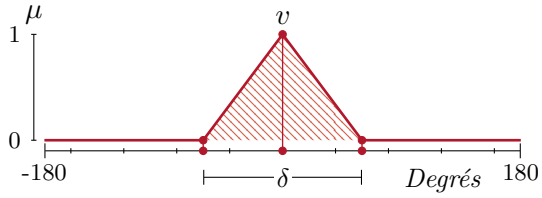
Le second *fuzzyficateur,* `SupVal`, est destiné à représenter des situations où les valeurs de la *métrique* doivent être supérieures à un seuil v. On considère que toutes les valeurs supérieures ou égale à ce seuil ont un degré d'appartenance maximal. À l'inverse on tolère des valeurs inférieures à ce seuil, dans la mesure d'un paramètre δ. Ce *fuzzyficateur* prend la forme d'une fonction d'appartenance linéaire par morceaux (Figure 7.12a), dont l'équation est :

$$f(x, v, \delta) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > v \\ \dfrac{x - x_1}{\Delta x} & \text{si } v - \delta \leq x \leq v \\ 0 & \text{si } x < v - \delta \end{cases} \tag{7.2}$$

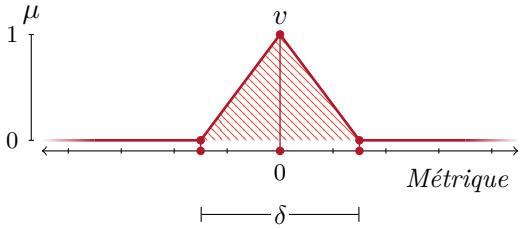
Avec x la valeur de la *métrique,* v la valeur référence et δ l'écart à cette valeur. Comme pour le *fuzzyficateur* `EqVal` une variante de ce *fuzzyficateur,* dont la *valeur de référence* (v) est fixée à 0 a été définie, `SupVal0`. Sa *fonction d'appartenance* est : $f(x, \delta) = f(x, 0, \delta)$.



(a) *Fonction d'appartenance* pour `EqVal`

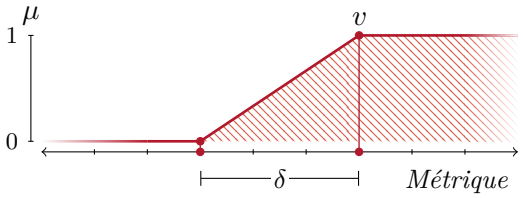


(b) *Fonction d'appartenance* pour `EqAngle`

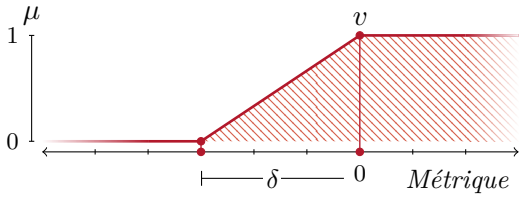


(c) *Fonction d'appartenance* pour `EqVal0`

FIGURE 7.11 – *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* `EqVal` et de ses dérivés `EqVal0` et `EqAngle`.

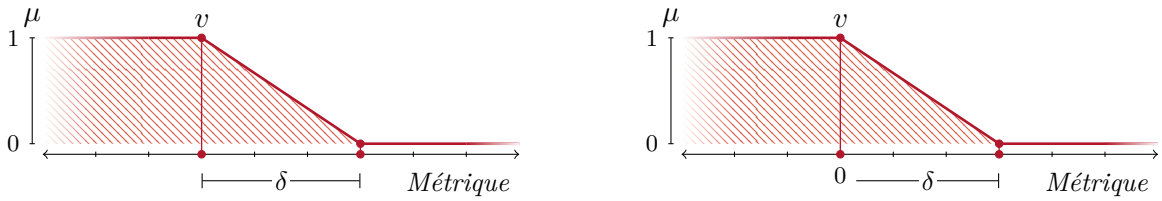


(a) *Fonction d'appartenance* pour `SupVal`



(b) *Fonction d'appartenance* pour `SupVal0`

FIGURE 7.12 – *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* `SupVal` et de son dérivé `SupVal0`.



(a) *Fonction d'appartenance* pour `InfVal`

(b) *Fonction d'appartenance* pour `InfVal0`

FIGURE 7.13 – *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* `InfVal` et de son dérivé `InfVal0`.

Le dernier *fuzzyficateur,* `InfVal`, est l'exact opposé de `SupVal`. Son objectif est de représenter des situations où l'on souhaite sélectionner les pixels dont la *métrique* est inférieure à un seuil v, donné. Toutes les valeurs inférieures à ce seuil ont un degré d'appartenance maximal, qui diminue linéairement lorsque la valeur de la métrique dépasse le seuil v, jusqu'à devenir nul à $v + \delta$. Ce *fuzzyficateur* est défini à l'aide de la fonction d'appartenance suivante :

$$f(x, v, \delta) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < v \\ \dfrac{x_2 - x}{\Delta x} & \text{si } v \leq x \leq v + \delta \\ 0 & \text{si } x < v + \delta \end{cases} \tag{7.3}$$

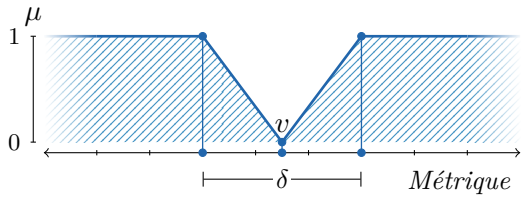
Où x est la valeur de la *métrique,* v la valeur référence et δ l'écart à la valeur de référence. De la même manière que les autres fuzzyficateurs, `InfVal` dispose d'une variante, `InfVal0` dont la *valeur de référence* (v) est fixée à 0. Son équation est donc : $f(x, \delta) = f(x, 0, \delta)$.

7.4.3 Les *modifieurs*

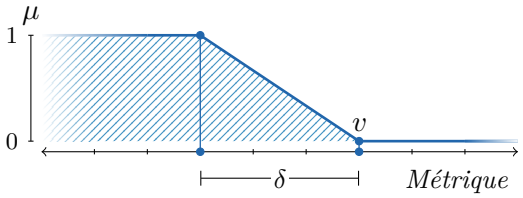
La seule utilisation des *fuzzyficateurs* définis jusqu'à présent ne permet cependant pas de traiter toutes les situations rencontrées dans notre corpus d'alertes. En effet, il n'est pas vraiment possible de formaliser des *indices de localisation* ayant une tournure négative (*e.g.* « Je ne suis pas au niveau du plateau ») ou utilisant des approximations (*e.g.* « Elle est presque à côté de moi »). Certes, certaines *relations de localisation atomiques* ont des opposés (*e.g.* `orala#Interieur` et `orala#Exterieur`), mais il s'agit de cas particuliers et il n'est, par exemple, pas prévu dans l'ontologie ORL de définir une *zone de localisation compatible* à partir de ce qui n'est pas vu, ou qui n'est pas à la même altitude[9]. Pourtant, ces cas seraient modélisables avec les *rasterisers* et les *métriques* déjà définies, seuls de nouveau *fuzzyficateurs* seraient à définir.

C'est pour traiter ces situations que nous avons développé la notion de *modifieurs.* Les *modifieurs* sont — de la même manière que les *rasterisers,* les *métriques* et les *fuzzyficateurs* — des concepts formalisant la sémantique d'une *relation spatiale atomique* et correspondant à un algorithme appliqué lors de la *phase de spatialisation.* Cependant, ils possèdent la particularité d'être facultatifs, la plupart des *relations de localisation atomiques* en sont dépourvues, et cumulatifs, une même *relation* pouvant en utiliser plusieurs. Les *modifieurs* sont appliqués à la fin de la *spatialisation* (Figure 7.2), après la *fuzzyfication.* Dans cette configuration, la *zone de*

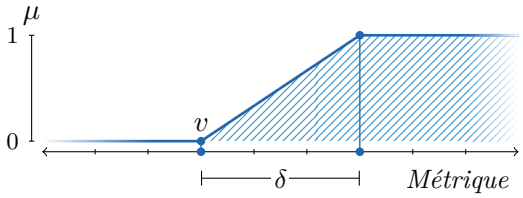
9. Il n'existe pas de *relations* `orla#SiteNeVoitPasCible` ou `orla#PasALaMemeAltitudeQue`.



(a) *Fonction d'appartenance* pour `EqVal` avec le *modifieur* `Not`



(b) *Fonction d'appartenance* pour `SupVal` avec le *modifieur* `Not`



(c) *Fonction d'appartenance* pour `InfVal` avec le *modifieur* `Not`

FIGURE 7.14 – Fonctions d'appartenance des *fuzzyficateurs* `EqVal`, `SupVal`, et `InfVal` après application du *modifieur* `Not`.

localisation compatible n'est donc pas le résultat de la *fuzzyfication*[10], mais de l'application des *modifieurs* au résultat de la *fuzzyfication.* Les *modifieurs* modifient les *degrés d'appartenance* issus de la phase de *fuzzyfication,* de manière à modifier la *zone de localisation compatible.* Ils n'agissent donc pas directement sur la forme de la *fonction d'appartenance* définie par le *fuzzyficateur,* mais sur les *degrés d'appartenance* résultant de son application. Toutefois, cette opération est équivalente à un changement de *fonction d'appartenance.* Ainsi, ce *modifieur* peut être utilisé pour simuler un changement de forme de la *fonction d'appartenance.*

Le premier (et le plus utilisé) des *modifieurs* développés est le *modifieur* `Not`. Sa fonction est de permettre la définition de l'opposée d'une *relation de localisation atomique.* Par exemple, si l'on applique ce *modifieur* à la *relation de localisation atomique* `orla#ALaFrontiereDe`, on obtiendra son opposé, c'est-à-dire une *relation de localisation atomique,* que l'on pourrait appeler `orla#NotALaFrontiereDe`, qui serait *spatialisable* en vérifiant si, pour chaque pixel de la ZIR, l'assertion « Est-ce que la *relation de localisation* `orla#ALaFrontiereDe` est vraie » est fausse. Or, puisque l'on sait comment construire la ZLC correspondant à la *relation de localisation* `orla#ALaFrontiereDe`, on peut, en prenant le complémentaire de la *zone de localisation,* construire la ZLC correspondant à la *relation de localisation atomique* `orla#NotALaFrontiereDe`. Comme nous l'avons expliqué dans le Équation 3.6 (chapitre 3), le complémentaire d'un *sous-ensemble flou* peut être construit en soustrayant le degré d'appartenance de chaque élément de l'ensemble (ici les pixels) à 1. Cette démarche est parfaitement équivalente à la définition de nouveaux *fuzzyficateurs,* opposés à ceux précédemment définis (Figure 7.14). Ainsi, appliquer le *modifieur* `Not` au résultat d'une *spatialisation* employant le *fuzzyficateur* `EqVal` équivaut à utiliser directement un hypothétique *fuzzyficateur* `NotEqVal` (Figure 7.14a).

De nombreux autres *modifieurs* sont envisageables, notamment pour permettre une meilleure modélisation des *indices de localisation* contenant des nuances, comme dans les *indices de*

10. Comme l'indique la Figure 7.2, qui présente la *méthode de spatialisation* sans modifieurs.

localisation « Je suis presque en face du barrage », « Nous sommes juste en dessous de la route », *etc.* L'utilisation d'adverbes, tels que « juste » ou « presque » a pour but de nuancer le propos et donc d'affiner la description d'une position. Par conséquent, les ZLC issues de la *spatialisation* de tels *indices de localisation* doivent se voir légèrement modifiées, de manière à retranscrire la sémantique des adverbes. Pour ce faire, on peut définir des *modifieurs* modifiant la valeur des degrés d'appartenance de chaque pixel. Par exemple, *l'indice de localisation* : « Je suis presque à la frontière de cette forêt », pourra être modélisé en ajoutant le *modifieur* `Presque` à la *relation de localisation atomique* `orla#ALaFrontiereDe`, déjà présentée. Pour modéliser le fait que cette description soit rendue moins *précise* par l'utilisation du terme « presque, » les pixels ayant un degré d'appartenance supérieur à un certain seuil (*e.g.* 0,6) pourraient voir leur degré d'appartenance ramené à 1 et les autres valeurs seraient recalculées à l'aide d'une interpolation linéaire, de manière à conserver une fonction d'appartenance continue. À l'inverse, un *indice de localisation* comme « Je suis juste en face », pourrait être modélisé avec un *modifieur* ramenant à zéro, les degrés d'appartenance supérieurs à un seuil défini. Pour mettre en place cette solution, nous avons défini un second *modifieur* générique, `Resampling`. Son but est de servir de support à la définition de nouveaux *modifieurs* plus spécifiques, à l'image de `Presque` ou `Juste`.

Comme on peut le constater avec ces deux exemples, le mécanisme des *modifieurs* peut influer, non pas sur la forme globale des *fonctions d'appartenance* définies par le *fuzzyficateur,* mais sur leurs seuils. L'écartement (δ), définissant notamment la valeur de la *métrique* à partir de laquelle le degré d'appartenance est nul, ne peut, par exemple, pas être modifié. Ainsi, si l'on peut modifier la pente d'une *fonction d'appartenance* avec le *modifieur* `Resampling` ou l'inverser avec le *modifieur* `Not`, il sera impossible de modifier la valeur des seuils. Les *modifieurs* ne sont donc qu'un mécanisme supplémentaire permettant de raffiner la *spatialisation* mais leur utilisation ne peut dispenser d'une bonne sélection du *rasterizer,* de la *métrique* et du *fuzzyficateur.*

La possibilité de cumuler plusieurs *modifieurs* pose un problème jusqu'ici inédit, celui de l'influence de l'ordre du traitement sur le résultat final. En effet, si une *relation de localisation atomique* fait appel au *modifieur* `Not` et à un *modifieur* dérivé de `Reseampling` (par exemple pour modéliser *l'indice de localisation* : « Je ne suis pas très proche du sommet »), il est nécessaire d'évaluer l'ordre de leur application, l'application du *modifieur* `Not` au résultat de l'application du *modifieur* `Très` à la *zone de localisation* spatialisée n'étant pas identique à l'application du *modifieur* `Très` au résultat de l'application du *modifieur* `Not` à la *zone de localisation* spatialisée[11]. Nous avons contourné ce problème en définissant un ordre de priorité des *modifieurs* en fonction de leur type. Nous sommes parti du principe que la négation s'appliquait toujours à l'ensemble de *l'indice de localisation,* et donc qu'elle devait être appliquée en dernier. Ainsi, le *modifieur* `Not` a une priorité minimale. À l'inverse, comme nous n'avons identifié aucune situation ou un *modifieur* dérivé de `Resampling` devait être appliqué après le *modifieur* `Not`, nous avons attribué une priorité plus forte au `Resampling` et ces dérivés. Cette solution ne permet cependant pas de gérer les situations où plusieurs *modifieurs* dérivés de `Resampling` sont appliqués. Cependant ce cas, que nous n'avons par ailleurs jamais rencontré dans des alertes, nous semble hautement improbable, si ce n'est dans des formulations hyperboliques, utilisant la répétition, telles que : « Je suis très très proche », mais où ce problème ne se pose pas, car le même *modifieur* est employé.

11. Dit autrement, si N est la fonction appliquant le *modifieur* `Not`, T est la fonction appliquant le *modifieur* `Tres` et S est le résultat de la *spatialisation* avant l'application des modifieurs, alors $N(T(S)) \neq T(N(S))$.

7.5 Représenter des connaissances *relatives à la spatialisation*

Dans le chapitre 5, nous avions abordé la question de la représentation des règles de décomposition des *relations de localisation* et avions décidé de les représenter dans une ontologie *ad hoc,* ORLA. Cette solution présentait le double avantage de proposer une formalisation des règles qui soit lisible par un être humain tout en les centralisant, ce qui à terme favorise leur compréhension, leur maintien et leur évolution. Une question similaire se pose à présent : celle de la représentation des règles de *spatialisation* des *relations de localisation atomiques.* Il est à nouveau possible de représenter ces règles dans une ontologie, nous avons donc décidé de les intégrer à ORLA. Pour permettre une bonne représentation des règles de *spatialisation,* il est nécessaire de spécifier quelques contraintes, comme nous l'avions fait dans la section 5.1. Tout d'abord, toute *relation de localisation atomique* doit, pour être spatialisée, être liée à un *rasteriser,* une *métrique,* un *fuzzyficateur,* et optionnellement à un *modifieur.* Comme pour les *relations de localisation,* nous ne permettons pas l'existence de règles concurrentes : une *relation de localisation atomique* donnée ne correspond qu'à une *méthode de spatialisation* et inversement [12]

Pour représenter les règles de spatialisation dans *l'ontologie des relations de localisation atomiques,* nous avons défini quatre nouvelles relations : `orla#hasRasteriser`, `orla#hasMetrique`, `orla#hasFuzzyfier` et `orla#hasModifieur`. Chacune de ces nouvelles relations lie une *relation de localisation atomique* à une classe représentant, respectivement, une méthode de *rastérisation,* une méthode de calcul d'une *métrique,* une méthode de *fuzzyfication* et une méthode appliquant un *modifieur.* Ainsi, les *relations de localisation atomiques* ne sont pas seulement définissables comme des *relations de localisation* desquelles ne proviennent aucune relation `orla#hasRelationSpatialeAtomique` [13], mais également comme des *relations de localisation* auxquelles sont associés un *rastériser,* une *métrique* et un *fuzzyfier* (*i.e.* à l'origine d'une relation `orla#hasRasteriser`, `orla#hasMetrique` et `orla#hasFuzzyfier`). La *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique* peut alors être simplement effectuée en calculant, successivement, la *rastérisation,* la *métrique,* sa *fuzzyfication* et, le cas échant, le *modifieur,* définis dans ORLA pour cette *relation.*

Par exemple, la *relation de localisation atomique* `orl#SousAltitude` — notamment utilisée pour définir la *relation* `orl#SousProcheDe` (chapitre 5) — définit une *zone de localisation compatible* dont toutes les positions ont une altitude inférieure à celle de *l'objet de référence* (Figure 7.15). Pour *spatialiser* cette *relation de localisation atomique,* il faut tout d'abord définir un *rasteriser.* Ici, il n'y a pas de raison de se focaliser sur une partie spécifique de *l'objet de référence,* la position est sous l'objet dans son ensemble et non une de ces parties. Le *rasteriser* le plus adapté est donc `orla#Geometrie`. Le choix de la *métrique* est un peu plus difficile. On peut, en effet, se questionner sur l'altitude à considérer pour *l'objet de référence :* doit-on considérer le point le plus haut, le plus bas, le plus proche ? Ou bien doit-on utiliser un indicateur de centralité, comme la moyenne ? Tous ces critères paraissent pertinents, mais l'altitude de la position la plus proche nous semble être la solution la plus générique, car la moins sensible aux fortes variations d'altitudes que l'on pourrait retrouver sur des objets très étendus (*e.g.* vallées, forêts, *etc.*). Ainsi nous avons opté pour la *métrique* `orla#DeltaNearestVal`. Le choix du *fuzzyficateur* ne pose, quant à lui, pas de problèmes particuliers. En effet, la *métrique* `orla#DeltaNearestVal` calcule, pour chaque pixel de la ZIR, la différence entre

12. Conformément à la règle d'unicité des *relations de localisations atomiques* formulée dans le chapitre 5.
13. Comme nous l'indiquions dans le chapitre 5.

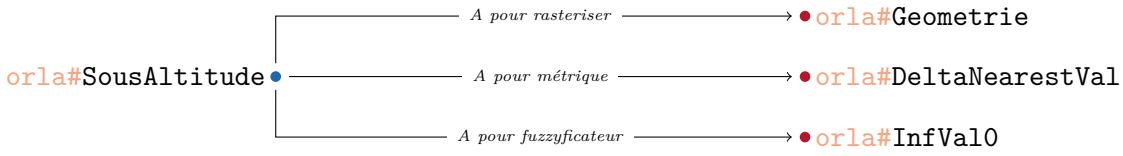


FIGURE 7.15 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#SousAltitude.

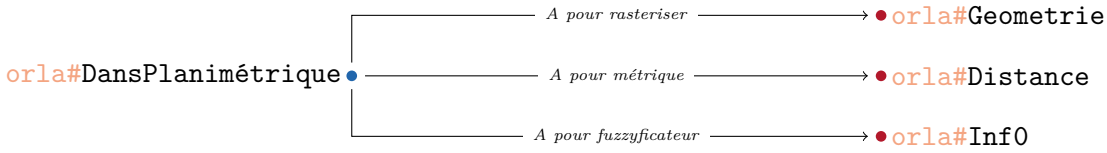


FIGURE 7.16 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#DansPlanimétrique.

l'altitude locale et l'altitude du pixel de *l'objet de référence* le plus proche. Ainsi, les pixels dont l'altitude est supérieure à celle du point le plus proche sur *l'objet de référence,* auront une valeur de *métrique* positive et les pixels dont l'altitude est inférieure à celle du point le plus proche sur *l'objet de référence* — que l'on souhaite conserver — auront une valeur de *métrique* négative. On peut donc utiliser le *fuzzyficateur* orla#InfZero, spécialement adapté à cette configuration.

On peut définir la *relation de localisation atomique* orla#DansPlanimétrique en reprenant presque tous les éléments utilisés pour la *spatialisation* de orla#SousAltitude (Figure 7.16). Tout d'abord, cette *relation* porte sur *l'objet de référence* dans son ensemble, il est donc nécessaire d'employer à nouveau le *rasteziser* orla#Geometrie. Le choix de la *métrique* nécessite plus de questionnements. Dans l'exemple de la Figure 7.1, nous avions utilisé les matrices 4IM pour modéliser une relation topologique. Mais cet exemple ignorait la question de *l'imprécision.* Pour ajouter la prise en compte de *l'imprécision,* il est nécessaire d'utiliser une *métrique* continue, exprimant la proximité. Nous avons donc choisi d'utiliser la *métrique* orla#Distance, qui calcule la distance entre le pixel traité et le point le plus proche de *l'objet de référence.* Si cette distance est nulle, alors cela signifie que le pixel est en contact avec *l'objet de référence.* On peut alors attribuer un *degré d'appartenance* non nul aux pixels situés à faible distance de *l'objet de référence.* Ainsi, des pixels qui seraient considérés comme en dehors de *l'objet de référence* avec une modélisation topologique sont ici pris en compte, mais avec une pénalisation de leur degré d'appartenance. Étant donné que la *métrique* orla#Distance ne peut prendre de valeur négative, deux *fuzzyficateurs,* orla#EqVal0 et orla#InfVal0, sont ici utilisables. Ces *fuzzyficateurs* ont cependant une sémantique différente, le premier signifiant que la *métrique* doit être proche d'une valeur seuil, là où le second impose que la métrique ait une valeur inférieure ou égale à ce seuil. Or, dans le cadre, hypothétique, où la *métrique* orla#Distance prendrait des valeurs négatives (*i.e.* traduisant une distance à l'intérieur de *l'objet de référence*) on voudrait leur attribuer un degré d'appartenance maximal. Ainsi, bien que cela ne change rien dans les faits, il nous semble plus correct d'utiliser le *fuzzyficateur* orla#Inf0 pour traduire la sémantique de la *relation de localisation atomique* orla#DansPlanimétrique.

La *relation de localisation atomique* orla#NotALaFrontiereDe diffère des exemples précédents par sa formulation négative, qui l'oppose à la *relation* orla#ALaFrontiereDe. Ces deux

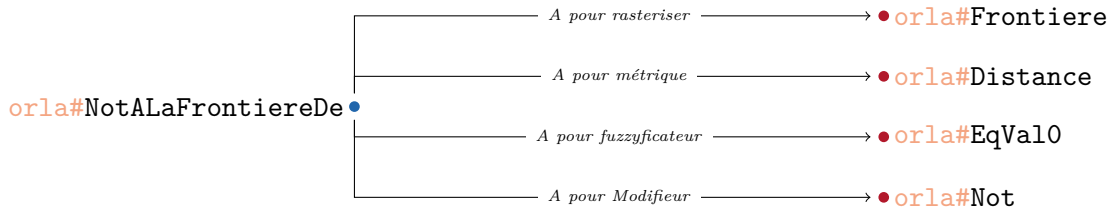


FIGURE 7.17 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* `orla#NotALaFrontiereDe`.

relations de localisation atomiques partagent leur *rasteriser,* leur métrique et leur *fuzzyficateur,* mais elles se distinguent par l'utilisation du *modifieur* `orla#Not` (Figure 7.17). En effet, ces deux *relations* traduisent une proximité à la frontière de *l'objet de référence.* On peut donc utiliser la même *métrique* que pour la *relation de localisation atomique* `orla#DansPlanimétrique`, la distance planaire, représentée par la classe `orla#Distance`. Cependant, cette distance ne peut être calculée à partir de *l'objet de référence* dans son ensemble puisque ces *relations* décrivent une position exprimée par rapport à la frontière de *l'objet de référence.* Il est donc nécessaire d'employer le *rasteriser* `orla#Frontiere`, déjà présenté. La *métrique* ne correspond donc plus à la distance à *l'objet de référence,* mais à la distance à sa frontière. Les positions situées à l'intérieur de l'objet se voient donc attribuer une distance non nulle. Ces deux *relations* se distinguent donc par leur *métrique.* Pour la *relation* `orla#ALaFrontiereDe`, on souhaite que le degré d'appartenance soit maximal à la frontière — lorsque la distance est nulle — et qu'il diminue avec l'éloignement, ce qui correspond au *fuzzyficateur* `orla#EqVal0`. Pour la *relation* `orla#NotALaFrontiereDe`, c'est le comportement opposé qui est attendu. On peut donc utiliser le même *fuzzyficateur* mais en y adjoignant le *modifieur* `orla#Not`, qui a pour effet de transformer la *fonction d'appartenance* en son opposé (Figure 7.14a).

Conclusion

La phase de *spatialisation,* au cœur de notre méthode, n'est pas subdivisée en plusieurs étapes, contrairement aux phases de *décomposition* (chapitre 5) et de *fusion* (chapitre 8). Cependant, la *méthode* développée pour la *spatialisation* est composée de plusieurs parties, correspondant à des traitements computationnels effectués séquentiellement, et toutes porteuses d'une partie de la sémantique de la *relation de localisation atomique* modélisée.

Une *relation spatiale atomique* est donc définie par trois concepts : un *rasteriser,* qui décrit la partie de *l'objet de référence* à laquelle se rapporte la *relation de localisation atomique* et définit la manière de *rasteriser l'objet de référence.* La *métrique,* qui est une grandeur permettant d'approcher la sémantique de la *relation de localisation atomique* et le *fuzzyfieur,* qui est une méthode permettant de sélectionner les pixels de la ZIR, en fonction de la valeur de *la métrique,* correspondant aux valeurs attendues au sein de la ZLC. À ces trois concepts, peuvent s'ajouter un ou plusieurs *modifieurs,* qui permetent de transformer la sémantique obtenue par l'association d'un *rasteriser,* d'une *métrique* et d'un *fuzzyficateur,* par exemple en l'inversant.

La définition de ces différents concepts et de leurs liens avec les *relations de localisation atomiques* est faite au sein de *l'ontologie* ORLA, également utilisée pour représenter la *décomposition* des *relations de localisation* en des *relations de localisation atomiques* (chapitre 5).

La *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique* est donc réalisée en appliquant successivement, dans l'aire délimitée par la ZIR, le *rasteriser* à *l'objet de référence* traité, en calculant la *métrique,* puis en la *fuzzyfiant.* On obtient alors une représentation raster de la *zone de localisation compatible,* où chaque pixel se voit attribuer un *degré,* quantifiant son appartenance à la ZLC.

Chapitre 8

La phase de *fusion* et la modélisation de la confiance

Introduction 189
8.1 Présentation générale de la méthode de fusion 190
8.1.1 Présentation des *étapes* de la *phase de fusion* 190
8.1.2 Le choix des opérateurs de *fusion* 193
8.1.2.1 Les principes du *tiers-exclu* & de la *non-contradiction* 194
8.1.2.2 L'archimédianité et l'idempotence 196
8.2 La prise en compte de la confiance 200
8.2.1 La théorie des possibilités 200
8.2.1.1 Mesures de possibilité et de nécessité 201
8.2.1.2 Modélisation conjointe de *l'incertitude* et de *l'imprécision* . . . 205
8.2.2 La modélisation de la confiance d'un *indice de localisation* 206
8.3 Présentation détaillé des étapes de la fusion 209
8.3.1 La *fusion* des *relations de localisation atomiques* 209
8.3.2 La *fusion* des *objets de référence indéfinis* 210
8.3.3 La *fusion* des indices de *localisation* 210
Conclusion 213

Introduction

Dans ce huitième chapitre, nous allons présenter la dernière étape de notre méthode : la fusion des *zones de localisation compatibles* issues de la *spatialisation* (chapitre 7) des *indices de localisation* (chapitre 4) décomposés (chapitre 5).

Comme dans les chapitres présentant les phases de *décomposition* et de *spatialisation,* nous allons détailler ici la méthode ébauchée dans le chapitre 4 et les différentes étapes qui la composent. Nous présenterons également la manière dont nous avons choisi de traiter la confiance des secouristes dans les indices de localisation énoncés par les requérants qu'ils traitent.

Nous commencerons donc par détailler l'ensemble des étapes nécessaires à la fusion des *zones de localisation compatibles,* et la manière dont elles seront effectuées. Puis, nous présenterons la solution retenue pour la modélisation de la confiance sur les indices de localisation. Enfin, nous présenterons un exemple détaillé de la phase de fusion, permettant d'illustrer tous ces principes.

8.1 Présentation générale de la méthode de fusion

La *fusion* est la dernière phase de notre méthode (Figure 4.6). C'est au cours des trois étapes de cette phase que les *zones de localisation compatibles,* construites durant la *phase de spatialisation* (chapitre 7) sont *fusionnées* de manière à obtenir une *zone de localisation probable,* représentant le résultat de la méthode pour *l'ensemble des indices de localisation* traités. De la même manière que la *phase de décomposition,* la *phase de fusion* se compose de trois étapes successives, regroupant les *zones de localisation* spatialisées à partir des *indices de localisation* décomposés au cours de la *première phase* de la méthode (chapitre 4).

La *phase de fusion* est fondée sur l'idée qu'il existe une équivalence entre les *indices de localisation* et les ZLC qui les spatialisent et qu'il est, par conséquent, possible de construire la zone de localisation probable (ZLP) en *fusionnant* les ZLC *spatialisant* les *indices de localisation* décomposant *l'ensemble des indices de localisation* (Figure 4.6). Ainsi, de la même manière que les *indices de localisation* sont décomposables à l'aide de disjonctions et de conjonctions (chapitre 4), il est possible de construire la *zone de localisation probable* qui spatialise l'ensemble initial des indices de localisation données par le requérant, en appliquant les mêmes combinaisons logiques entre les ZLC spatialisant les de indices localisation décomposés.

Le degré d'appartenance d'un pixel p donné à la *zone de localisation probable* peut donc être calculé en *fusionnant* le degré d'appartenance de ce même pixel pour l'ensemble des *zones de localisation compatibles* crée lors de la *spatialisation.* Par exemple, si huit ZLC sont regroupées deux à deux jusqu'à l'obtention d'une ZLP, comme illustré par la Figure 8.1, le degré d'appartenance d'un pixel à la ZLP est :

$$p_{\mathsf{ZLP}} = \Big((p_{\mathsf{ZLC}_1} \wedge p_{\mathsf{ZLC}_2}) \vee (p_{\mathsf{ZLC}_3} \wedge p_{\mathsf{ZLC}_4})\Big) \wedge \Big((p_{\mathsf{ZLC}_5} \wedge p_{\mathsf{ZLC}_6}) \vee (p_{\mathsf{ZLC}_7} \wedge p_{\mathsf{ZLC}_8})\Big) \tag{8.1}$$

Où chacun des trois niveau d'imbrication correspond à une étape différente de la phase de fusion. Les différentes *étapes* de la *phase de fusion* permettent d'effectuer ce calcul sur l'ensemble des pixels utilisés pour représenter la ZIR.

Au terme de la phase de *spatialisation,* on dispose généralement d'un grand nombre de *zones de localisation compatibles*[1], chacune contenant une part de l'information nécessaire à la construction de la ZLP. Le rôle de la *phase de fusion* consiste simplement à combiner toutes ces informations de manière à obtenir une seule *zone de localisation,* correspondant à la description de position donnée par l'ensemble des *indices de localisation.*

8.1.1 Présentation des *étapes* de la *phase de fusion*

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 4, la *phase de fusion* est composée de trois étapes : (1) la *fusion* des *relations de localisation atomiques,* (2) la *fusion* des objets de *référence indéfinis,* et (3) la *fusion* des *indices de localisation,* chacune destinée à fusionner des *zones de localisation compatibles* issues de la *spatialisation d'indices de localisation* décomposés à une étape particulière de la *phase de décomposition* (Tableau 8.1).

La première de ces étapes est la *fusion* des *relations de localisation atomiques.* Comme nous l'avons expliqué lors de la présentation de la méthode (chapitre 4), et plus particulièrement

1. Des configurations où seule une ZLC est construite sont possibles, mais cela correspond à des cas particuliers où l'ensemble des *indices de localisation* (chapitre 4) ne contient qu'un *indice* lui-même employant une *relation de localisation atomique* exprimée par rapport à un *objet de référence* défini. Dans ce cas, les phases de *décomposition* et de *fusion* n'ont pas de rôle à jouer.

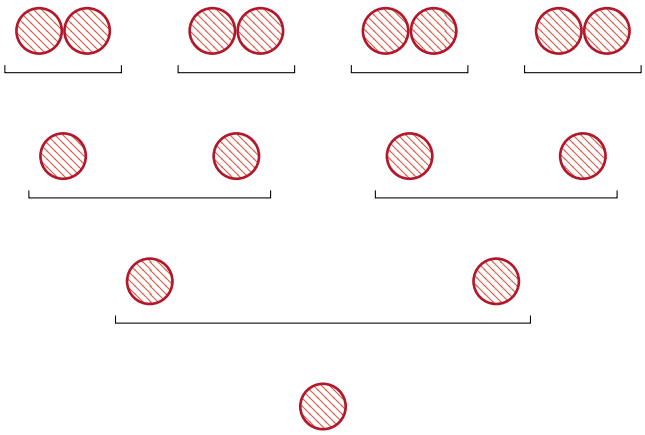


FIGURE 8.1 – Méthode de *fusion* d'un ensemble *d'indices de localisation*

lors de la définition de la *phase de décomposition* (chapitre 5), les *relations de localisation* utilisées dans les *indices de localisation* (*e.g.* `orl#PresDe`, `orl#SousAltitude`, *etc.*) peuvent êtres décomposées en des *relations de localisation atomiques* représentant chacune une « brique sémantique » de l'ensemble de la *relation de localisation.* Au terme de la troisième étape de la *phase de décomposition* on dispose donc d'un ensemble *d'indices de localisation* décomposés, puis *spatialisés* indépendamment. La construction des *zones de localisation compatibles* correspondant à un *indice de localisation* contenant une *relation de localisation* décomposée nécessite donc de fusionner ces ZLC de manière à en obtenir une seule, correspondant à la *spatialisation* de *l'indice de localisation* avant décomposition.

Comme nous l'avons déjà expliqué (chapitre 4), cette fusion est effectuée à l'aide d'une intersection entre les *zones de localisation compatibles* issues de la *spatialisation* de *l'indice de localisation décomposé.* Cette construction par intersection équivaut à indiquer que, pour qu'une position appartienne à la ZLC construite à partir d'une *relation de localisation non atomique,* il est nécessaire qu'elle appartienne à toutes les ZLC construites à partir des *relations de localisation atomiques* la décomposant. Par exemple, pour qu'une position appartienne à la ZLC spatialisant la *relation de localisation* `orl#SousProcheDe`[2], il est nécessaire qu'elle appartienne aux deux ZLC[3] *spatialisant* les *relations de localisation atomiques* `oral#SousAltitude` et `orla#Proximal`, utilisées pour la décomposition de `orl#SousProcheDe,` et par conséquent à l'intersection de ces deux ZLC. On dispose donc à la fin de cette première étape de *fusion,* d'autant de ZLC qu'il y a *d'indices de localisation* avant la décomposition des *relations de localisation atomiques* (Figure 4.6).

La seconde étape de la fusion est la fusion des *objets de référence indéfinis* (*e.g.* passer de « Je suis sous le téléphérique 1 » ou « Je suis sous le téléphérique 2 » à « Je suis sous un téléphérique ».). L'objectif de cette étape est de regrouper les ZLC issues de la fusion des *relations de localisation atomiques.* On dispose donc d'un ensemble de *zones de localisation compatibles* définies à partir de plusieurs instances d'un même type *d'objet de référence.* Cette étape se distingue de la précédente par l'utilisation d'un opérateur disjonctif entre les différentes ZLC. En effet, si lors de la fusion des relations de localisation atomiques on cherche à construire les ZLC comprenant les positions correspondant à toutes les *relations de localisation atomiques,*

2. Qui est une *relation de localisation non atomique* (chapitre 4).
3. Et par conséquent à leur intersection.

	Fusion des *relations de localisation atomiques*	**Fusion des *objets de référence indéfinis***	**Fusion des *indices de localisation***
Objectif	Fusionner les ZLC *spatialisant* une même *relation de localisation* pour le même *objet de référence* (*i.e.* provenant de la *décomposition* des *relations de localisation atomiques*)	Fusionner les ZLC *spatialisant* la même *relation de localisation* pour des *objets de référence* du même type (*i.e.* provenant de la décomposition d'un même *objet de référence indéfini*)	Fusionner les ZLC spatialisant différents *indices de localisation* (*i.e.* provenant de la *décomposition* de *l'ensemble des indices de localisation*)
Opérateur	*t-norme* (Intersection)	*t-conorme* (Union)	*t-norme* (Intersection)
Entrée	ZLC directement issues de la *spatialisation*	ZLC issues de la *fusion* des *relations de localisation atomiques*	ZLC issues de la *fusion* des *objets de référence indéfinis*
Sortie	Une ZLC par *indice de localisation* et par *objet de référence*	Une ZLC par *indice de localisation*	La ZLP

TABLE 8.1 – Synthèse des étapes de la *phase de fusion*

ici on cherche à identifier les positions validant la relation de localisation spatialisée avec au moins un *objet de référence.* Au terme de cette seconde étape de *fusion* on dispose donc d'autant de *zones de localisation compatibles* qu'il y a d'indices de localisation dans l'ensemble d'indices de localisation initial (*i.e.* dans l'alerte), c'est-à-dire d'autant de *zones de localisation* que l'on a d'indices à la fin de la première étape de décomposition (Figure 4.6).

La dernière étape de la phase de fusion est la *fusion des indices de localisation.* Cette étape vise à combiner les ZLC spatialisant les différents indices de localisation en une seule zone, la ZLP. Contrairement aux précédentes étapes, la *fusion des indices de localisation* aboutit toujours en une unique *zone de localisation,* que l'on spatialise un seul *indice de localisation* utilisant une *relation de localisation atomique* et se référant à un *objet de référence* nommé, ou que l'on spatialise une dizaine d'indices de localisation complexes. Cette étape utilise, comme la première, un opérateur conjonctif, permettant d'identifier les pixels appartenant à l'ensemble des ZLC combinées. Toutefois, il présente une différence majeure avec la première étape de la phase de *fusion,* puisqu'elle nécessite de prendre en compte l'évaluation de la confiance de l'indice de localisation accordée par le secouriste, ce que nous détaillerons dans la seconde partie de ce chapitre.

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 3, plusieurs opérateurs peuvent être utilisés pour réaliser des intersections et des unions entre *sous-ensembles flous.* Chaque opérateur présente des propriétés qui lui sont propres et qui impactent le résultat des opérations inter-ensemblistes. Dans notre cas, le choix d'un opérateur influence donc la valeur des degrés d'appartenance et, par conséquent, la forme de la ZLP et plus généralement de toutes les *zones de localisation* construites au cours de la *phase de fusion.* Le choix des opérateurs de *fusion* doit donc être étudié, de manière à identifier les opérateurs plus adaptés à notre cas d'utilisation.

8.1.2 Le choix des opérateurs de *fusion*

Dans l'état de l'art (section 3.2), nous avons présenté les quatre couples d'opérateurs — t-normes et *t-conormes* — les plus fréquemment employés pour étendre les unions et les intersections ensemblistes à la théorie des sous-ensembles flous : les opérateurs de Zadeh, de Łukasiewicz, probabilistes et drastiques (Klir et al. 1995). Les opérateurs que nous avons utilisés jusqu'ici, sans justification, notamment lors de la définition de la représentation des *zones de localisation* (chapitre 6), étaient les opérateurs de Zadeh [4], proposés lors de la formulation originale de la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh 1965). Les opérateurs de Zadeh sont tout à fait appropriés pour effectuer les intersections et les unions nécessaires aux différentes étapes de la *phase de fusion,* mais les opérateurs alternatifs (*i.e.* les opérateurs de Łukasiewicz, probabilistes et drastiques), qui proposent des intersections et des unions plus ou moins sévères (chapitre 3), offrent la possibilité de moduler, toutes choses égales par ailleurs, les résultats de la *fusion.* Cependant, l'utilisation d'opérateurs alternatifs soulève plusieurs questions. Chaque couple d'opérateurs a, en effet, des propriétés spécifiques, impactant significativement le résultat des intersections et des unions. Le choix des opérateurs utilisés durant *la phase de fusion* ne doit donc pas se fonder uniquement sur leurs différentes propriétés, mais également sur leurs conséquences sur la sémantique des différentes étapes de la phase de *fusion.* Nous allons donc détailler les différentes propriétés des opérateurs de *fusion* et étudier leur influence sur la *fusion* des ZLC, en vue de choisir le couple d'opérateur le plus adapté à notre méthode.

Si chaque couple d'opérateur à des propriétés spécifiques, tous ont les mêmes caractéristiques de base. Comme nous l'avons expliqué lors de la présentation des différents couples d'opérateurs (chapitre 3), chacun d'entre eux est composé d'une *t-norme,* qui est l'opérateur utilisé pour les intersections (qui traduisent les conjonctions) et une *t-conorme,* utilisée pour les unions (qui traduisent les disjonctions). Toutes les *t-normes* et les *t-conormes* partagent certaines caractéristiques, à savoir la *commutativité, l'associativité* et la *monotonie.* De plus, toutes les *t-normes* ont 0 pour *élément neutre* et toutes les *t-conormes* ont 1 pour *élément neutre* (chapitre 3). Ces propriétés garantissent un comportement similaire des différents opérateurs et certaines sont indispensables au bon déroulement de la *phase de fusion,* telle que formulée dans le chapitre 4.

La *commutativité* et *l'associativité* garantissent, en effet, que l'application d'une même *t-(co)norme* à un ensemble de degrés d'appartenance donnera le même résultat quel que soit l'ordre des zones de localisation à fusionner. Appliqué à la *fusion* des ZLC, ces deux propriétés garantissent que la *fusion* de plusieurs ZLC à une étape donnée de la phase de fusion donnera le même résultat quel que soit l'ordre dans lequel les fusions sont appliquées. Les trois étapes de la *phase de fusion* ne sont donc pas impactées par l'ordre des ZLC qu'elles traitent.

Une autre caractéristique des ces quatre couples est qu'ils sont *duals* (Bouchon-Meunier 2007), ce qui signifie que pour tous x et y dont la valeur est comprise entre 0 et 1, *la négation d'une* t-norme est égale à la *t-conorme* de la négation de x et de y et inversement, soit :

$$n\left(\top(x,y)\right) = \perp\left(n(x), n(y)\right) \tag{8.2}$$

$$n\left(\perp(x,y)\right) = \top\left(n(x), n(y)\right) \tag{8.3}$$

Avec n la négation.

4. Voir les équations 3.7 et 3.8 et la Figure 3.8, dans le chapitre 3.

Si l'on observe les figures 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11, représentant, pour chaque couple d'opérateur, la valeurs des *t-normes* et des *t-conormes* (μ) pour une paire de valeurs données (x, y), on peut remarquer que les *opérateurs drastiques* ont un comportement particulier, sans transition [5] entre les degrés d'appartenance minimaux et maximaux. Ce couple d'opérateurs a la particularité d'être discontinu. La discontinuité des opérateurs drastiques ne nous semble pas très adaptée à notre cas d'application. De plus, ces opérateurs sont particulièrement extrêmes puisqu'ils correspondent à la plus sévère des *t-normes* et à la plus lâche des *t-conormes.* Il ne nous semble donc pas pertinent de les conserver. En effet, nous souhaitons disposer des zones de localisation les plus continues possibles et préférons surestimer leur étendue, plutôt que de les sous-estimer, ce à quoi pourrait nous conduire l'utilisation des opérateurs drastiques.

8.1.2.1 Les principes du *tiers-exclu* & de la *non-contradiction*

Un second critère de distinction entre ces quatre opérateurs est la conservation des principes du *tiers-exclu* et de la *non-contradiction,* fondamentaux dans les logiques classique et traditionnelle (Horn 2018). Le principe de *non-contradiction* postule qu'une même proposition logique p, ne peut pas être vraie et fausse en même temps [6]. Il est complété par le principe du *tiers-exclu,* selon lequel une même proposition logique est nécessairement vraie ou fausse [7] On pourrait penser que la *logique floue* est fondamentalement incompatible avec ces deux principes, une même proposition pouvant être à la fois (partiellement) vraie et fausse, ce qui semble s'opposer au principe de *non-contradiction* [8]. Toutefois, ce serait confondre la *non-contradiction* avec le principe de *non-bivalence* utilisé en *logique floue* [9] (Gottwald 2020). La *non-bivalence* n'implique pas nécessairement la contradiction des principes de *non-contradiction* et du *tiers-exclu,* par exemple la logique ternaire de Łukasiewicz valide ces deux principes.

Pour qu'un couple d'opérateurs soit conforme au principe de *non-contradiction,* il est nécessaire que, soit la proposition $\neg(p \wedge \neg p)$ soit vraie, soit que l'application de sa *t-norme* à un degré appartenance quelconque (x) et à sa négation, $1 - x$ (Équation 3.6) donne toujours un degré d'appartenance nul :

$$\forall x, \top(x, 1 - x) = 0 \tag{8.4}$$

De même, pour q'un couple d'opérateurs soit conforme au principe du *tiers-exclu,* il est nécessaie que la proposition $p \vee \neg p$ soit vraie, soit que l'application de sa *t-conorme* à un degré appartenance quelconque (x) et à sa négation soit toujours égale à 1 :

$$\forall x, \perp(x, 1 - x) = 1 \tag{8.5}$$

Par conséquent, si la *t-norme* utilisée valide le principe de *non-contradiction,* alors l'intersection d'un sous-ensemble flou A (de X) avec son complément A^C (Équation 3.6) avec ces opérateurs est toujours égale à l'ensemble vide :

5. À l'exception du cas où, soit x, soit y est nul.
6. La notation formelle de ce principe est exprimée par la tautologie $\neg(p \wedge \neg p)$.
7. La notation formelle de ce principe est exprimée par la tautologie $p \vee \neg p$.
8. C'est par exemple le cas dans l'exemple illustré par le Tableau 3.2, où une personne appartient partiellement aux ensembles des *personnes de grande taille* et des *personnes âgées* et donc partiellement aux complémentaires respectifs de ces ensembles. Par conséquent, si les assertions « cette personne est de grande taille » et « cette personne est âgée » sont partiellemetn vraies, c'est également le cas de leurs négations respectives.
9. Mais également par d'autres logiques alternatives.

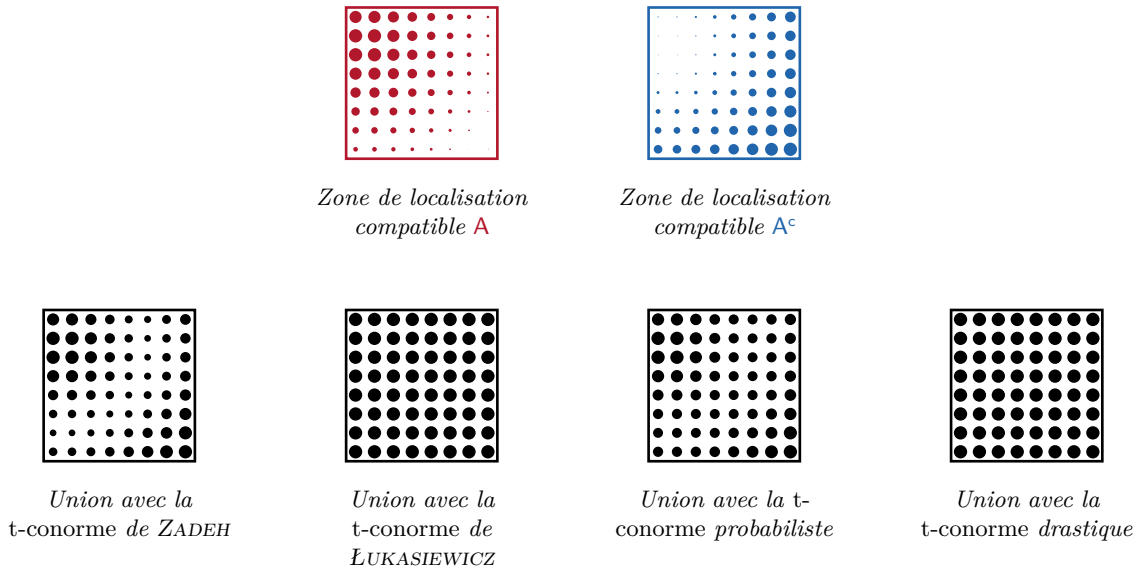


Figure 8.2 – Illustration du principe du *tiers-exclu*. Une *zone de localisation compatible* (A) et son complémentaire (A^c) sont intersectées, si le résultat de cette intersection est égal à *l'ensemble de référence* (*i.e.* que toutes les positions ont un degré d'appartenance de 1), alors la *t-conorme* utilisée valide ce principe.

$$A \cap A^C = \emptyset \tag{8.6}$$

et l'union de ces mêmes sous-ensembles avec une *t-conorme* respectant le principe du *tiers-exclu* est toujours égale à l'ensemble net X :

$$A \cup A^C = X \tag{8.7}$$

On peut vérifier le comportement des opérateurs en représentant le résultat de l'union (Figure 8.2) et de l'intersection (Figure 8.3) d'un sous-ensemble flou (A), représentant une ZLC spatialisant la *relation de localisation atomique* `orla#PrèsDe`, avec son complémentaire [10] (A^c). Quelle que soit la figure considérée, on peut remarquer deux comportements distincts. Les opérateurs drastiques et de Łukasiewicz produisent un résultat homogène, où tous les pixels possèdent le même degré d'appartenance, qu'il soit égal à 1 [11] (Figure 8.2) ou nul [12] (Figure 8.3). À l'inverse, les opérateurs de Zadeh ou probabilistes aboutissent à une zone non uniforme, contenant des positions dont le degré d'appartenance est inférieur à 1 (Figure 8.2) ou supérieur à zéro (Figure 8.3). Les équations 8.6 et 8.7 ne sont donc valides qu'avec les opérateurs de Łukasiewicz et les opérateurs drastiques, les opérateurs de Zadeh et les opérateurs probabilistes ne valident donc pas les principes de *non-contradiction* et du *tiers-exclu* (Bouchon-Meunier 2007).

La non-validation de ces deux principes n'est cependant pas une raison intrinsèque de rejet

10. Soit la ZLC correspondant à la spatilisation de la ZLC `orla#PrèsDe` avec le *modifieur* `orla#Not` (chapitre 7).
11. Ce qui correspond à *l'ensemble de référence* X.
12. Ce qui correspond à l'ensemble vide.

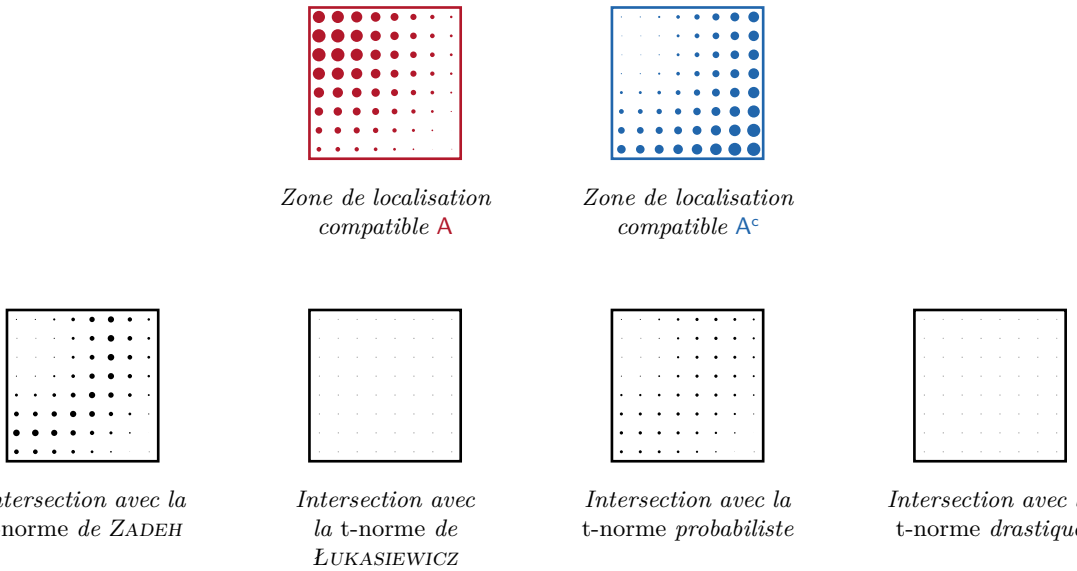


Figure 8.3 – Illustration du principe de la *non-contradiction.* Une *zone de localisation compatible* (A) et son complémentaire (A^c) sont unies, si le résultat de cette union est égal à *l'ensemble vide* (*i.e.* que toutes les positions ont un degré d'appartenance nul), alors la *t-norme* utilisée valide ce principe.

d'un couple d'opérateurs. Ces deux principes sont, certes, nécessaires à de nombreux raisonnement, comme l'explique Łukasiewicz (1910) :

> [Sans le principe de la non-contradiction] Une personne faussement inculpée de meurtre ne trouverait aucun moyen de démontrer son innocence devant un tribunal. Tout au plus pourrait-elle produire la preuve qu'elle n'a commis *aucun meurtre ;* mais cette vérité négative ne peut expulser du monde celle, positive, qui la contredit, si le principe de contradiction n'est pas valable

Si cet exemple est assez éloquent, il n'a que peu d'impact transposé à notre cas d'application. En effet, notre méthode ne se base pas sur des raisonnements logiques qui seraient impactés par la non validation des principes du tiers-exclus et de la non-contradiction. Il n'est donc pas nécessaire que les opérateurs employés lors de la fusion valident ces principes, nous ne pouvons donc en disqualifier aucun.

8.1.2.2 L'archimédianité et l'idempotence

Une autre propriété différenciant ces différents opérateurs est l'archimédianité. Un couple d'opérateurs est dit archimédien lorsque sa *t-norme* et sa *t-conorme* sont continues et que, pour toute valeur de degré d'apparence (x) entre 0 et 1 (exclus), la *t-norme* de x avec lui-même est strictement inférieure à x et la *t-conorme* de x avec lui-même est strictement supérieure à x, soit : $\forall x \in]0,1[: \top(x,x) < x$ et $\perp(x,x) > x$ (Bouchon-Meunier 1995). De plus, si les opérateurs sont archimédiens et que, pour tous les degrés d'appartenance x, y, v et w tels que x est strictement inférieur à v et y est strictement inférieur à w, la *t-norme* du couple x, y est strictement inférieure à *la t-norme* du couple v, w et la *t-conorme* du couple x, y est strictement supérieure à *la t-conorme* du couple v, w, soit : pour tout $x < v$ et $y < w$: $\top(x,y) < \top(v,w)$

et $\perp(x, y) > \perp(v, w)$, alors les opérateurs sont dit archimédiens stricts (Bouchon-Meunier 1995).

Si les *t-normes* (et les *t-conormes*) peuvent être archimédiennes, archimédiennes strictes ou non archimédiennes, indépendamment de la *t-conorme* (ou de la *t-norme*) à laquelle elles sont associées, ce n'est pas le cas pour les quatre couples étudiés ici, pour lesquels *t-normes* et *t-conormes* partagent les mêmes propriétés. La moitié des couples que nous détaillons ici sont archimédiens. Tout d'abord, les opérateurs drastiques ne sont pas archimédiens, car discontinus. Les opérateurs de Zadeh (1965) ne sont pas non plus archimédiens, puisque l'application de la *t-norme* ($\top_Z$) ou de la *t-conorme* de Zadeh ($\perp_Z$) à un couple du même degré d'appartenance (x) est toujours égale a cette même valeur, soit : $\forall x \in [0, 1] : \top_Z(x, x) = x$ et $\perp_Z(x, x) = x$. Les opérateurs de Łukasiewicz sont, quant à eux, archimédiens et les opérateurs probabilistes archimédiens stricts.

L'idempotence est une autre propriété des opérateurs, liée à l'archimédianité. Un opérateur est dit idempotent, lorsque le résultat de son application n'est pas modifié, si elle est répétée, c'est-à-dire, que pour une *t-norme* ou une *t-conorme* idempotente : $\top(\top(x, y), \top(x, y)) = \top(x, y)$ et $\perp(\perp(x, y), \perp(x, y)) = \perp(x, y)$. Dans notre cas, cela implique que l'intersection (ou l'union) d'une *zone de localisation* avec elle-même sera égale à la *zone de localisation.* Parmi les quatre couples d'opérateurs présentés ici, seuls les opérateurs de Zadeh sont idempotents, les applications successives des *t-(co)normes* des trois autres couples d'opérateurs ont pour effet de faire diminuer (ou augmenter) le degré d'appartenance. Ainsi, pour les opérateurs de Łukasiewicz, probabilistes et drastiques : $\top(\top(x, y), \top(x, y)) \leq \top(x, y)$ et $\perp(\perp(x, y), \perp(x, y)) \geq \perp(x, y)$.

Comme les principes du *tiers-exclu* et de la *non-contradiction,* l'archimédianité et l'idempotence des *t-(co)normes* apparaissent comme des propriétés théoriques, assez éloignées des considérations applicatives de ce travail. Cependant, il n'en est rien. Ces deux propriétés modifient, en effet, le comportement des *t-normes* et des *t-conormes,* et donc le résultat des intersections et des unions, a fortiori quand ces opérations sont répétées. Or, la répétition *d'intersections* et de *fusions* est au cœur de la *phase de fusion.* Utiliser des opérateurs impactant substantiellement les trois étapes de la *fusion* n'est donc envisageable qu'après une étude attentive de leur comportement et de son influence sur la sémantique des *zones de localisation.*

On peut illustrer l'effet de ces deux propriétés en analysant le comportement des ces différentes *t-(co)normes* pour une même intersection (ou union). La Figure 8.4 représente le résultat de l'intersection de deux ZLC (A et B). A représente la *spatialisation* de *l'indice de localisation* « au sud de » et B de *l'indice de localisation* « à l'est de ». Le résultat de l'intersection des ZLC A et B correspond à la ZLC de *l'indice de localisation* « Je suis au sud-est de ». Si l'on compare le résultat de cette intersection en fonction de la *t-norme* utilisée, on peut remarquer que les *t-normes archimédiennes* construisent une ZLC dont le degré d'appartenance est moindre en toute position. Elles tendent donc à pénaliser la conjonction entre des positions appartenant partiellement aux ZLC intersectées. Ainsi, si une position p appartient « moyennement » aux ZLC A et B, (*e.g.* avec un *degré d'appartenance* compris entre 0,4 et 0,6), alors une *t-norme* archimédienne considèrera que p appartient faiblement à l'intersection de A et de B et ce, même si les degrés d'appartenance sont identiques. Ce comportement n'est pas inadapté à notre cas d'utilisation, il participe à proposer une conjonction plus stricte, ce qui est une raison suffisante pour utiliser des opérateurs alternatifs.

L'archimédianité est, cependant, plus problématique pour les *t-conormes.* La Figure 8.5 représente le résultat de l'union deux ZLC, A représentant la *spatialisation* de deux *relations de localisation* ; `orl#ALEstDe` et `orl#AuSudde`, pour le même *objet de référence.* Comme le montre

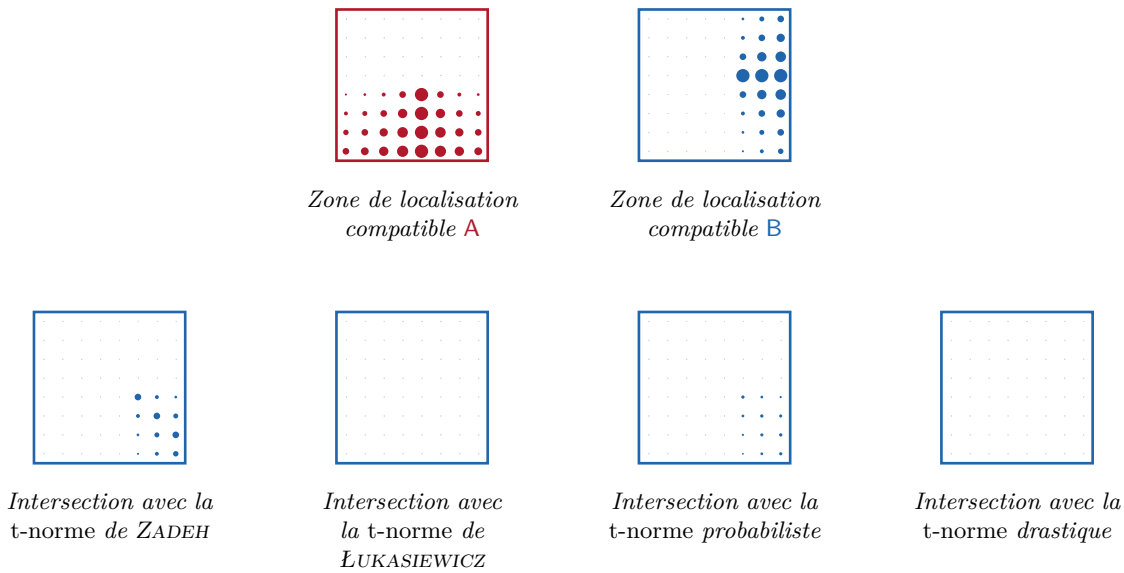


Figure 8.4 – Comparaison de l'intersection de deux ZLC en fonction de la *t-norme* utilisée.

la Figure 8.5, le degré d'appartenance résultant de l'union de ces deux ZLC est, globalement plus important lorsque la *t-conorme* employée est archimédienne. Les *t-conormes* archimédiennes ont pour effet de favoriser la disjonction entre les positions appartenant partiellement aux ZLC unies. Ainsi, si une position p appartient « moyennement » aux ZLC A et B, alors une *t-conorme* archimédienne considèrera que p appartient fortement à l'union de A et de B et ce même si les degrés d'appartenance sont identiques. Par exemple, si une première ZLC correspond à la *zone* depuis laquelle l'on voit tout le lac i et qu'une seconde ZLC correspond à la zone depuis laquelle on voit tout le lac j, alors une position p_1, à partir de laquelle on voit partiellement les lacs i et j sera considéré par une *t-conorme* archimédienne, comme une « meilleure » position, qu'une position p_2 à partir de laquelle on voit partiellement un seul lac. Pour le dire autrement, utiliser une *t-conorme* archimédienne, revient à considérer que l'assertion « De cette position on voit totalement un lac » est *plus vraie* si l'on voit partiellement deux lacs, que si on n'en voit qu'un. Ce comportement est cependant incompatible avec notre cas d'application.

L'utilisation d'autres opérateurs que ceux proposés par Zadeh (1965) implique également de renoncer à la propriété d'idempotence. Or, l'absence de cette propriété impacte, plus encore que l'archimédianité, le résultat de la *phase de fusion.* En effet, la non-idempotance implique une variation du résultat en fonction du nombre de ZLC fusionnées.

Appliqués aux *t-conormes* cette propriété tend à faire augmenter le degré d'appartenance résultant de l'union des ZLC. Par conséquent, plus les *objets de référence* correspondant à un *objet de référence indéfini* seront nombreux, plus la *zone de localisation compatible* issue des l'union des ZLC leur correspondant aura tendance à avoir un degré d'appartenace élevé. Autrement dit, plus une position sera dans la ZLC d'un grand nombre *d'objets de référence,* plus son degré d'appartenance à l'union de ces *zones* sera important. Ce comportement est fortement similaire à celui induit par l'archimédianité des *t-conormes,* et de la même manière que l'archimédianité des *t-conormes* pose problème, il est difficile de justifier l'utilisation d'une *t-conorme* non-idempotente. En effet, rien dans une formulation employant un *objet de référence indéfini* et n'impliquant que la *relation de localisation* ne doit être validé par plus d'un *objet*

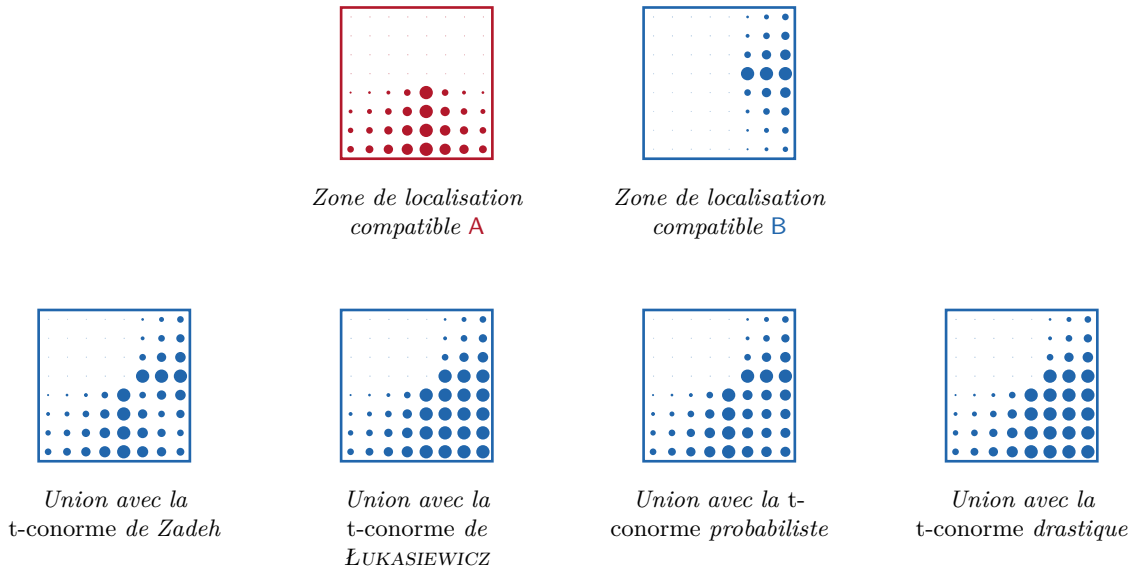


FIGURE 8.5 – Comparaison de l'union de deux ZLC en fonction de la *t-conorme* utilisée.

de référence. À l'inverse, la non-idempotence appliquée aux *t-normes* tend à faire diminuer les degrés d'appartenance en fonction du nombre de ZLC intersectées. Par conséquent, plus une position aura fréquemment un degré d'appartenance faible aux différentes ZLC, plus son degré d'appartenance à la ZLP sera faible. La non-idempotence conduit donc à utiliser des opérateurs d'union et d'intersection qui sont impactés par le nombre de ZLC à fusionner.

On pourrait, cependant, penser que cette sensibilité à la taille de l'échantillon n'est pas problématique, au contraire, même puisqu'elle permet d'introduire — implicitement — une nouvelle information : la régularité des résultats. Aussi, une *t-norme* non-idempotente n'a que pour effet de réduire le degré d'appartenance des positions ayant déjà un degré d'appartenance faible et ce, dans plusieurs ZLC. Avec ce type de *t-norme* « le moins entraine le moins », et le degré d'appartenance n'est réduit que par la succession de degrés d'appartenance inférieurs à un. Le cas des *t-conormes* est, quant à lui, plus problématique, comme nous l'avons expliqué, mais il peut être considéré comme acceptable, puisqu'il ne peut qu'aboutir, dans le pire des cas, à des faux positifs. Ces compromis sont cependant inacceptables. D'une part, car l'augmentation (ou la diminution) des degrés d'appartenance est assez rapide, tout du moins elle nécessite moins de ZLC que ce que nous sommes amené à manipuler. Par exemple, avec la *t-norme* de Łukasiewicz, une intersection de 10 fois la valeur 0,9 donnera un degré d'appartenance nul, là où il serait de 0,34 avec une *t-norme* probabiliste et de 0,9 avec la *t-norme* de Zadeh (1965). Or, il est très fréquent de manipuler plus de dix *objets de référence.* L'exemple de décomposition proposé dans le chapitre 4 contient déjà 5 instances pour *l'objet de référence* « crêtes », alors que la ZIR (implicitement) utilisée pour les identifier est extrêmement réduite. Un *indice* plus vague, comme « Je suis sous une route » (tiré du fil rouge), peut, pour peu que la ZIR soit de grande taille, aboutir à la sélection de centaines, voire de milliers d'instances. D'autre part, et c'est sans aucun doute le point le plus problématique, une *t-norme* non-idempotente peut conduire à attribuer un degré d'appartenance à la ZLP nul à des positions ayant un degré d'appartenance non nul à toutes ZLC. Pour reprendre l'exemple précédent, avec la *t-norme* de Łukasiewicz, un pixel ayant un degré d'appartenance élevé (0,9) à 10 ZLC se verra attribuer un degré d'appartenance nul à l'intersection de ces *zones,* ce qui équivaut à retirer de la ZLP

	Zadeh	**Łukasiewicz**	**Probabilistes**	**Drastiques**
Continu	**Oui**	Oui	Oui	Non
Non-contradiction	**Non**	Oui	Non	Oui
Tiers-exclu	**Non**	Oui	Non	Oui
Archimédien	**Non**	Oui	Strict	Non
Idempotence	**Oui**	Non	Non	Non

TABLE 8.2 – Synthèse des caractéristiques des opérateurs

une position vraisemblablement pertinente, puisque qu'ayant un fort degré d'appartenance à toutes les ZLC, soit un potentiel faux négatif.

L'utilisation d'opérateurs archimédiens ou non-idempotents est donc incompatible avec notre méthode. D'une part, car ces opérateurs sont sensibles au nombre de ZLC fusionnées, mais surtout car les *t-normes* et les *t-conormes* non-idempotentes peuvent créer des faux positifs et négatifs, ce qui a pour effet de complexifier l'interprétation de la ZLP. Des opérateurs non-archimédiens et idempotents, comme ceux proposés par ZADEH (1965) permettent d'éviter ces problèmes, aboutissant à une *fusion* insensible au nombre de *zones de localisations compatibles* et plus facile à interpréter par l'utilisateur final, le secouriste.

L'étude des différentes caractéristiques (Tableau 8.2) des couples d'opérateurs les plus utilisés dans la littérature nous a conduit à rejeter la plupart d'entre eux. Les opérateurs drastiques ont été rejetés car discontinus, trop sévères et donc inadaptés à notre cas d'utilisation. L'étude de l'impact du rejet des principes de *non-contradiction* et du *tiers-exclu* ne nous a pas permis de disqualifier des opérateurs. Cependant, nous avons mis en évidence que l'archimédianité (a fortiori stricte) des opérateurs n'était pas souhaitable. C'est pourquoi nous avons retenu les opérateurs de ZADEH (1965) pour effectuer les opérations d'union et d'intersection inter-ZLC.

8.2 La prise en compte de la confiance

La méthode de construction des zones de localisation probable (ZLP) que nous avons détaillée au cours des précédents chapitres, ne remplit pas encore tous les objectifs que nous avions fixés dans le chapitre 2. Nous ne pouvons pas encore prendre en compte la confiance du secouriste en la véracité des indices de localisation qu'il traite.

Nous allons à présent détailler la manière dont nous modélisons cette confiance, en commençant par présenter le cadre théorique sur lequel nous nous appuyons, *la théorie des possibilités,* et la manière dont il est utilisé pour ajouter la modélisation de la confiance à notre méthode.

8.2.1 La théorie des possibilités

Le cadre théorique sur lequel nous avons bâti notre méthode, la théorie des *sous-ensembles flous,* ne permet pas de modéliser *l'incertitude* d'une connaissance, seulement son *imprécision.* Il est ainsi impossible de traiter des situations où les limites de la zone de localisation sont imprécises (*e.g.* « Je suis proche d'une ligne électrique ») et incertaines (*e.g.* « Je crois que je suis proche d'une ligne électrique »). Pour permettre leur modélisation conjointe, ZADEH

(1978) a proposé la *théorie des possibilités,* qui permet la modélisation de *l'incertitude* et qui, combinée à la théorie des sous-ensembles flous, nous permettra de modéliser des zones de localisation imprécises issues de la spatialisation d'indices de localisation incertains.

Comme la *théorie des probabilités,* la *théorie des possibilités* permet de modéliser une incertitude sur la réalisation d'un événement. Cependant ces deux théories utilisent un formalisme et ont des propriétés différentes. Elles ne sont donc pas équivalentes, même si elles s'inscrivent toutes deux dans un cadre plus général (Bouchon-Meunier 1995), celui de la théorie des fonctions de croyances (Shafer 1976). Le terme de *possibilité,* que nous allons régulièrement employer ci-dessous ne doit donc pas être interprété comme un synonyme de probabilité, mais bien comme un concept différent, que nous allons détailler.

8.2.1.1 Mesures de possibilité et de nécessité

La *théorie des possibilités* permet d'évaluer un doute sur la réalisation d'un, ou plusieurs, *événements* donnés. L'ensemble des événements étudiés sont regroupés dans un ensemble fini X, appelé *ensemble des événements.* La *théorie des possibilités* permet d'attribuer à chaque événement défini dans X un coefficient, compris entre 0 et 1, évaluant la *possibilité* de l'événement. Une valeur de 1 indiquant que l'événement est « tout à fait possible » (Bouchon-Meunier 2007, p. 43) et une valeur nulle, qu'il est impossible. Bien que proches, la notion de possibilité ne doit pas être confondue avec celle de probabilité. La probabilité quantifie, en effet, la « chance » de réalisation d'un événement, alors que la possibilité ne quantifie que la plausibilité de ce même événement. Autrement dit, une probabilité maximale indique que l'événement considéré va se réaliser, alors qu'une possibilité maximale indique seulement qu'il est certain que cet événement puisse se produire et non qu'il se produira. Le coefficient de possibilité est attribué par une fonction Π, nommée *mesure de possibilité,* qui l'attribue à chaque élément de l'ensemble des parties de *l'ensemble des événements* ($\Pi : P(X) \rightarrow [0,1]$). La fonction Π doit nécessairement :

— Attribuer un coefficient nul à *l'ensemble vide* : $\Pi(\emptyset) = 0$

— Attribuer un coefficient de 1 à *l'ensemble des événements :* $\Pi(X) = 1$

— Définir la *possibilité* conjonctive de deux événements A et B comme la *possibilité* de l'événement le plus possible : $\forall A, B \in P(X),\ \Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A),\ \Pi(B))$

On peut déduire de ces trois propriétés (Bouchon-Meunier 2007) que la possibilité disjointe de deux événements A et B est toujours inférieure à la *possibilité* de l'événement le moins possible :

$$\forall A,\ B \in P(X),\ \Pi(A \cap B) \leq \min(\Pi(A),\ \Pi(B)) \tag{8.8}$$

Il est, par conséquent, possible que deux événements aient respectivement une possibilité non nulle, mais que leur occurrence simultanée ait une possibilité nulle. Ainsi, $\Pi(A \cap B) = 0$ n'implique pas que $\Pi(A)$ et $\Pi(B)$ soient égaux à 0. Une autre propriété déductible est que les *mesures de possibilités* sont *monotones* relativement à l'inclusion des parties de X. Ceci implique que si un événement A est inclus dans un événement B (*e.g.* si A est la *possibilité* qu'il pleuve en fin de journée, B pourrait être la *possibilité* que le temps change en fin de journée), alors la possibilité de B est supérieure à celle de A :

$$A \subseteq B, \Pi(A) \leq \Pi(B) \tag{8.9}$$

Ce qui revient à dire que la *possibilité* que le temps change (B) est supérieure à la *possibilité* qu'il pleuve (A).

Une autre propriété des *mesures de possibilités* est la faible influence de la *possibilité* d'un événement A sur la *possibilité* de son complémentaire A^C. En effet, quel que soit l'événement traité, l'événement « lui ou son contraire » est « tout à fait possible », par conséquent :

$$\forall A \in P(X),\ \max(\Pi(A),\ \Pi(A^C)) = 1 \tag{8.10}$$

Il est donc possible que la somme des *possibilités* de A et de A^C soit supérieure à 1. Cette propriété diffère fortement de ce que l'on peut trouver en *théories des probabilités* où la probabilité du contraire d'un événement est plus contrainte, puisque la somme de ces deux probabilités est toujours égale à 1. En *théorie des possibilités,* il est simplement nécessaire qu'une des *possibilités* soit de 1. Il est, par conséquent, possible qu'un événement et son contraire soient tous les deux parfaitement possibles, ce qui traduit une situation d'ignorance absolue quant à la réalisation de l'événement considéré.

Bouchon-Meunier (1995) illustre les *mesures de possibilités* avec l'exemple de la réception d'un colis. On peut définir une *mesure de possibilité* donnant la susceptibilité que le colis soit reçu un jour donné de la semaine. Dans ce cas, *l'ensemble des événements* X correspond à l'ensemble des jours de la semaine et les parties de X aux combinaisons de ces jours (*e.g.* {lundi, mardi}, {jeudi, vendredi, samedi}, *etc.*) On peut attribuer une *mesure de possibilité* à ces différentes parties de X. Si l'on reprend les valeurs proposées par Bouchon-Meunier (1995) alors :

— $\Pi(\{\text{lundi, mardi}\}) = 1$
— $\Pi(\{\text{mercredi}\}) = 0,8$
— $\Pi(\{\text{jeudi}\}) = 0,2$
— $\Pi(\{\text{vendredi, samedi, dimanche}\}) = 0$

Ces valeurs signifient qu'il est « tout à fait possible » que le colis arrive en début de semaine, relativement possible qu'il arrive le mercredi, peu possible qu'il arrive le jeudi et impossible qu'il arrive en fin de semaine. Comme on peut le remarquer, il n'est pas nécessaire d'attribuer une mesure de *possibilité* à toutes les parties de X, cela n'empêche pas d'estimer les *possibilités* d'autres parties de X, par exemple la *possibilité* que le colis arrive un mercredi ou un jeudi ($\Pi(\text{mercredi} \cup \text{jeudi})$) est de 0,8 [13], ou la possibilité qu'il arrive le dimanche est nulle [14]. Il n'est, cependant, pas possible de connaitre précisément certaines possibilités, comme par exemple celle que le colis arrive un mardi. Il serait toutefois possible de calculer la possibilité de chaque partie de X si l'on connaissait la possibilité de chaque événement singleton (*i.e.* la possibilité que le colis arrive lundi, mardi, mercredi, *etc.*), la possibilité des événements composites (*e.g.* la possibilité que le colis arrive lundi ou dimanche) étant calculable en combinant les événements singletons.

Dans cette situation, c'est-à-dire, lorsqu'une *mesure de possibilité* attribue à chaque *événement* singleton [15]) un coefficient de possibilité, on parle de mesure de possibilité « totalement définie » (Bouchon-Meunier 2007). Pour attribuer un *coefficient de possibilité* à chaque événement de X, on définit une *distribution de possibilité* ($\pi : X \to [0, 1]$), dont le supremum doit être égal à 1, c'est-à-dire qu'au moins un événement (x) de l'ensemble considéré (X) doit être totalement possible :

13. Soit le maximum des deux valeurs, conformément à la règle définissant la possibilité conjonctive.
14. Étant donné que $\Pi(\{\text{vendredi, samedi, dimanche}\}) = 0$ et que l'union des possibilités est réalisée avec le maximum, cela implique que ni le vendredi, ni le samedi, ni le dimanche n'ont une possibilité non nulle.
15. C'est-à-dire lorsque la possibilité n'est attribuée qu'aux éléments singletons de X et non aux éléments des parties de X.

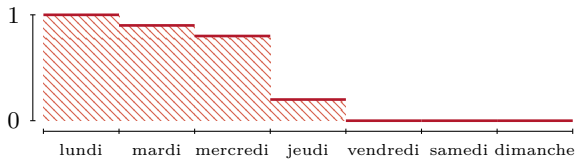


FIGURE 8.6 – Exemple d'une distribution de possibilité par paliers : la possibilité qu'un colis arrive chaque jour de la semaine.

$$\sup_{x \in X} \pi(x) = 1 \tag{8.11}$$

À l'exception de cette dernière condition, toutes ces propriétés sont partagées par les *fonctions d'appartenance* (section 3.2). Ainsi, une *fonction d'appartenance* respectant cette dernière condition, c'est-à-dire est normalisée [16], est parfaitement équivalente à une *distribution de possibilités.* C'est par exemple le cas de toutes les fonctions d'appartenance définies au cours du chapitre 7, comme les fonctions définies par les fuzzyficateurs `orla#EqVal` ou `orla#SupVal`, mais aussi de leurs dérivés, comme `orla#EqVal0`, `orla#InfVal0` ou des fonctions d'appartenance obtenues par l'application d'un modifieur à une fonction normalisée.

La *mesure de possibilité* (Π) d'un événement donné (A) est constructible à partir d'une *distribution de possibilités,* elle est alors égale à la valeur la plus importante de la *distribution des possibilités* sur cet intervalle, soit :

$$\Pi(A) = \sup_{x \in A} \pi(x) \tag{8.12}$$

Pour approfondir notre précédent exemple, on peut définir une *distribution de possibilité* donnant la *possibilité* qu'un colis soit livré un jour donné (Figure 8.6). À partir d'une telle fonction, on peut calculer la *mesure de possibilité* de chaque partie de *l'ensemble des événements.* Par exemple, la possibilité que le *colis* soit livré entre jeudi et dimanche est de 0,2, puisque c'est la valeur maximale prise par la fonction π sur cette période et la possibilité que le colis ne soit pas livré un jeudi est égale à la valeur maximale de la distribution de possibilité pour tous les jours à l'exception du jeudi, soit 1.

La mesure de possibilité ne permet pas à elle seule de quantifier la *certitude* d'un événement, elle ne renseigne que sur sa capacité de réalisation. Si l'on reprend l'exemple du colis, le fait que la possibilité qu'il arrive le lundi soit maximale ne donne pas suffisamment d'informations pour savoir si le colis va réellement arriver le lundi, tout dépend de la valeur prise par l'événement contraire (*i.e.* le colis n'arrive pas lundi). Si nous considérons que la possibilité que le colis n'arrive pas lundi est nulle, alors cela traduit le fait que le colis ne peut pas arriver un autre jour de la semaine, il peut donc arriver le lundi (car : $\Pi(\{\text{lundi}\} = 1)$ et ne peut pas arriver un autre jour (car : $\Pi\{\text{mardi, ..., dimanche}\} = 0$), on est donc *certain* que le colis arrivera lundi. À l'inverse, si la possibilité que le colis n'arrive pas lundi est également de 1 (*i.e.* $\Pi\{\text{mardi, ..., dimanche}\} = 1$) alors, le colis peut aussi bien arriver le lundi que n'importe quel autre jour de la semaine. On n'a donc aucune idée de ce qui va réellement se produire. Notre incertitude sur cet événement est totale.

16. Contrairement à une *distribution de possibilité,* une fonction d'appartenance n'est pas tenue d'avoir 1 pour supremum. On parle de *sous-ensemble flou* normalisé quant au moins un de ces éléments à un degré d'appartenance égal à un (BOUCHON-MEUNIER 2007).

La certitude d'un événement ne peut donc être jugée qu'à l'aune de deux mesures, la possibilité d'un événement et la possibilité de l'événement contraire. La théorie des possibilités définit donc une seconde mesure : *la nécessité* (N), quantifiant la certitude que l'on a sur la réalisation d'un événement donné. La *nécessité* est une mesure duale de la possibilité, exprimée à partir de la possibilité du contraire de l'événement étudié ($\Pi(A^C)$) :

$$\forall A \in P(X), N(A) = 1 - \Pi(A^C) \tag{8.13}$$

Comme la *mesure de possibilité,* une *mesure de nécessité* est une fonction (N) attribuant à chaque partie de l'ensemble des événements un degré, compris entre 0 et 1 ($N : P(X) \to [0, 1]$). Cette fonction N doit également :

— Attribuer un coefficient nul à *l'ensemble vide* : $N(\emptyset) = 0$

— Attribuer un coefficient de 1 à *l'ensemble des événements :* $N(X) = 1$

— Définir la *nécessité* disjonctive de deux événements (A et B) comme la *nécessité* de l'événement le moins nécessaire : $\forall A, B \in P(X),\ N(A \cap B) = \min(N(A),\ N(B))$

Ce qui implique que plus l'événement complémentaire de A est *possible,* moins A est nécessaire. Pour reprendre l'exemple précédent, si la *possibilité* que le colis arrive lundi est de 1 et que la *possibilité* qu'il n'arrive pas lundi est également de 1, alors la *nécessité* que le colis arrive lundi est nulle. Dans cette configuration, il est parfaitement possible que le colis arrive lundi (*i.e.* la possibilité est maximale) mais on n'en est absolument pas sûr (*i.e.* la nécessité est nulle). Si la *possibilité* que le colis n'arrive pas lundi est nulle, alors la *nécessité* qu'il arrive lundi est de 1, c'est-à-dire qu'on a une confiance absolue dans la réalisation de cet événement. La dualité de ces deux mesures contraint cependant leurs valeurs respectives. Tout d'abord la *nécessité* ne peut pas être plus élevée que la *possibilité*[17], mais les deux valeurs peuvent cependant être égales, comme dans le cas d'une certitude absolue en la réalisation d'un événement [18], par conséquent :

$$\forall A \in P(X), N(A) \leq \Pi(A) \tag{8.14}$$

De plus, comme la nécessité d'un événement est liée à la possibilité de l'événement opposé (Équation 8.13) et que la possiblité d'un événement et de son opposé sont liées (Équation 8.10) alors la nécessité et la possibilité sont également liées :

$$\forall A \in P(X), \max(\Pi(A), 1 - N(A)) = 1 \tag{8.15}$$

Cette caractéristique a deux conséquences majeures :

— S'il existe une incertitude sur la réalisation d'un événement alors la possibilité est maximale ; si : $N(A) \neq 0,$ alors : $\Pi(A) = 1$

— Si l'événement n'est pas « tout à fait possible » alors il n'est pas nécessaire ; si : $\Pi(A) \neq 1,$ alors : $N(A) = 0$

Ces deux propriétés impliquent que dès qu'un événement est, ne serait-ce qu'un peu, certain ($N(A) \neq 0$) alors il est parfaitement possible ($\Pi(A) = 1$). De même, si un événement n'est pas parfaitement possible ($\Pi(A) \neq 1$) alors on ne peut pas être certain ($N(A) = 0$) qu'il se produira.

17. Ce qui traduirait une situation, absurde, où un événement doit arriver mais ne le peut.
18. Dans ce cas, la certitude et la nécessité ont une valeur de 1.

Étant donné que la nécessité et la possibilité sont des mesures duales, on peut définir la mesure de nécessité ($N(A)$) à partir de la distribution de possibilité (π) :

$$N(A) = \inf_{x \notin A}(1 - \pi(x)) = 1 - \sup_{x \notin A} \pi(x) \tag{8.16}$$

Ainsi, une seule distribution (π) est nécessaire pour calculer les mesures de possibilité et de nécessité de chaque événement. Par exemple, si l'on reprend la distribution de possibilité proposée par la Figure 8.6, on peut calculer la nécessité de chaque événement. Par exemple, si la possibilité que le colis arrive le lundi est de 1, alors la nécessité de ce même événement est de 0,2, puisque que le minimum de la fonction $1 - \pi(x)$, pour tous les événements à l'exception de celui étudié est de 0,2 (ce qui correspond a : $1 - \pi(\{\text{mardi}\})$).

8.2.1.2 Modélisation conjointe de *l'incertitude* et de *l'imprécision*

Pour permettre la modélisation conjointe de *l'imprécision* et de *l'incertitude,* il est nécessaire de combiner le formalisme de la théorie des possibilités à la théorie des sous-ensembles flous. Comme nous l'avons déjà indiqué, une fonction d'appartenance normalisée possède les mêmes caractéristiques qu'une distribution de possibilité. On peut alors définir la distribution de possibilité de la manière suivante :

$$\forall x \in X, \pi_{V,A}(x) = f_A(x) \tag{8.17}$$

Ainsi, si un élément a un degré d'appartenance de 0,7 au sous-ensemble flou A, alors la possibilité que V prenne la valeur x est également de 0,7 et sa nécessité est nulle. Comme le signale Bouchon-Meunier (1995), la capacité de définir une distribution de possibilité à partir d'une fonction d'appartenance n'implique pas que ces deux fonctions doivent être identiques. Il est possible de combiner une distribution de possibilité et une fonction d'appartenance différentes. C'est par exemple le cas lorsque l'on cherche à définir une incertitude s'appliquant de manière homogène à tous les éléments du sous-ensemble flou considéré.

Dans le cas où une même valeur d'incertitude s'applique à tous les éléments de l'ensemble de référence, alors aucun de ces éléments ne peut être qualifié d'impossible. Admettons que l'on cherche à spatialiser l'indice de localisation : « Elle est à 500 mètres du refuge ». Pour ce faire, on recourra la relation de localisation atomique `orla#ADistancePlanimetrique`, qui emploie le fuzzyficateur `orla#EqVal` avec une valeur de référence de 500 mètres. La spatialisation de cette relation de localisation permet alors de construire une ZLC représentée par un raster ne comprenant que les pixels qui lui appartiennent, au moins partiellement (chapitre 6). Dans le cas où ce même indice de localisation n'est pas tout à fait certain (*e.g.* « Je pense qu'elle est à 500 mètres du refuge »), il devient impossible d'affirmer qu'un pixel donné n'appartient pas à la zone de localisation compatible. On ne peut donc pas attribuer un degré d'appartenance nul aux pixels, même s'ils sont situés à très grande distance de l'objet de référence. Dans ce cas la *distribution de possibilité* (π) de cette proposition est obtenue en tronquant la base de la fonction d'appartenance par la droite d'ordonnée i (Bouchon-Meunier 2007). La *distribution de possibilité* (π'), combinant une incertitude constante, de valeur i et une imprécision modélisée par la distribution de possibilité π est donc :

$$\pi'(x) = \max(\pi(x),\ i). \tag{8.18}$$

On peut remarquer que dans cette situation où l'on modélise une incertitude constante, la valeur de la *mesure de nécessité,* quantifiant la certitude, est égale au plus grand écart entre la

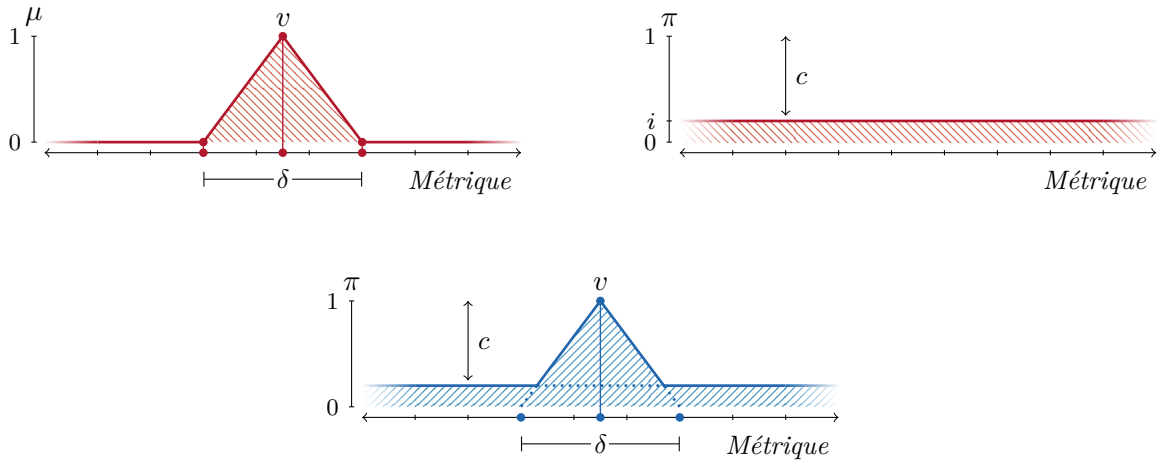


FIGURE 8.7 – Illustration de la combinaison d'une distribution de possibilité constante et d'une fonction d'appartenance.

mesure de possibilité [19] et la fonction π'. Comme la nécessité mesure la certitude, plus cet écart est important, plus la certitude est importante et le degré d'appartenance minimal est faible, à l'inverse, plus cet écart est important, plus l'incertitude est élevée, plus la valeur minimale prise par la fonction d'appartenance π' est importante et les variations liées à la distribution de possibilité π sont réduites.

La Figure 8.7 illustre le résultat d'une telle combinaison. On commence par définir une fonction d'appartenance triangulaire et normalisée, équivalente à celle proposée par le *fuzzyficateur* `orla#EqVal` et permettant de modéliser une assertion logique telle que : « La *métrique* à une valeur d'environ v ». On définit en parallèle une distribution de possibilité homogène, de certitude c, indiquant qu'il est totalement possible et nécessaire (faiblement dans cet exemple) que la *métrique* prenne n'importe quelle valeur de l'ensemble des valeurs possibles. On peut ensuite combiner ces deux fonctions, pour obtenir la distribution de possibilité π', correspondant à la fonction d'appartenance précédemment définie, dont la *certitude* a diminué, jusqu'à une valeur c. Comme le montre clairement la Figure 8.7, il est ici impossible d'obtenir un degré d'appartenance inférieur à l'incertitude $(1 - c)$, quelle que soit la valeur de la *métrique*. Les ZLC construites à partir d'une fonction d'appartenance seront donc constituées de tous les pixels de la ZIR.

8.2.2 La modélisation de la confiance d'un *indice de localisation*

Dans notre cas, nous utilisons la théorie des possibilités pour représenter le doute du secouriste sur la véracité de l'indice de localisation donné par le requérant. Ce parti pris a une implication majeure. Comme les sous-ensembles flous que nous manipulons représentent des *zones de localisation,* alors la certitude s'applique de manière homogène à l'ensemble de *l'indice de localisation,* dit autrement nous nous plaçons dans le cadre de l'équation 8.18.

Pour prendre en compte la confiance du secouriste dans un indice de localisation donné, on peut employer la méthode décrite ci-dessus, permettant d'aboutir à la Figure 8.7. Comme pour les modifieurs (chapitre 7), la modification de la certitude implique une modification de

19. Dont la valeur est nécessairement de 1 puisqu'il y a incertitude.

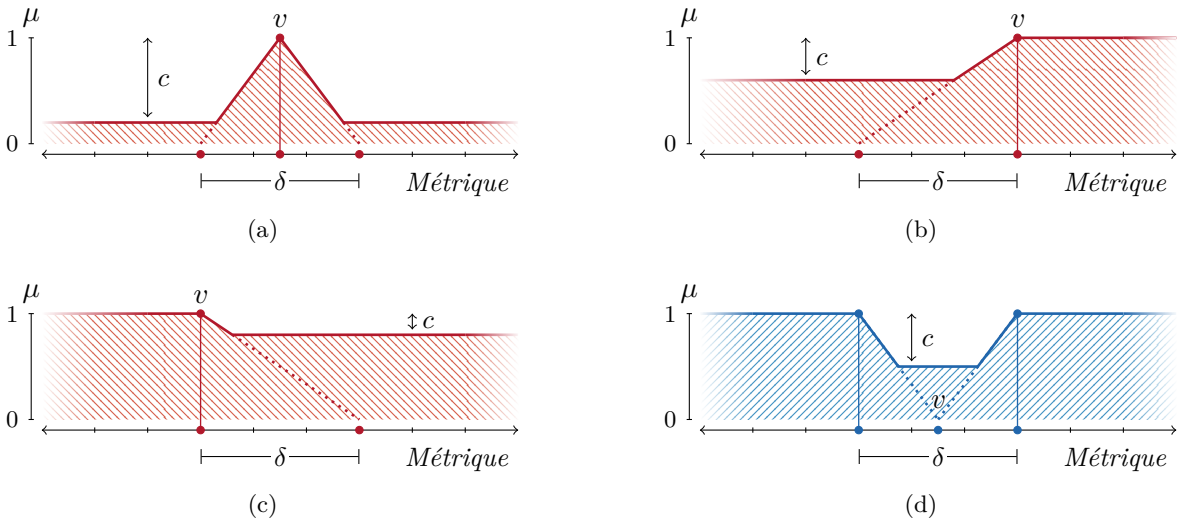


FIGURE 8.8 – Représentation des *fonctions d'appartenance* des *fuzzyfieurs* orla#EqVal (a), orla#SupVal (b), orla#InfVal (c) et orla#EqVal avec le *modifieur* orla#Not (d), avec une *certitude* (c) variable (respectivement 0,8, 0,4, 0,2 et 0,5).

la forme de la fonction d'appartenance utilisée pour *spatialiser l'indice de localisation,* mais cette modification n'est pas réellement effectuée lors de la fusion. La ZLC spatialisant *l'indice de localisation* incertain, est simplement unie avec un raster homogène, attribuant à chaque pixel un degré d'appartenance égale à l'incertitude ($1-c$). Comme pour les *modifieurs,* on peut représenter le résultat de la modification théoriques des fonctions d'appartenance. La Figure 8.8 représente la forme des principales fonctions d'appartenance définies précédemment, avec une certitude variable. De manière similaire, au comportement des modificateurs, la diminution de la confiance modifie la forme générale de la courbe, mais ne change pas les paramètres du *fuzzyficateur,* que sont l'écartement (δ) et la valeur de référence (v). Toutefois, contrairement aux *modifieurs,* la modification de la confiance a également pour effet de changer la valeur de seuils de la fonction d'appartenance. En effet, si la pente des fonctions appartenance est conservée lors du rehaussement de la valeur minimale, ce n'est pas le cas de la valeur où la fonction d'appartenance atteint la valeur nulle, cette dernière étant rehaussée par la diminution de la confiance.

On peut illustrer les effets de cette modélisation en comparant le résultat de la *spatialisation* d'un même *indice de localisation* avec une confiance variable. La Figure 8.9 illustre la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#PresDe (comme pour les figures 8.2 et 8.3) à partir du même pixel, avec la même fonction d'appartenance. Cependant, alors qu'une confiance absolue est donnée au premier cas, c'est une confiance partielle (0,4) qui est donnée à la seconde modélisation. Comme nous l'avons indiqué précédemment, aucune position ne possède un degré d'appartenance inférieur à l'incertitude, ici 0,6. Par conséquent aucune position de la ZIR ne peut pas ne pas appartenir à la ZLC. On peut remarquer que la modification de la certitude à un impact conséquent sur la ZLC. Réduire la confiance a donc un impact conséquent sur les ZLC et par extension sur la ZLP, par le biais de l'intersection des ZLC.

Cette manière de traiter l'incertitude impose cependant de définir manuellement une valeur de confiance, pour chaque indice, ce qui nous semble nécessiter trop de manipulations pour

(a) (b)

FIGURE 8.9 – Modélisation d'un même *relation de localisation atomique* (`orla#PresDe`), à partir du même *objet de référence* avec deux certitudes différentes, absolue et partielle (0,4).

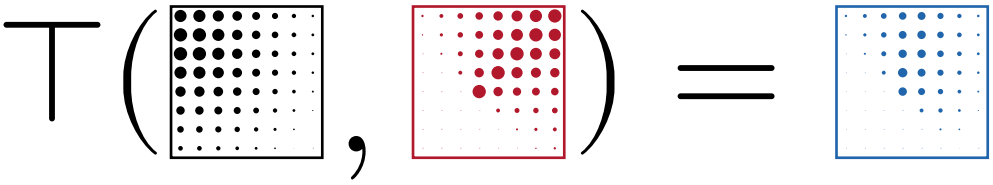
une tâche devant être réalisée dans des conditions pouvant être critiques. Nous proposons donc de pré-définir des valeurs de certitude correspondant à des descriptifs qualitatifs, tels que « confiance forte » ou « confiance faible », ce qui a pour effet de simplifier la qualification des indices de localisation par les secouristes.

L'influence de l'incertitude sur la fusion des zones de localisation compatibles

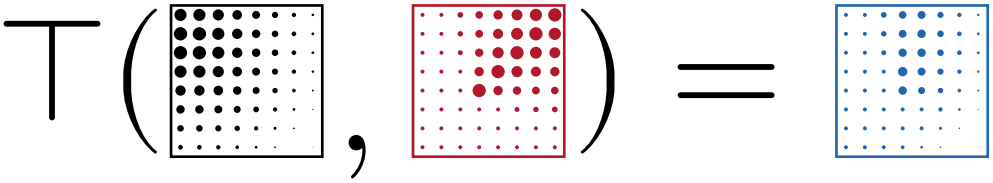
La t-norme de ZADEH que nous utilisons pour les intersections inter-ZLC a pour effet de retirer de la ZLP tout pixel ayant un degré d'appartenance nul à une des ZLC intersectées. Or, la diminution de la certitude d'un indice de localisation a pour effet d'attribuer un degré d'appartenance non nul à tous les pixels qui, en cas de certitude absolue, auraient été considérés comme en dehors de la ZLC. Ainsi, ces pixels, qui auraient été retirés de la ZLP par le jeu des intersections peuvent à présent s'y retrouver, ce qui conduit à une augmentation de la taille de la ZLP.

La Figure 8.10 illustre ce phénomène, en représentant le résultat de l'intersection de deux zones de localisations compatibles, la première spatialisant une relation de proximité et la seconde une orientation. Le premier cas correspond à toutes les fusions que nous avons réalisées jusqu'ici, les deux ZLC ont une certitude absolue et il existe donc des pixels n'appartenant pas à chacune des ZLC (8.10a). La seconde situation y ajoute la prise en compte de la certitude. Elle figure un cas où le secouriste aurait décidé d'attribuer une confiance moyenne (0,7) (8.10b). Tous les pixels ayant un degré d'appartenance inférieur à 0,3 voient donc leur degré d'appartenance à la ZLC augmenter. Il en résulte une zone de localisation assez différente, où aucun pixel n'a un degré d'appartenance nul. Ainsi, cette seconde ZLC dont dépendait la valeur de nombreux pixels dans le premier cas (8.10a), devient moins contraignante. Cela se voit particulièrement dans la partie inférieure-gauche de la ZIR. Sans incertitude, aucun pixel de cette partie n'appartenait à la ZLP, ces derniers étant contraints par la seconde ZLC. Avec l'augmentation de l'incertitude de cette même ZLC, des pixels qui avaient auparavant un degré d'appartenance nuls obtiennent un degré d'appartenance non nul sur les deux ZLC, ils sont donc intégrés à la ZLP. On peut également remarquer qu'avec l'augmentation de l'incertitude, seule la première ZLC peut permettre de retirer des pixels de la ZLP. Autrement dit, pour qu'une position soit absente de la ZLP, il faut qu'une ZLC « affirme » que cette position n'y est pas. Ainsi, une ZLC spatialisant un indice de localisation incertain ne pourra pas réduire la ZLP, seulement diminuer le degré d'appartenance de certaines positions.

Dans le cas où tous les indices sont incertains, alors aucune position de la ZIR ne pourra avoir un degré d'appartenance nul. La ZLP occupera alors tout l'espace de la ZIR. Dans ces conditions, seules les variations de degré d'appartenance permettent d'identifier les régions correspondant le mieux à la description donnée par le requérant.



(a)



(b)

FIGURE 8.10 – Résultat de l'intersection de deux ZLC avec la *t-norme* de ZADEH sans (a) et avec (b) incertitude.

8.3 Présentation détaillé des étapes de la fusion

Pour illustrer le déroulement de la *phase de fusion,* nous nous fonderons sur l'exemple de la construction de la ZLP correspondant à *l'ensemble des indices de localisation* « Je suis à l'extérieur, au sud du sommet et je suis proche d'un refuge » (Figure 8.11). Pour les besoins de l'exemple, nous considèrerons que le secouriste a attribué une confiance absolue au premier *indice*[20] et une confiance moyenne (*i.e.* un coefficient de 0,6) au second. Pour le second *indice de localisation* utilisant un *objet de référence indéfini* (*e.g.* « un refuge »), nous avons considéré qu'il n'existait que deux objets candidats, utilisés pour la spatialisation des ZLC C et D (Figure 8.11).

Au terme de la *phase de spatialisation* (chapitre 7) nous disposons donc de quatre ZLC : (1) la ZLC A, spatialisant la *relation de localisation atomique* `orla#HorsDe` pour *l'objet de référence* forêt, (2) la ZLC B, spatialisant la *relation de localisation atomique* `orla#SudDe`, également pour *l'objet de référence* forêt, (3) la ZLC C, spatialisant la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe` pour la première des deux instances de type « refuge » identifiées, et (4) la ZLC D, spatialisant la *relation de localisation atomique* `orla#PresDe` pour le second refuge.

8.3.1 La *fusion* des *relations de localisation atomiques*

La première étape de la *phase de fusion* consiste en une intersection des ZLC spatialisant une *relation de localisation atomique* décomposant la même *relation de localisation,* pour le même *objet de référence,* issu du même *indice de localisation.* Dans l'exemple illustré par la Figure 8.11, on retrouve deux configurations différentes. Dans la partie supérieure de la figure

20. C'est le choix qui a implicitement été fait lors de la *spatialisation* de cet *indice* dans le chapitre 5.

se situent les ZLC A et B, spatialisant deux *relations de localisation atomiques* traitant du même *indice de localisation* (« Je suis à l'extérieur, au sud de la forêt »), du même *objet de référence* (« forêt ») et de la même *relation de localisation* (`orl#AuSudDeExterne`). Ces deux *zones de localisation compatibles* doivent donc être *fusionnées,* de manière a construire la ZLC spatialisant la *relation de localisation* `orl#AuSudDeExterne` pour *l'objet de référence* « forêt », de *l'indice de localisation* : « Je suis à l'extérieur, au sud de la forêt ». Cette nouvelle *zone de localisation* est construite en *intersectant* les ZLC A et B, ce qui équivaut à construire une *zone* constituée de toutes les positions de la ZIR validant l'assertion « Cette position est au sud de la forêt » *et* l'assertion « Cette position est à l'extérieur de la forêt ». Conformément aux opérateurs précédemment sélectionnés, cette intersection est réalisée en prenant, pour chaque position de la ZIR, la valeur minimale des deux degrés d'appartenance. On obtient alors la ZLC AB.

Dans la seconde partie de la figure, on retrouve les ZLC C et D, spatialisées à partir de la décomposition de *l'indice de localisation* : « Je suis proche d'un refuge ». Bien que provenant du même *indice de localisation,* ces ZLC n'ont pas à être fusionnées lors de cette étape. En effet elles sont toutes deux construites à partir d'une *relation de localisation atomique* (`orla#ProcheDe`), il n'est donc pas nécessaire d'intersecter ces deux zones.

8.3.2 La *fusion* des *objets de référence indéfinis*

La seconde étape de la *phase de fusion* est la fusion des *objets de référence indéfinis.* Son objectif est de regrouper les ZLC spatialisant la même *relation de localisation,* du même *indice de localisation* mais pour des instances différentes du même type *d'objet de référence.* Comme pour la fusion des *relations de localisation atomiques,* cette étape ne concerne qu'une partie de l'exemple. Dans la partie supérieure de la Figure 8.11, un seul *objet de référence* est mentionné (« la forêt »), il n'y a donc pas d'alternatives qu'il serait nécessaire de regrouper, contrairement à la seconde partie de la figure.

Les ZLC C et D *spatialisent* en effet, la même *relation de localisation atomique* (et ne nécessitent donc pas d'être fusionnées lors de la première étape de la phase de spatialisation), mais pour deux instances différentes d'un même type *d'objet de référence.* Ces deux ZLC doivent donc être *fusionnées,* de manière à obtenir la *zone de localisation* spatialisant *l'indice de localisation* initial, c'est-à-dire avant la *décomposition des objets de référence* et la *décomposition des relations de localisation.* Pour ce faire, on crée l'union des deux ZLC, conformément à la méthode précédemment définie, ce qui équivaut à construire une ZLC constituée de toutes les positions *proches* d'au moins un refuge. Compte-tenu des opérateurs choisis, cette union est réalisée à l'aide de la *t-conorme* de Zadeh (1965). Le degré d'appartenance d'une position donnée, à l'union des ZLC C et D correspond donc au maximum de son degré d'appartenance pour ces deux ZLC.

8.3.3 La *fusion* des indices de *localisation*

Une fois que l'on dispose d'une ZLC par *indice de localisation,* on peut les regrouper pour obtenir la ZLP. Dans l'exemple de la Figure 8.11, cette dernière étape de *fusion* combine deux ZLC, celle correspondant à *l'indice de localisation* « je suis au sud et à l'extérieur de la forêt » et celle correspondant à l'indice de localisation « Je suis proche d'un refuge ». Comme lors de l'étape de la fusion des *relations de localisation atomiques,* on cherche à construire la *zone de localisation* correspondant à ces deux indices, c'est-à-dire la zone composée de toutes

les positions qui valident l'assertion « Cette position est au sud et à l'extérieur de la forêt » *et* l'assertion « Cette zone est proche d'un refuge ». Pour ce faire on construit, comme pour la première étape de cette phase, l'intersection de ces deux ZLC, avec la *t-norme* de Zadeh (1965). Le degré d'appartenance d'une position donnée à la ZLP est donc égal au minimum de son degré d'appartenance aux ZLC spatialisant les deux *indices de localisation.*

Cette étape n'est cependant pas un décalque de l'étape de fusion des *relations de localisation atomiques* appliquée à un autre regroupement de ZLC. Il est en effet nécessaire d'y adjoindre la prise en compte de la *certitude* des *indices de localisation.* Comme nous l'avons précédemment expliqué, la *certitude* est une grandeur s'appliquant uniformément à l'ensemble des positions de la ZIR utilisée pour *spatialiser* un *indice de localisation* donné.

Après la réalisation de cette dernière étape on obtient la ZLP, correspondant à la spatialisation de l'ensemble des indices localisation.

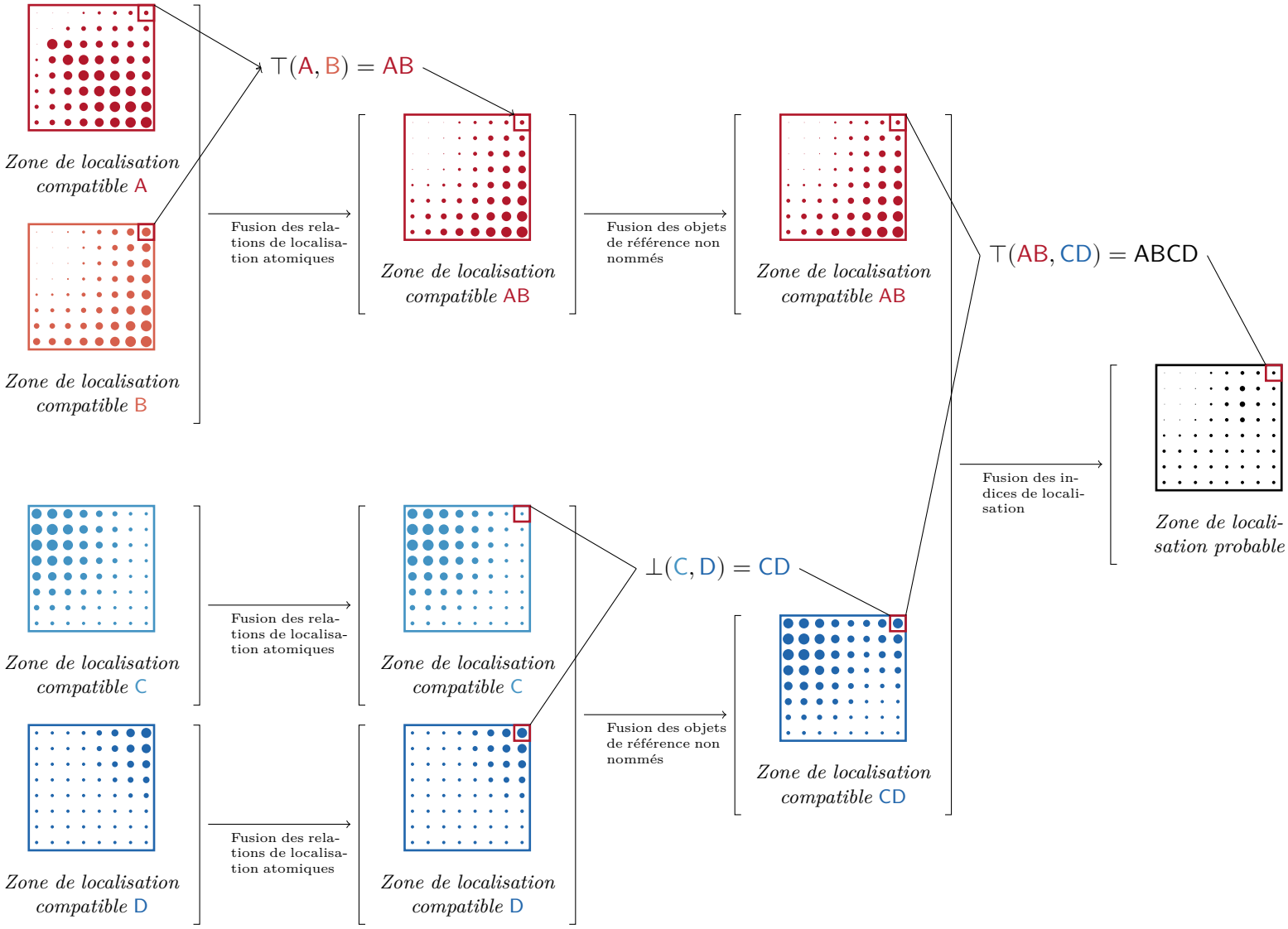


FIGURE 8.11 – Illustration de la phase fusion.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le déroulé de la dernière phase de notre méthode : *la fusion.* La *phase de fusion* a pour objectif de regrouper toutes les *zones de localisation* construites lors de la phase de spatialisation, en vue d'obtenir la zone de localisation probable de la victime.

Pour ce faire, il est nécessaire de fusionner les ZLC qui ont été construites à partir *d'indices de localisation,* décomposés lors de la première phase de la méthode. La phase de décomposition et la phase de fusion se répondent, si bien qu'aux trois étapes de décomposition répondent trois étapes de fusion. Pour être mises en place, ces étapes nécessitent des opérateurs permettant de réaliser des intersections et des unions inter-zones, les *t-normes* et les *t-conormes.* Toutefois, plusieurs couples de *t-normes*/*t-conormes,* aux propriétés diverses, ont été proposés dans la littérature. Après avoir analysé leurs caractéristiques spécifiques, nous avons choisi d'utiliser les opérateurs initialement proposés par Zadeh (1965), qui sont apparus comme les plus adaptés à notre cas d'application.

Nous avons également présenté la méthode retenue pour modéliser la confiance des secouristes dans les indices de localisation qu'ils traitent. Pour ce faire, nous avons employé la *théorie des possibilités* proposée par Zadeh (1978) en complément de la théorie des sous-ensembles flous et permettant de combiner modélisation de l'imprécision et de l'incertitude.

Au terme de ce chapitre nous avons donc un regard complet sur l'ensemble de la méthode proposée pour transformer des indices de localisation exprimés dans un référentiel indirect en des positions exprimées dans un référentiel direct.

Conclusion de la deuxième partie

Dans cette seconde partie, nous avons présenté la méthode que nous avons définie pour tranformer une description de position en une zone de coordonnées connues, c'est-à-dire exprimée dans un référentiel indirect. Nous avons organisé cette méthode selon trois phases, illustrées par la Figure 4.6, la décomposition, la spatialisation et la fusion chapitre 5. L'objectif de la phase de décomposition est de transformer *l'ensemble des indices de localisation* défini par le secouriste de manière à ce qu'il soit spatialisable. Cette décomposition s'opère en trois étapes : la décomposition de l'ensemble d'indices de localisation, la décomposition des objets de référence non nommés et la décomposition des relations de localisation. À la suite de ces trois étapes, on dispose d'une liste d'indices de localisation indépendants, qu'il est possible de spatialiser en parallèle chapitre 5, de manière à construire des *zones de localisation* imprécises.

Dans le chapitre 6, nous avons détaillé l'approche retenue pour représenter les zones de localisation. Nous avons opté pour une représentation raster de sous-ensembles flous, permettant d'attribuer à chaque position (échantillonnée par des pixels) de la zone étudiée un degré, quantifiant l'appartenance de la position à la zone étudiée.

La méthode de construction de ces zones a été présentée dans le chapitre 7. C'est au cours de la phase de spatialisation que les indices de localisation décomposés sont interprétés de manière à construire les zones de localisation. Nous avons défini un processus utilisant trois éléments : un *rasteriser,* sélectionnant et rasterisant la partie de l'objet de référence à utiliser, une *métrique,* qui est une grandeur permettant de quantifier la sémantique de la relation de localisation modélisée et un fuzzyficateur, qui interprète la valeur de la métrique de manière à construire une zone de localisation représentée par un sous-ensemble flou. Plusieurs de ces trois éléments ont été définis et leur combinaison permet de définir de nombreuses méthodes de spatialisation.

Enfin, le chapitre 8, nous a permis de présenter la dernière étape de notre méthode, *la phase de fusion.* C'est au cours de cette phase que les différentes zones de localisation construites lors de la spatialisation sont regroupées de manière à construire une seule zone de localisation, la zone de localisation probable, correspondant à l'ensemble des positions qui valident toutes les informations données par le requérant, c'est-à-dire l'ensemble des indices de localisation.

Troisième partie

Applications, résultats et critiques de la méthode proposée

Introduction de la troisième partie

« Pour voir loin, il faut y regarder de près. »

— Pierre Dac

Dans cette troisième et dernière partie nous allons détailler l'application de la méthode précédemment présentée (cf. Partie II) à des cas réels. Cette partie présente et commente la manière dont nous avons construit les *zones de localisation probables* spatialisant deux alertes réelles, auxquelles les secouristes du PGHM de Grenoble ont été confrontés. Nous présenterons chaque alerte et détaillerons la manière dont les indications données par les requérants ont été formalisés en *indices de localisation.* Nous détaillerons ensuite la manière dont ces indices ont été décomposés, pour ensuite être spatialisés et fusionnés. Cette approche nous permettra de mettre en évidence les principales limites de notre travail et de présenter les solutions permettant de les contourner. Cette partie ne se compose que d'un seul chapitre, le 9.

Chapitre 9

Résultats et analyse critique

Introduction 221
9.1 Généralités sur la modélisation des alertes 222
9.1.1 L'implémentation de la méthode de spatialisation 222
9.1.2 Présentation des alertes 224
9.1.3 Données 225
9.2 Première alerte : Grand Veymont 226
9.2.1 Analyse et décomposition en indices de localisation de l'alerte 226
9.2.2 Modélisation de l'alerte 231
9.2.3 Critique de la modélisation 251
9.3 Seconde alerte : le *fil rouge* 253
9.3.1 Présentation de l'alerte 253
9.3.2 Modélisation de l'alerte 258
9.3.3 Critique de la modélisation 269
Conclusion 270

Introduction

Dans ce neuvième et dernier chapitre, nous allons présenter l'application de la méthode présentée au cours des chapitres précédents à des cas réels, des alertes précédemment traitées par le PGHM. Pour ce faire, nous avons sélectionné deux alertes qui, combinées, permettent de soulever de nombreuses questions sur la spatialisation et mettent en évidence plusieurs problèmes. Avant de détailler ces deux alertes et la manière dont elles ont été traitées, nous présenterons le détail de l'implémentation de notre méthode et les différents choix techniques qui ont été faits dans cette optique.

Dans la première partie de ce chapitre (section 9.1), nous présenterons la manière dont nous avons implémenté la méthode définie, puis nous détaillerons la modélisation de deux alertes : le « Grand Veymont » (section 9.2) et le « fil rouge » (section 9.3).

9.1 Généralités sur la modélisation des alertes

9.1.1 L'implémentation de la méthode de spatialisation

Pour permettre la confrontation de notre méthode à la réalité, nous avons développé un prototype, baptisé *Ruitor*[1], implémentant l'ensemble de la méthode que nous avons développée, c'est-à-dire les phases de décomposition, de spatialisation et de fusion. Par ailleurs, l'ensemble des résultats que nous avons présentés jusqu'ici (à l'exceptions de ceux présentés dans le chapitre 6) et ceux qui seront présentés dans ce chapitre, ont été réalisés avec ce prototype.

Ruitor a été entièrement développé à l'aide du langage de programmation python, dans sa version 3.5, de septembre 2015 (Van Rossum et al. 2009). Ce langage a été sélectionné pour deux raisons principales : (1) D'une part, car c'est un langage de programmation avec lequel nous avons une certaine expérience (Bunel et al. 2017a,b), ce qui nous a permis de limiter le temps de développement consacré à la résolution de problèmes qui auraient pu être causés par une mauvaise maitrise du langage. (2) D'autre part, il s'agit d'un langage populaire et répandu, notamment en géomatique, que ce soit dans la recherche ou dans le milieu professionnel. De nombreuses bibliothèques utiles pour l'implémentation de notre méthode sont donc développées dans ce langage. Le choix d'un langage de développement ne fixe pas à lui seul le cadre d'un développement. En effet, plusieurs approches de développement, utilisant le même langage, sont envisageables. Une première solution serait d'employer le *cadriciel* fourni par les différents SIG professionnels, comme QGis ou ArcGis. Cette solution permet de disposer des nombreuses fonctions de manipulation, d'analyse et de visualisation de ces logiciels. Cette approche a cependant deux défauts, dont l'un majeur. Tout d'abord, il est nécessaire de se familiariser avec ces fonctions spécifiques, ce qui peut nécessiter un temps d'apprentissage conséquent, bien que cette remarque soit valable pour n'importe quelle bibliothèque logicielle. De plus, le choix d'utiliser le *cadriciel* d'un SIG donné, impose une forte dépendance à ce logiciel, ce qui peut considérablement augmenter la difficulté du déploiement d'un logiciel fondé sur ces technologies. À la réflexion, l'utilisation du *cadriciel* d'un SIG nous semble plus adapté à un développement de *scripts* — de petits logiciels conçus pour une tâche spécifique et déclenchés manuellement par l'utilisateur —, étendant les fonctionnalités d'un SIG, plutôt que d'un logiciel unique, fonctionnant de manière quasi-automatisée.

Le rejet des *cadriciels* d'un SIG n'impose, cependant, pas de se passer de toute bibliothèque de manipulations de données géométriques. Certains projets libres, au premier rang desquels on trouve les développements de *l'open géo consortium* (OGC), proposent de nombreuses bibliothèques permettant la manipulation de données géographiques, qu'elles soient représentées par des vecteurs ou des rasters. Cependant, les fonctions qui auraient été regroupées dans un même *cadriciel,* sont alors dispersées entre plusieurs bibliothèques indépendantes, généralement plus flexibles, mais qui ne sont pas nécessairement conçues pour fonctionner ensemble.

Choisir entre un *cadriciel* de SIG et un ensemble de bibliothèques indépendantes, revient donc à choisir entre un cadre de développement cohérent, mais contraignant par son apprentissage et sa mise en place, et un ensemble de bibliothèques indépendantes, plus versatiles. Nous avons privilégié la seconde option, les contraintes apportées par les *cadriciels* de SIG étant trop restrictives.

Les trois phases de notre méthode traitant d'objets différents (*i.e.* des *indices de localisation* dans la phase de décomposition et des ZLC dans la phase de spatialisation et de fusion), il nous est nécessaire d'employer des bibliothèques spécifiques pour chacune des tâches, ce qui a

1. Le nom Ruitor fut porté par un Saint-Bernard célèbre du XIXème.

compliqué le processus de développement.

Lors de la présentation de la *phase de décomposition* (chapitre 5), nous avions indiqué que la difficulté la mise en place de cette phase était concentrée sur la dernière étape : la décomposition des *relations de localisation,* les *indices de localisation* et les *objets de référence* étant déjà décomposés lors de leur saisie par le secouriste. Par corolaire, l'implémentation des deux premières étapes de la phase de décomposition ne pose pas, non plus, de problèmes particuliers.

En effet, au début de la phase de décomposition — et donc de la méthode dans son ensemble — nous disposons de la requête du secouriste formalisée dans une structure de données que nous avons nous-même définie. Les *différents indices de localisation* sont regroupés dans *l'ensemble des indices de localisation* et, si les *indices de localisations* se réfèrent à plusieurs *objets de référence* (*i.e.* dans le cas où les objets de référence ne sont pas nommés) alors ces derniers sont explicitement présents dans la requête. Ainsi, la requête transmise par le secouriste contient l'ensemble des informations nécessaires à la décomposition de l'ensemble des *indices de localisation* et à la décomposition des objets de référence non nommés. Du point de vue de l'implémentation, ces deux étapes se résument en la transformation d'une structure de données (la requête du secouriste) en une autre, que l'on sait traiter. La troisième étape de la phase de décomposition, la *décomposition des relations de localisation,* a nécessité un travail d'implémentation plus important. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 5, la décomposition des relations de localisation nécessite des informations supplémentaires à celles transmises par le secouriste. Ces informations sont explicitéés dans *l'ontologie des relations de localisation* (ORL). La réalisation de cette dernière étape de la phase de localisation nécessite donc de lire et d'interpréter les informations formalisées dans l'ontologie ORL. Dans Ruitor, cette tâche est principalement effectuée à l'aide de la bibliothèque *Owlready* (Lamy 2017), permettant la lecture et la manipulation d'ontologies OWL. Cette bibliothèque nous permet de lire les informations présentes dans ORL et ORLA afin d'identifier les relations de localisation atomiques décomposant, le cas échéant, les relations de localisation utilisées par le secouriste et d'identifier le *rasteriser,* la *métrique* et le *fuzzyficateur* utilisés pour spatialiser les relations de localisation atomiques.

Les phases de spatialisation et de fusion sont implémentées de manière très différente de la phase de décomposition. En effet, ces phases nécessitent la manipulation et le traitement d'objets géographiques, contrairement à la phase de décomposition. La mise en place de ces étapes nécessite donc de mettre en place de nouveaux outils pour manipuler les géométries. Notre travail faisant une grande utilisation de rasters, la bibliothèque permettant leur manipulation prend une place centrale lors de cette étape. Dans l'état actuel de l'implémentation, nous ne pouvons traiter que des objets de référence représentés sous la forme de données vectorielles. Ces données sont traitées à l'aide des bibliothèques python *fiona* (Gillies 2020a), *shapely* (Gillies 2020b) et *gdal* (GDAL/OGR contributors 2020), qui nous permettent de manipuler et de rasteriser les objets vectoriels. La première étape de la spatialisation, la rasterisation (chapitre 7), est donc effectuée à l'aide de ces trois bibliothèques.

La manipulation des rasters, au cœur de notre travail, est construite autour de la bibliothèque *numpy,* conçue pour le calcul scientifique et plus précisément la manipulation optimisée de matrices volumineuses (van der Walt et al. 2011). Le type de données, défini par *numpy*[2], fait office de standard du calcul scientifique dans l'univers *python,* il est donc à la base de nombreuses bibliothèques de calcul scientifique. Cette bibliothèque est complétée par la bibliothèque *rasterio* (Mapbox 2020) qui permet de traiter des rasters comme des matrices

2. Le *ndarray,* pour "N-dimensional array" (Tableau multidimensionnel).

numpy. Les étapes de *calcul de la métrique* et de *fuzzyfication* sont effectuées directement avec *numpy.* La bibliothèque *numpy* permet d'effectuer de nombreux calculs avancés, ce qui nous permet de calculer de nombreux types de *métriques.* Toutefois, certaines méthodes spécifiques, qui pourraient être utiles pour le calcul de certaines *métriques,* n'y figurent pas. C'est pourquoi nous avons également fait appel aux bibliothèques *SciPy* et *scikit-image* (van der Walt et al. 2014 ; Virtanen et al. 2020) qui proposent des outils supplémentaires, utiles pour le calcul de certaines métriques (*e.g.* distance à la partie la plus proche de l'objet de référence), tout en opérant de à partir des types de données définis par *numpy.*

Les *zones de localisation compatibles* et *probables* sont directement représentées par des matrices *numpy.* Nous avons cependant développé une bibliothèque, basée sur *rasterio* (Mapbox 2020), permettant de simplifier et d'automatiser au maximum la création de rasters flous (et donc, dans le cas présent la phase de fuzzyfication) et les opérations inter-raster, comme les unions et les intersections.

Dans son état actuel, Ruitor n'offre pas encore la possibilité de traiter directement les indices saisis dans l'interface développée au sein du projet Choucas (Viry et al. 2019b) et de lui renvoyer les *zones de localisation compatibles* et *probables* construites. La mise en commun de ces deux travaux de développement nécessite de travailler à la définition d'une interface commune. Bien que cette mise en commune ne soit pas un objectif de cette thèse, mais plutôt un objectif a moyen-terme du projet Choucas, ce travail a été entamé et est toujours en cours à l'heure actuelle. L'objectif premier étant de proposer un prototype intégré et fonctionnel au PGHM d'ici la fin du projet Choucas.

9.1.2 Présentation des alertes

Nous ne pouvions, dans le cadre de ce travail et de ce manuscrit, traiter l'ensemble des alertes dont nous disposons. Nous avons donc choisi de nous focaliser sur deux d'entre elles, présentant des caractéristiques pertinentes à étudier et permettant d'aborder des problèmes différents.

La première des alertes que nous avons sélectionnée est l'alerte dite du *Grand Veymont.* Il s'agit d'une alerte relativement courte et contenant moins d'une vingtaine d'indices de localisations. Bien qu'elle soit courte, des indices de localisation de nombreux types différents y sont présents et des relations de localisation assez différentes sont énoncées. Cette alerte est relativement simple à traiter. En effet, tous les *objets de référence* utilisés par le requérant pour décrire sa position sont nommés et les descriptions données sont assez précises. Toutefois, des relations de localisation assez variées sont utilisées. La modélisation de cette alerte nous permet donc d'aborder de nombreuses questions de modélisation, tout en évitant les problèmes liés à la modélisation d'indices de localisation imprécis.

La seconde alerte traitée est le *fil rouge.* Le nombre d'indices de localisation qu'elle contient est relativement similaire, mais là où les indices de la première alerte sont relativement précis, ceux du *fil rouge* sont très imprécis, comme nous l'avons déjà mentionné. Cette seconde alerte est donc beaucoup plus difficile à modéliser. Le traitement de ces deux alertes nous permet donc de traiter de nombreuses questions de modélisation. Toutes deux emploient des relations de localisation différentes et posent des question inédites. À elles seules, ces deux alertes ne permettent cependant pas de modéliser toutes les relations de localisation que nous avons définies dans l'ontologie ORL. Cependant, elles permettent d'en traiter un grand nombre et donc de donner un regard assez complet sur l'exercice de la spatialisation d'alertes réelles.

Il est à noter que le processus de modélisation des alertes que nous présentons ici est quelque

peu différent de celui qui sera mis en place lors de l'utilisation réelle de notre solution. En effet, on s'attend à ce que lors d'une utilisation normale de Ruitor (par le biais de l'interface développée dans le lot 2), le secouriste saisit les indices de localisation en direct, à partir des informations que le requérant lui donne par téléphone. Ainsi, si certaines informations ne sont pas suffisantes pour utiliser une relation de localisation donnée (*e.g.* une estimation de temps de marche, sans préciser la vitesse de temps de marche ou une indication d'orientation sans préciser le référentiel), le secouriste peut demander des précisions et compléter ou modifier des indices qu'il aurait saisi autrement (ou pas pris en compte) sans plus d'informations. Il est donc envisageable que dans une utilisation « normale » de notre prototype, les secouristes tendent à se focaliser sur un nombre réduit *d'indices de localisation,* en cherchant à les exploiter au maximum.

Les traitements que nous proposons ici sont quelque peu différents. En effet, nous proposons de construire les *zones de localisation probables* correspondant à des alertes déjà traitées. Ainsi, nous ne pouvons reproduire la démarche qu'auraient les secouristes lors d'une utilisation « normale » de notre prototype. Nous ne pouvons que chercher à identifier les indices de localisation correspondant aux informations données durant la conversation entre le secouriste et le requérant. Ainsi, là où l'utilisation que nous envisageons pour Ruitor nécessite une démarche active, nous ne pouvons avoir qu'une démarche passive. Les exemples que nous proposons ici ne doivent donc pas être interprétés comme une illustration fiable, voire un manuel, du processus à suivre pour spatialiser les descriptions de position données par le requérant, mais plutôt comme une discussion autour de la modélisation d'une partie des relations de localisation et sur les problèmes qu'elles peuvent soulever.

9.1.3 Données

La spatialisation des alertes sélectionnées nécessite la définition d'une base de données géographique contenant l'ensemble des objets géographiques pouvant faire office *d'objets de référence.* La mise en place de cette base de données n'est nécessaire que pour le test de notre implémentation, l'objectif final du projet étant que notre solution de spatialisation s'appuie sur une base de données et un référentiel métier dont l'élaboration et la mise en place est effectuée au sein d'un autre axe du projet Choucas (chapitre 2 et Van Damme et al. 2019).

Pour définir cette base de données, nous avons employé les données produites par l'IGN, qui présentent l'avantage d'offrir une couverture de précision et de qualité constante sur l'ensemble de l'aire étudiée (contrairement à des données saisies bénévolement comme *OpenStreetMap,* pour lesquelles la qualité et la complétude des données saisies ne dépendent que des contributeurs). L'ensemble des *objets de référence* utilisés pour la spatialisation des indices de localisation proviennent de la même base de données, la BD TOPO (IGN 2020b). Pour nos modélisations, nous avons travaillé exclusivement à partir de la version de 2018. Une base de données comme la BDTOPO a le contenu approximatif d'une carte topographique, dont elle est la source de données principale. Ainsi, certains objets présents sur le territoire et susceptibles d'être utilisés comme objets de référence par des requérants peuvent ne pas y figurer.

Les données vectorielles utilisées pour la représentation des *objets de référence* donnés ne sont pas les seules dont nous ayons besoin pour traiter les alertes. Il est en effet nécessaire de disposer de données altimétriques, sous la forme de MNT, pour spatialiser des *indices de localisation* impactés par le relief, comme le temps de marche (`orl#ATempsDeMarche`), les relations traitant de verticalité (*e.g.* `orl#SousAltitude`), ou la visibilité (`orl#SiteVoitCible`). Pour disposer de données altimétriques, nous avons utilisé la BD ALTI (IGN 2020a) (dans sa version de

2018), qui est la composante altimétrique du référentiel à grande échelle de l'IGN.

L'ensemble des indices de localisation modélisés ci-dessous le sont donc à partir de ces deux bases de données, la BD TOPO et la BD Alti de 2018.

9.2 Première alerte : Grand Veymont

La première des alertes que nous proposons de traiter est l'alerte dite du *Grand Veymont.* Cette dernière est issue de l'enregistrement d'un appel au secours effectué par un accompagnateur en montagne, au sujet d'un de ses clients. Dans cette alerte, le *requérant* (*i.e.* l'accompagnateur) et la *victime* (*i.e.* un de ces clients) sont donc deux personnes distinctes. Toutefois, cela n'a pas d'impact sur la modélisation de l'alerte, le requérant et la victime étant ensemble.

L'extrait audio de cette alerte est d'une durée de 1 minute 06, ce qui est court relativement aux autres alertes du corpus. Il s'agit, par ailleurs, de l'alerte la plus simple et la plus courte de celles que nous traiterons ici. On pourra trouver la retranscription intégrale de cette alerte dans la Appendice C.

9.2.1 Analyse et décomposition en indices de localisation de l'alerte

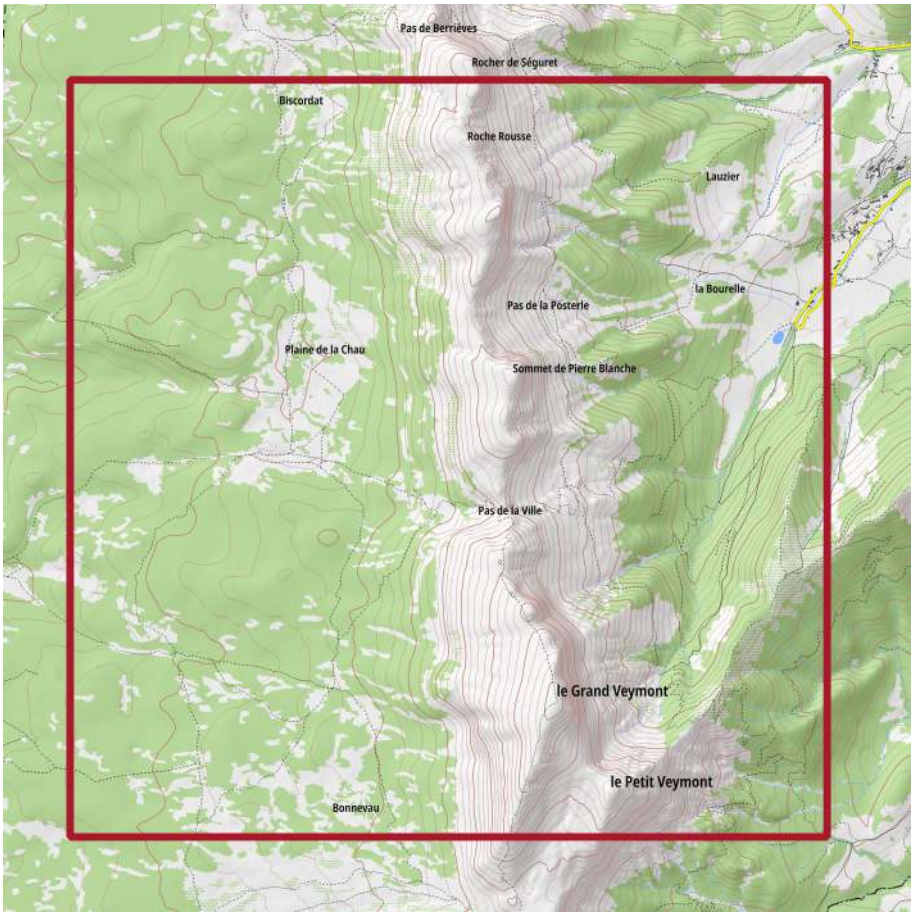
La saisie de cette alerte dans le template de retranscription a initialement été réalisée par Ana-Maria Olteanu-Raimond et revue par Cécile Duchêne et moi-même. Au court de ce processus, 12 extraits ont été identifiés, pour un total de 16 expressions. L'ensemble des indications données par le requérant sont assez précises et détaillées. Il est donc possible de définir une *zone initiale de recherche* de petite taille. Nous avons défini une ZIR de 25 km^2 (Figure 9.1). La zone ainsi définie étant assez réduite, nous avons choisi de construire les ZLC et la ZLP avec une résolution de 5 mètres, la plus fine possible avec les données altimétriques (section 9.1) dont nous disposons.

Pour construire la zone de localisation probable de cette alerte, il est nécessaire d'en identifier les différents indices de localisation et de sélectionner la relation de localisation la plus adaptée à leur modélisation. Comme nous le signalions précédemment, ce travail est prévu pour être réalisé par le secouriste durant l'alerte et non a posteriori. Pour identifier les relations de localisation utilisables pour modéliser les différents indices de localisation données par le requérant, nous allons nous appuyer sur le *verbatim* de la discussion téléphonique entre le requérant et le secouriste, ainsi que son découpage en *expressions,* réalisé durant la phase de retranscription (chapitre 5). On pourra remarquer que certains détails présents dans la retranscription en annexe (qui fait office de référence) ne figurent pas ici, notamment les hésitations ou les bafouillements. Les extraits que nous faisons figurer ici ne correspondent donc pas exactement à la discussion réelle, même si nous avons tout fait pour ne pas altérer le sens des propos tenus.

Le requérant commence par décrire sa position en donnant plusieurs éléments de contexte :

> R. : [1] J'ai eu du mal à descendre entre le sommet du *Grand Veymont* et là où je suis. [2] La descente était très très lente.

Ces deux premiers extraits ne peuvent pas être retranscrits à l'aide d'une des relations spatiales que nous avons définies. En effet, l'extrait 1 ne décrit pas la position actuelle du requérant, mais la *configuration* du chemin qu'il a emprunté pour atteindre cette position. On pourrait supposer que la relation de localisation `orl#SousJalonSurItineraire` est pertinente dans ce cas. Cependant, l'utilisation de cette relation de localisation nécessite que le site soit un jalon de l'itinéraire actuel du requérant. Toutefois, nous n'avons aucune indication sur



Limite de la ZIR

500 m

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.1 – Zone initiale de recherche pour l'alerte « Grand Veymont »

l'itinéraire que le requérant a (ou a essayé) suivit. De plus, nous ne savons pas si le requérant est toujours situé sur un sentier, bien que cette hypothèse paraisse légitime, elle ne doit pas être systématisée. Dans le cas où cette alerte serait traitée en direct par un secouriste, ce dernier pourrait demander des précisions sur l'itinéraire suivi et donc utiliser la eelation de localisation `orl#SousJalonSurItineraire`, mais ce n'est pas le cas ici. Ce premier extrait ne nous permet donc pas d'identifier un indice de localisation.

On peut cependant extrapoler certaines informations de ces deux extraits. Par exemple, on peut légitimement considérer que le requérant n'est plus sur le sommet du *Grand Veymont,* ce que l'on peut alors traduire par la relation de localisation `orl#HorsDePlanimétrique`, indiquant que la cible est à l'extérieur du site. Dans le contexte de l'alerte, le site est le sommet du *Grand Veymont,* son étendue est donc particulièrement réduite. Par conséquent, la ZLC de cet indice sera de grande taille, ce qui rend cet indice de localisation peu discriminant.

L'extrait 2 ne donne, quant à lui, pas d'informations sur la position actuelle du requérant. Il donne, cependant, une idée de la vitesse de déplacement du requérant durant la descente et permet de conclure que la distance parcourue est vraisemblablement inférieure à celle qu'aurait parcouru le même groupe dans des conditions normales. Néanmoins, comme nous n'avons aucune indication de la durée effective de la descente, nous ne pouvons exploiter cette information.

Les premiers indices donnant une information réellement discriminante sont ceux que l'on peut construire à partir des extraits 3 et 4, plus riches :

S. : [3] Vous êtes entre *Grand Veymont* et *Pas de la Ville* ?

R. : [4] Je suis entre le *Grand Veymont,* [5] sous le *Grand Veymont* et *Pas de la Ville,* tout à fait, [6] coté sud.

Les extraits 3 et 4 indiquent que le requérant se situe entre le *Grand Veymont* et le *Pas de la Ville,* ce que l'on peut modéliser avec la *relation de localisation* `orl#EntreXetY`. Bien que ce ne soit pas explicitement mentionné dans l'extrait, on comprend à l'aide du contexte et de l'extrait 1 que le requérant se réfère ici au *sommet* du *Grand Veymont* et non à la montagne dans son ensemble. Le même problème se pose pour l'extrait 5, où le requérant indique que sa position est située en dessous du *Grand Veymont,* sans expliciter qu'il s'agit du sommet. Une nouvelle fois, le contexte et l'extrait 1 nous permettent de conclure que le requérant se réfère ici au sommet du *Grand Veymont.* On peut donc ajouter un second indice de localisation en utilisant une relation de localisation retranscrivant la relation de verticalité existant entre le requérant et le site, comme `orl#SousAltitude`. Nous avons certes défini plusieurs relations de localisation dérivées de cette dernière, comme `orl#SousProcheDe` et permettant une spatialisation plus fine, mais aucune d'entre elles ne nous semble adaptée à la situation. La relation de localisation `orl#SousProcheDe`, par exemple, contraint l'éloignement au site. Or, rien dans les extraits de cette alerte ne permet d'affirmer que le requérant est proche du site, au contraire, des extraits comme le 1 ou le 5 laissent supposer que le requérant s'est déjà considérablement éloigné du sommet du *Grand Veymont.* De la même manière, la relation de localisation `orl#SousALAplombDe` ne nous semble pas adaptée pour représenter la sémantique de cet extrait. En effet, cette relation de localisation contraint la ZLC suivant l'axe de plus grande pente (Appendice B). Cette contrainte nous semble ici trop restrictive, aucun élément de l'alerte ne permettant d'affirmer qu'une telle relation existe ici. Quant à la relation de localisation `orl#SousJalonSurItineraire`, cette dernière contraint la relation de localisation `orl#SousAltitude`, par la position des itinéraires. Or, comme nous l'avons déjà signalé, nous n'avons pas assez d'informations sur l'itinéraire suivi pour pouvoir utiliser une

telle relation.

Dans l'extrait 6, le requérant complète cette information en précisant sa position par une relation de localisation cardinale. Cette description est cependant interprétable, car le requérant n'en précise pas le cadre de référence, ce qui est relevé par le secouriste :

S. : [7] Côté Sud du *Pas de la Ville* ?

R. : [8] Non, côté Nord.

Dans ce contexte, il est difficile de savoir si les extraits 6 et 8 se contredisent et que le requérant est revenu sur sa précédente déclaration ou si l'extrait 6 se référait implicitement au sommet du *Grand Veymont* et non au *Pas de la Ville.* Si l'on observe le cadre géographique de l'alerte (Figure 9.1), on peut remarquer que seules trois configurations sont possibles : (1) le requérant est au nord du *Grand Veymont* et du *Pas de la Ville*, (2) le requérant est au nord du *Grand Veymont* et au sud du *Pas de la Ville,* et (3) le requérant est au sud du *Pas de la Ville* et du *Grand Veymont.* Parmi ces trois configurations, seule la seconde est compatible avec l'extrait 4, indiquant que le requérant est *entre* le sommet du *Grand Veymont* et le *Pas de la Ville.* Les deux autres possibilités impliquant que le requérant ait dépassé l'un de deux sites, ce qui invaliderait l'affirmation de l'extrait 4. C'est, cependant, ce que tendent à faire les extraits suivants :

S. : [9] Vous êtes au-delà du *Pas de la Ville ?* [10] Entre *Pas de la ville* et *Pierre Blanche ?*

R. : [11] Oui, je suis au-delà du *Pas de la Ville.*

Si l'on se réfère une nouvelle fois à la Figure 9.1, on peut en effet constater qu'il est difficile d'identifier une zone étant — même partiellement — à la fois entre le sommet du *Grand Veymont* et le *Pas de la Ville* et entre le *Pas de la Ville* et le sommet de *Pierre Blanche,* ces trois objets géographiques étant quasiment alignés. De la même manière, on ne peut être *entre* le sommet du *Grand Veymont* et le *Pas de la Ville* et en même temps, *au-delà* du *Pas de la Ville* en étant parti du sommet du *Grand Veymont.* Ces différents extraits se contredisent.

Deux choix s'offrent alors à nous. On peut considérer que les extraits 9, 10 et 11 sont plus dignes de confiance que l'extrait 4, ou l'inverse. Le déroulé de l'alerte nous laisse supposer que la première solution, attribuant une meilleure confiance aux extraits 9 à 11 est la meilleure, le secouriste ayant cherché à invalider l'extrait 6 lors de l'extrait 7 et précisé les réponses du requérant lors des extraits 9 et 10. L'incompatibilité entre ces indices étant manifeste et la fausseté de l'extrait 4 étant certaine, on peut dès lors rejeter l'indice de localisation défini à partir de l'extrait 4 directement et non en diminuer légèrement la confiance, comme on serait tenté de le faire. Le rejet de cet indice de localisation invalide notre précédente interprétation des extraits 6 et 8. Les extraits 9 à 11 s'opposent en effet à ce que la position du requérant soit située au sud du *Pas de la Ville.* Ainsi, la seule configuration cohérente avec le reste des extraits est celle où le requérant est situé au nord du *Pas de la Ville* et du *Grand Veymont.*

On peut donc envisager de modéliser l'extrait 8 avec la relation de localisation `orl#AuNordDe`, ou une de ses relations filles, `orl#DansLaPartieNordDe` et `orl#AuNordDeExterne`. La relation de localisation `orl#DansLaPartieNordDe` ajoute une contrainte à la relation de localisation `orl#AuNordDe` : la présence de la cible au sein du site. À l'inverse, la relation de localisation `orl#AuNordDeExterne` impose que la cible soit en dehors du site. Les relations `orl#DansLaPartieNordDe` et `orl#AuNordDeExterne` étant des relations dérivées de `orl#AuNordDe`, il est tout à fait possible d'utiliser cette dernière relation. Cette modélisation aboutira à une ZLC moins discriminante, puisque nécessairement plus vaste, mais tout aussi correcte, les ZLC issues

de la spatialisation des relations de localisation orl#DansLaPartieNordDe et orl#AuNordDe-Externe étant, par construction, incluses dans la ZLC de la relation de localisation orl#Au-NordDe. Dans le cas de cette alerte on peut cependant affiner la modélisation en rapidement rejetant l'utilisation de la relation orl#DansLaPartieNordDe. Le *Pas de la Ville* n'est, en effet, pas un site suffisamment vaste pour qu'il soit nécessaire de préciser sa position en son sein. L'extrait 8 ne suffit pas à lui seul pour trancher entre les relations de localisation orl#AuNordDe et orl#AuNordDeExterne. Cependant, les extraits suivants (9 et 11) indiquent que le requérant est *au-delà* du *Pas de la Ville,* ce qui implique qu'il ait dépassé cet objet de référence, ce qui fait de la relation de localisation orl#AuNordDeExterne, la plus adaptée à la modélisation de l'extrait 8.

L'information donnée par les extraits 9 et 11 peut être modélisée à l'aide de la relation de localisation orl#ApresJalonSurItineraire, permettant de modéliser une situation où le requérant indique être situé sur un itinéraire donné et avoir dépassé un jalon sur cet itinéraire. Ici, le *Pas de la Ville* serait le *jalon* et le parcours menant du sommet du *Grand Veymont* (*i.e.* le point de départ de la descente) à la position actuelle de la victime, *l'itinéraire.* Cependant, comme pour les extraits 1 et 2 pour lesquels nous proposions d'utiliser la relation de localisation orl#SousJalonSurItineraire, nous ne pouvons pas utiliser la relation de localisation orl#ApresJalonSurItineraire, faute d'informations sur l'itinéraire suivi par le requérant. L'extrait 10 peut, quant à lui, être modélisé avec la relation de localisation orl#EntreXEtY, comme nous l'avons proposé pour l'extrait 4.

Viennent ensuite les extraits 12 et 13 :

R. : [12] Sur une zone à peu près plate et caillouteuse. [13] Sur une petite prairie.

L'interprétation de ces deux extraits ne présente pas de difficulté particulière. Tous deux décrivent en effet la nature du terrain pour la position actuelle du requérant.Autrement dit, ces deux extraits indiquent que le requérant est *dans* « une zone à peu près plate et caillouteuse » (12), mais également *dans* « une petite prairie » (13). La relation de localisation destinée à modéliser l'inclusion de la cible dans le site est orl#DansPlanimetrique. Comme nous le verrons lors de la spatialisation des indices, dans ce cas particulier, c'est la délimitation des objets de référence à utiliser qui peut présenter certaines difficultés.

Les deux derniers extraits de l'alerte décrivent l'éloignement de la position du requérant au *Pas de la ville :*

S. : [14] Vous êtes à combien du Pas de la ville ?

R. : [15] À 800 mètres, je crois, à vol d'oiseau.

Comme précédemment, l'interprétation de ces deux extraits ne pose pas de problèmes particuliers. Le requérant précise clairement la nature de la distance qu'il décrit, il s'agit d'une distance à vol d'oiseau, visuellement approximée. Une relation de localisation orl#Distance-QuantitativePlanimetrique est dédiée à la modélisation de ce type d'indices de localisation. L'extrait 15 met cependant en évidence le fait que le requérant est particulièrement hésitant dans sa réponse, sa certitude en la validité de cette description semble donc assez faible. Nous ne pouvons qu'imaginer la confiance qu'un secouriste attribuerait à cet indice de localisation, mais il nous semble très probable qu'elle serait plus faible que celle des autres indices. C'est pourquoi nous proposons d'attribuer une confiance moyenne à cet indice de localisation.

Au terme de l'analyse de la retranscription de l'alerte on peut construire un ensemble d'indices (Équation 4.4), composé de 9 indices de localisation différents et non contradictoires :

1. Le requérant est orl#HorsDePlanimetrique du sommet du *Grand Veymont,* avec une confiance normale.
2. Le requérant est orl#SousAltitude du sommet du *Grand Veymont,* avec une confiance normale
3. Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une confiance normale
4. Le requérant est orl#EntreXetY le *Pas de la ville* (X) et *Pierre Blanche* (Y), avec une confiance normale
5. Le requérant est orl#DansPlanimetrique une zone à peu près plate, avec une confiance normale
6. Le requérant est orl#DansPlanimetrique une zone caillouteuse, avec une confiance normale
7. Le requérant est orl#DansPlanimetrique une petite prairie, avec une confiance normale
8. Le requérant est orl#DistanceQuantitative de 800 m, avec une confiance moyenne, du *Pas de la Ville*

Chacun de ces indices de localisation peut à présent être traité, conformément à la méthode que nous avons présentée dans les chapitres 6 à 8.

9.2.2 Modélisation de l'alerte

La première étape de notre méthode (Figure 4.6) consiste à décomposer l'ensemble des indices de localisation en plusieurs indices indépendants, traités séparément les uns des autres. Comme nous l'expliquions dans le chapitre dédié à la phase de décomposition (chapitre 5), cette première étape est triviale, les indices de localisation étant décomposés dès leur saisie. Dans le cas de l'alerte *Grand Veymont* on dispose donc de 8 indices de localisation, dans l'ensemble assez simples à spatialiser, comme nous allons le voir.

Pour des raisons de lisibilité, nous présenterons l'ensemble des opérations permettant de passer des indices de localisation identifiés précédemment à leur ZLC, en regroupant dans une même partie la décomposition des objets de référence et de relations de localisation, la spatialisation, la fusion de relations de localisation atomiques et des objets de référence indéfinis. Seule la fusion des ZLC des différents indices en vue de la construction de la ZLP sera séparée du reste.

Le premier des indices de localisation est « le requérant est orl#HorsDePlanimetrique du sommet du *Grand Veymont* » (1). Pour construire la ZLC correspondant à cet indice, il est nécessaire de poursuivre la phase de décomposition (Figure 4.6). Ici, l'objet de référence de l'indice de localisation est nommé, il s'agit du sommet du *Grand Veymont.* Par conséquent, il n'est pas nécessaire de décomposer selon les objets de référence indéfinis. De plus, comme nous l'expliquions dans le chapitre 7, la relation de localisation orl#HorsDePlanimetrique est, comme la relation orl#DansPlanimetrique à laquelle elle s'oppose (Figure 7.16), une relation de localisation atomique. Il n'est donc pas nécessaire de décomposer la relation de localisation. Ainsi, ce premier indice de localisation est directement spatialisable.

Étant donné que la relation de localisation orla#HorsDePlanimétrique s'oppose à la relation orla#DansPlanimetrique, déjà présentée (Figure 7.16), on peut spatialiser les deux concepts de manière assez semblable. Ces deux relations sont, en effet, spatialisées avec le même rasteriser (orla#Geometrie) et la même métrique (orla#Distance). Seul le fuzzyficateur les distingue (Figure 9.2). Nous avons déjà détaillé les raisons du choix de ce rasteriser

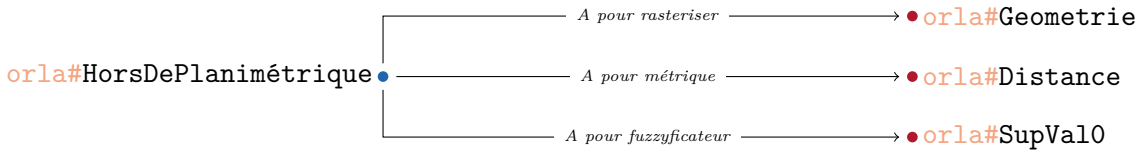


FIGURE 9.2 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* `orla#HorsDePlanimetrique`.

et de cette métrique pour la relation `orla#DansPlanimetrique` dans le chapitre 7. L'utilisation du fuzzyficateur `orla#SupVal0` permet quant à elle d'attribuer un degré d'appartenance non nul aux positions pour lesquelles la distance à l'objet de référence est supérieure à zéro, c'est-à-dire aux positions situées à l'extérieur de l'objet de référence.

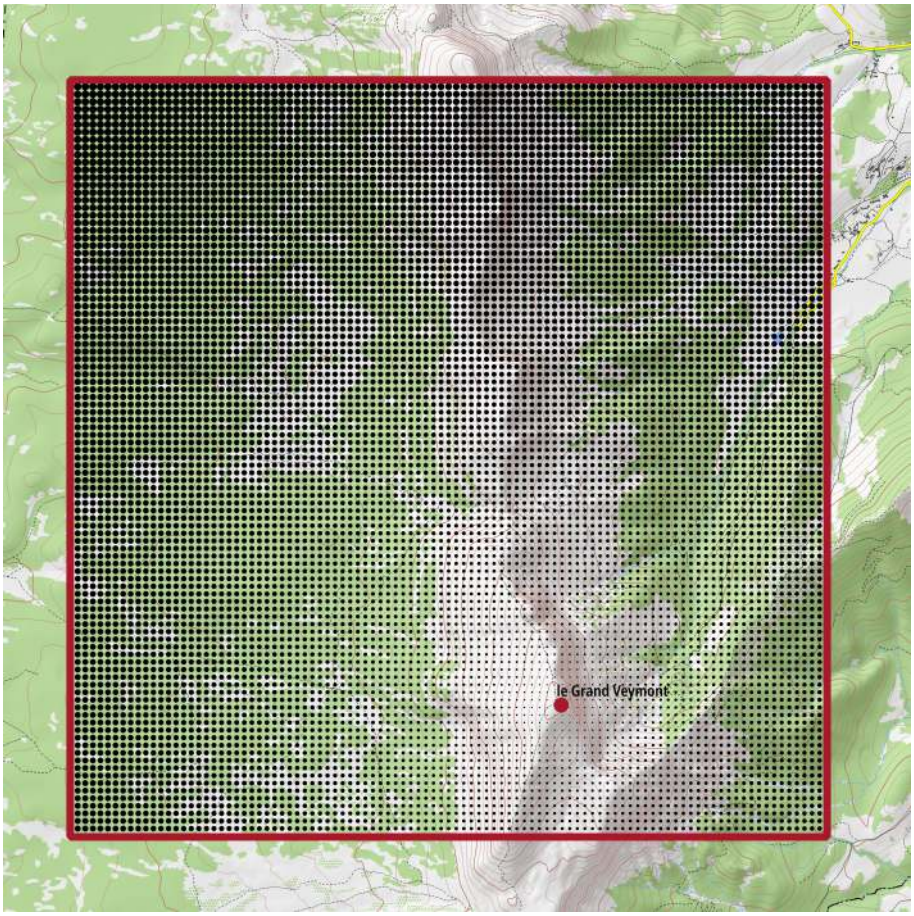
Dans le cas présent, *l'objet de référence* (le sommet du *Grand Veymont*) est représenté dans la BDTOPO par un ponctuel. La métrique `orla#Distance` calcule donc, pour chaque pixel échantillonnant les positions de la ZIR, la distance à ce ponctuel. La Figure 9.3 représente le résultat du calcul de la métrique `orla#Distance` pour toutes les positions de la ZIR [3] à partir du sommet du *Grand Veymont.*

Une fois la métrique calculée (Figure 9.3), on peut procéder à la création de la ZLC grâce au fuzzyficateur `orla#SupVal0` (Figure 9.4). Comme nous l'expliquions dans le chapitre 7, ce fuzzyficateur ne prend qu'un paramètre δ, quantifiant l'écart qui existe entre la valeur de référence v (ici de 0) et valeur où le degré d'appartenance devient nul. Pour cet indice, nous avons choisi de fixer la valeur du paramètre δ à 500 mètres. Ainsi les positions situées à plus de 500 mètres ont un degré d'appartenance maximal à la ZLC. La *zone de localisation* ainsi obtenue (Figure 9.5) représente la ZLC pour ce premier indice de localisation. Comme on peut le voir, la majeure partie des positions de la ZIR a un degré d'appartenance élevé à cette zone de localisation compatible. Ce premier indice est donc assez peu discriminant et ne permet pas, à lui seul, de localiser le requérant.

Le second indice de localisation que nous avons défini est « Le requérant est situé sous le sommet du *Grand Veymont* » (2). Pour le modéliser, nous avons choisi d'utiliser la relation de localisation `orl#SousAltitude`, traduisant une différence d'altitude, sans autre forme de contrainte. Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 7, cette relation de localisation est atomique, il n'est donc pas nécessaire de la décomposer. De plus, l'objet de référence utilisé, est comme nous l'avons vu pour l'indice de localisation précédent, nommé. On peut alors spatialiser directement cet indice de localisation.

Le processus de spatialisation de la relation de localisation atomique `orla#SousAltitude` a déjà été présenté dans le chapitre 7 (Figure 7.15). Pour ce faire, on utilise le rasteriser `orla#Geometrie`, la métrique `orla#DeltaNearestVal`, qui calcule pour chaque position de la ZIR, la différence d'altitude avec la position la plus proche de l'objet de référence et le fuzzyficateur `orla#InfVal0`, qui attribue un degré d'appartenance non nul à toutes les positions pour lesquelles la métrique a une valeur inférieure à zéro. La Figure 9.6 représente le résultat du calcul de la métrique pour chaque position de la ZIR. Comme on peut le remarquer, très peu de positions ont une altitude supérieure au sommet du *Grand Veymont,* ce point étant le point culminant de la région (L'existence de positions ayant une altitude légèrement supérieure

3. Pour des raisons de lisibilité de la représentation graphique, la résolution de la représentation a été réduite à 50 mètres, pour toutes les figures représentant les résultats de la modélisation de l'alerte *Grand Veymont.* Le calcul a cependant été réalisé avec une résolution de 5 mètres.



Limite de la ZIR

500 m

Distance au *Grand Veymont :*

0 m — 2 500 m — 5 000 m

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.3 – Distance euclidienne au sommet du « Grand Veymont »

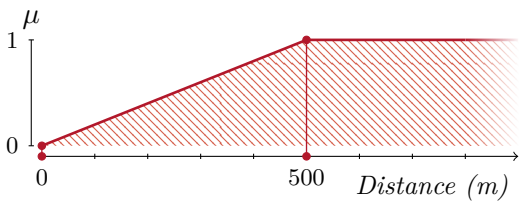
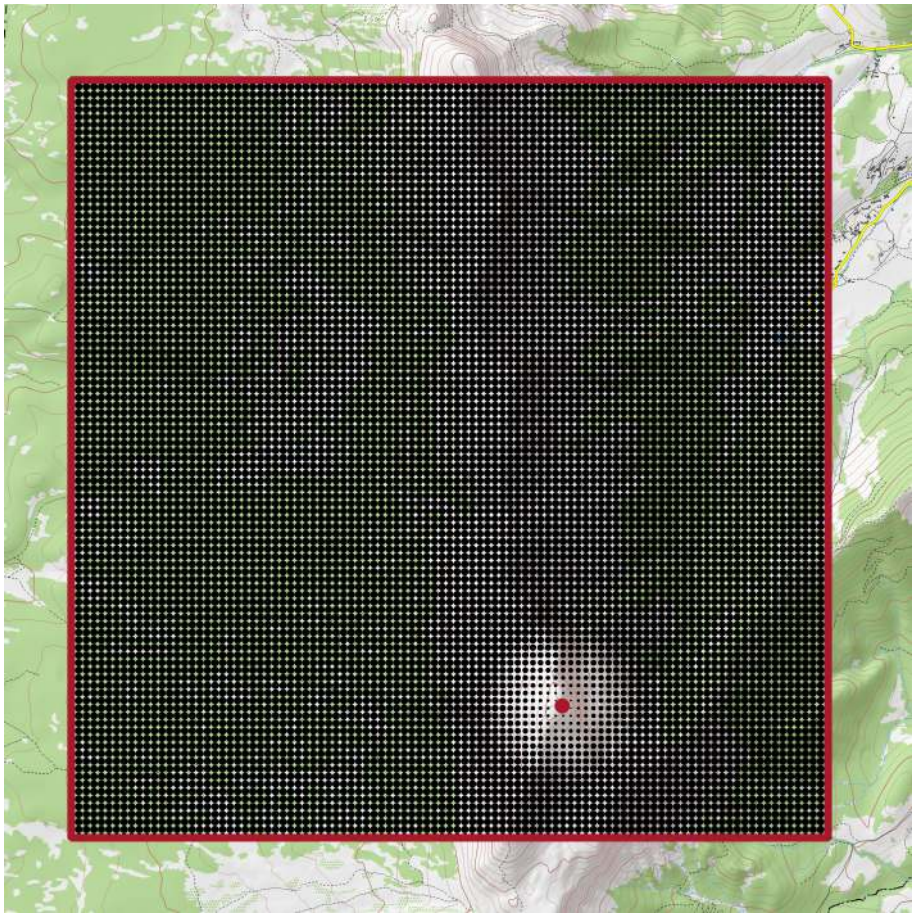


FIGURE 9.4 – Fonction d'appartenance pour le fuzzyficateur `orla#SupVal0`, paramétrée.



Limite de la ZIR

500 m

Degré d'appartenance :

0 0,5 1

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.5 – Zone de localisation compatible du premier indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#HorsDePlanimetrique` du sommet du Grand Veymont » (1)

ne s'explique que par le positionnement du ponctuel représentant l'objet de référence).

La fonction d'appartenance utilisée pour la fuzzyfication de la métrique nécessite la définition de deux valeurs v, la valeur de référence et δ l'écartement. Ici nous avons fixé la valeur de δ à 5 mètres (Figure 9.7). Ainsi, les positions qui seront situées légèrement au-dessus de l'objet de référence seront considérées comme partiellement en-dessous de l'objet de référence et toutes les positions dont l'altitude est inférieure à l'objet de référence seront considérées comme totalement en dessous. Ce paramétrage du fuzzyficateur orla#`InfVal0` est donc assez « large ». Nous avons fait le choix de proposer une spatialisation assez peu contraignante des critères d'altitude pour compenser les difficultés qu'il peut y avoir à estimer la relation verticale entre deux objets, notamment quand elle est peu importante. Comme pour l'indice précédent (1), la zone de localisation obtenue après la fuzzyfication de la métrique (Figure 9.8) est très étendue, de nombreuses positions ayant un degré d'appartenance proche de 1. En effet, l'indice de localisation modélisé se réfère au sommet du *Grand Veymont.* Or, ce sommet est le plus haut du massif du Vercors. Tous les points de la ZIR, ou presque, sont donc situés à une altitude inférieure à l'objet de référence, ce qui rend cet indice de localisation très peu discriminant.

La relation de localisation orl#`AuNordDeExterne`, utilisée pour modéliser le troisième indice de localisation (3) est la première des relations de localisation non atomiques de cette alerte. Cette relation se décompose, en effet, en deux relations de localisation atomiques, orla#`AuNordDe` et orla#`HorsDePlanimetrique`. La relation de localisation atomique orla#`AuNordDe`[4] est une relation cardinale générale, qui permet de construire une zone au nord de l'objet de référence, à partir de son centroïde. La zone construite à l'aide de cette relation peut être située au sein de l'objet de référence, notamment si celui-ci est étendu (*e.g.* une vallée). L'ajout de la relation de localisation orla#`HorsDePlanimetrique` permet de modifier ce comportement, en imposant que les positions appartenant à la ZLC soient situées à l'extérieur de l'objet de référence. Comme pour les indices précédents, l'objet de référence de cet indice de localisation est nommé, il n'est donc pas nécessaire de procéder à la décomposition des objets de référence, contrairement à la relation de localisation.

La première des relations de localisations issues de la décomposition, orla#`AuNordDe` est une relation de localisation cardinale ayant orla#`Centroide` comme rasteriser, orla#`EcartAngulaire` comme métrique et orla#`EqAngle` comme fuzzyficateur (Figure 9.9). La métrique orla#`EcartAngulaire`, que nous avions déjà présentée dans le chapitre 7, calcule l'écart angulaire entre la demi-droite partant du centroïde du site et orientée vers la direction de référence (ici le Nord) et la demi-droite partant du centroïde du site et passant par la position pour laquelle la métrique est calculée. Dans le cas présent, cette métrique calcule donc l'écart angulaire entre la demi-droite partant du *Pas de la Ville* et orientée au nord et la demi-droite partant également du *Pas de la Ville* et passant par la position étudiée, comme on peut le voir sur la Figure 9.10.

La seconde *relation de localisation atomique* est orla#`HorsDePlanimétrique`, qui a déjà été employée directement pour la spatialisation du premier indice de localisation de cette alerte (Figure 9.2). Cette relation de localisation est spatialisée avec la métrique orla#`Distance`, qui est ici calculée à partir du ponctuel représentant le *Pas de la Ville* dans la BD TOPO. La Figure 9.11 représente le résultat du calcul de cette métrique.

Pour transformer les métriques orla#`EcartAngulaire` et orla#`Distance` en les ZLC spatialisant les relations de localisation atomiques orla#`AuNordDe` et orla#`HorsDePlanimetri-`

4. Que la relation de localisation orla#`AuNordDeExterne` partage avec sa relation sœur orla#`DansLaPartieNordDe`.

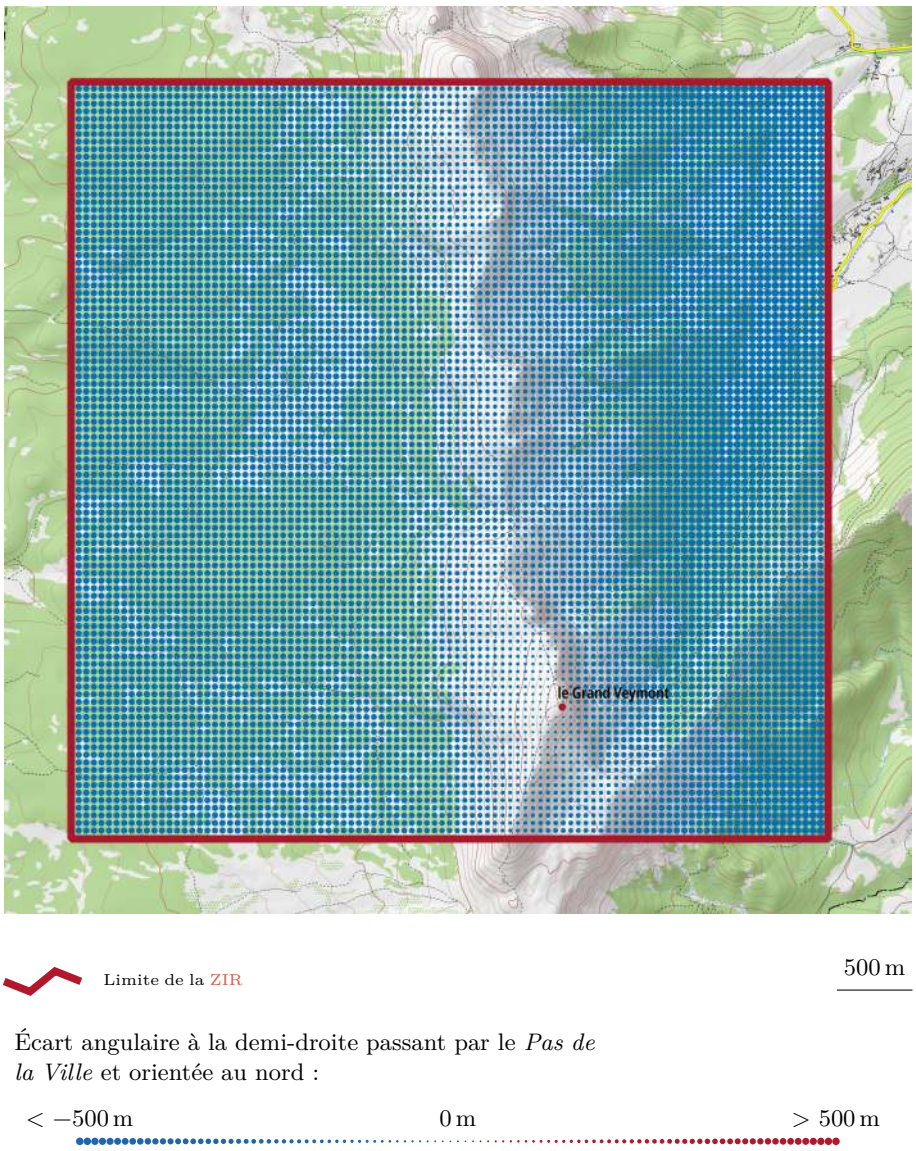


FIGURE 9.6 – Métrique orla#`DeltaNearestVal` calculée à partir du sommet du *Grand Veymont*.

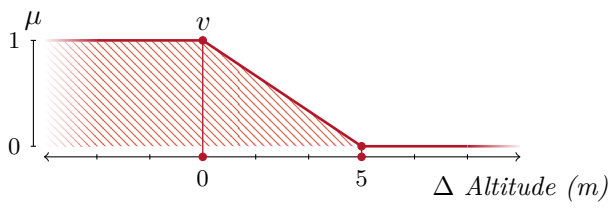


FIGURE 9.7 – Fonction d'appartenance pour le fuzzyficateur orla#`SupVal0`, paramétrée.

Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.8 – Zone de localisation compatible pour le second indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `ora#SousAltitude` du sommet du *Grand Veymont,* avec une certitude normale » (2).

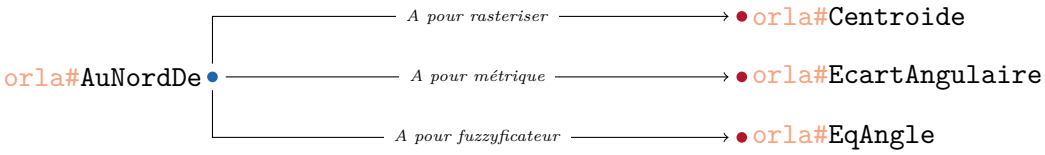
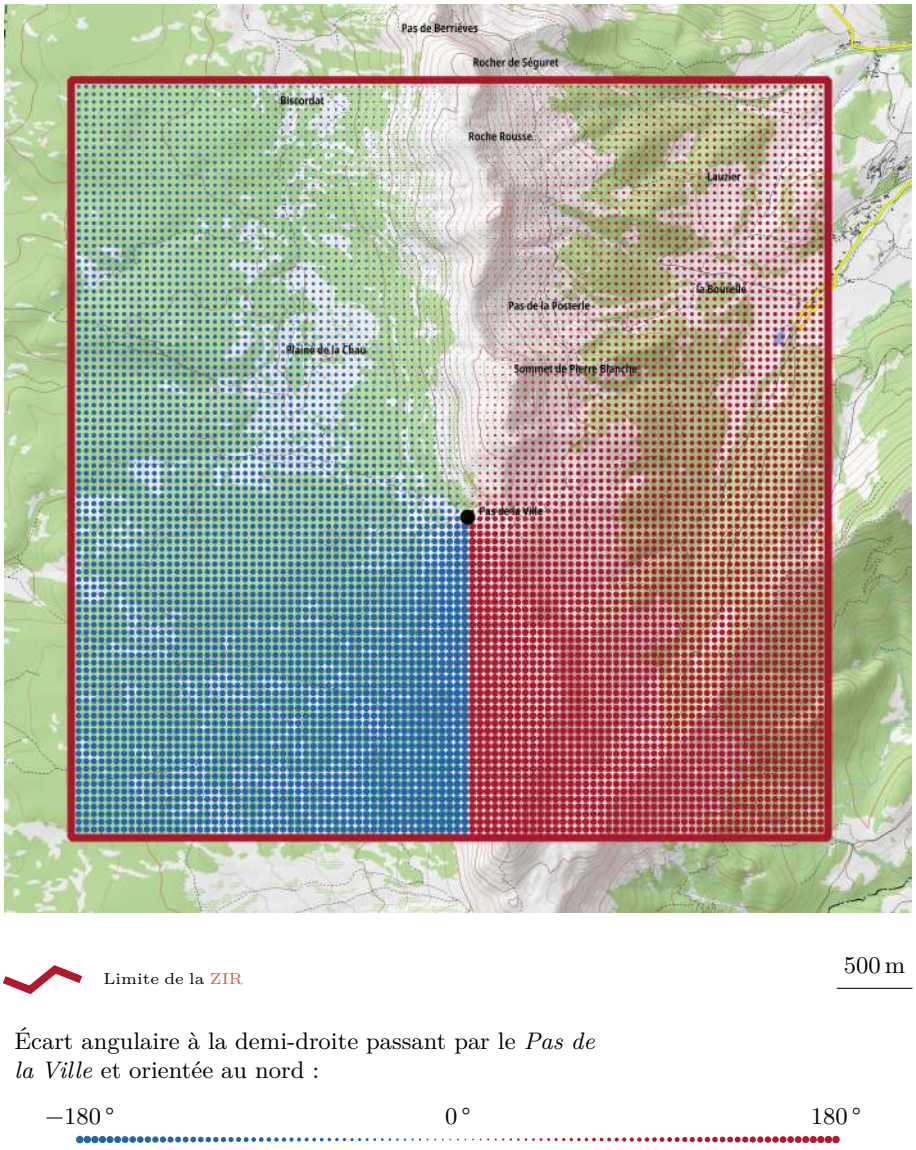


FIGURE 9.9 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* `orla#AuNordDe`.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.10 – Métrique orla#`EcartAngulaire`, calculée pour la spatialisation de la relation de localisation orl#`AuNordDe`. La résolution du raster a été réduite de 5 à 50 mètres pour la représentation.

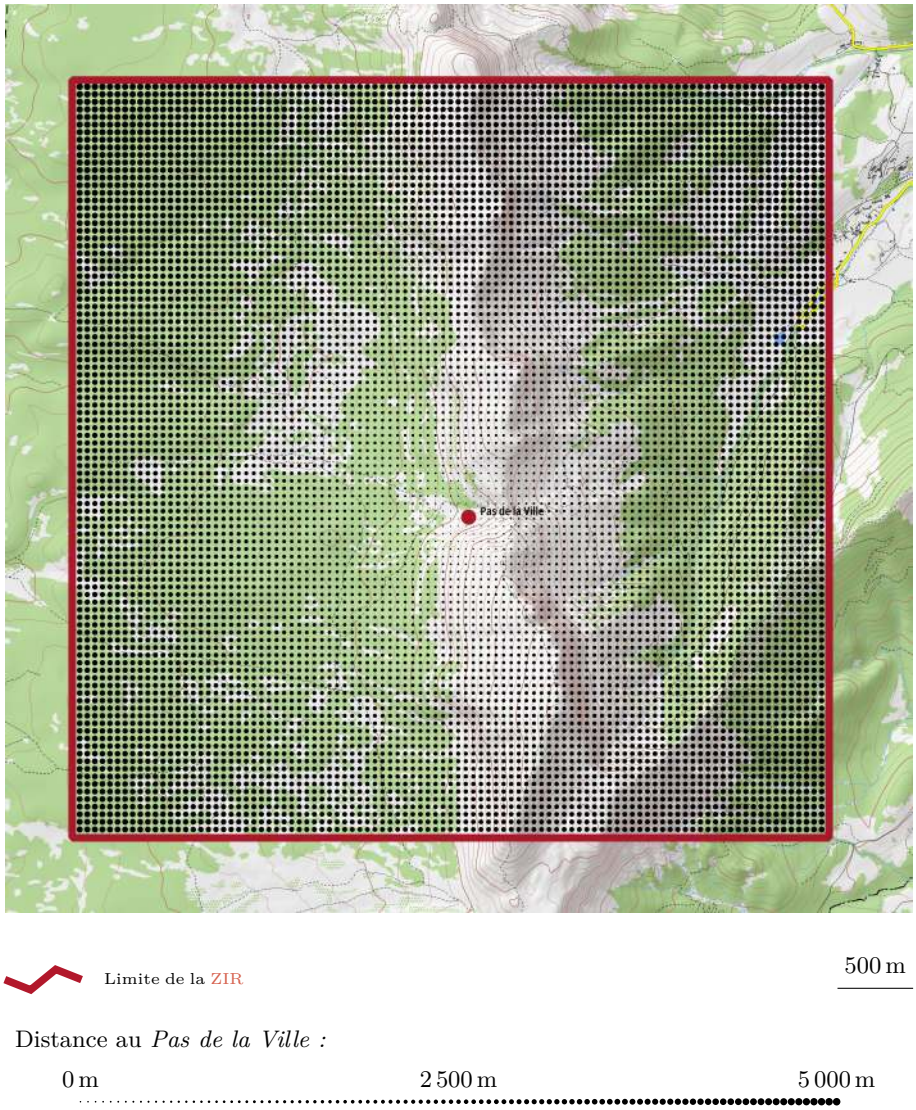
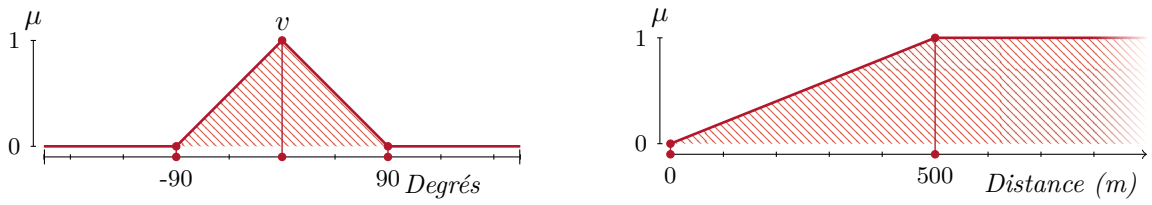


FIGURE 9.11 – Métrique orla#`Distance`, calculée pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#`HorsDePlanimétrique`.



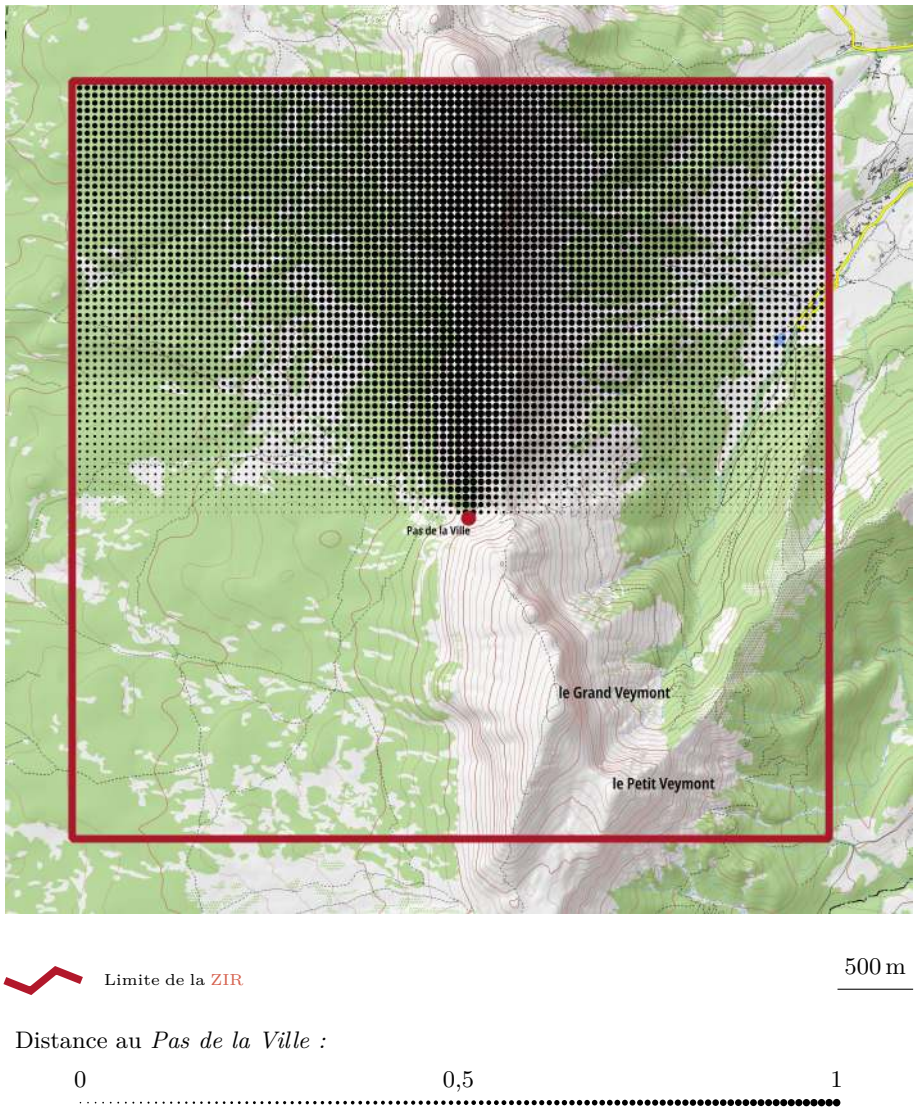
(a) (b)

FIGURE 9.12 – Fonction d'appartenance pour l'indice de localisation : « Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3).

que, il est nécessaire d'employer respectivement le fuzzyficateur orla#EqAngle et le fuzzyficateur orla#SupVal0. Nous avons fixé le paramètre v du premier fuzzyficateur à 0, la métrique orla#EcartAngulaire calculant un écart à une direction de référence (ici le nord) et le paramètre δ à 180°. Ainsi, quant une position est située parfaitement au nord du *Pas de la Ville,* c'est-à-dire le long du segment passant par ce point et orienté au nord, son degré d'appartenance est maximal. La valeur du degré d'appartenance décroit lorsque la position s'éloigne de cette direction de référence, jusqu'à devenir nul lorsque l'écart est supérieur de 90° d'un côté comme de l'autre (Figure 9.12a). Pour la fuzzyfication de la métrique orla#Distance, nous avons employé le même paramétrage que pour le premier indice de localisation, à savoir une valeur v nulle et un paramètre δ de 500 m (Figure 9.12b). Les Figures 9.13 et 9.14 représentent le résultat de cette opération de fuzzyfication.

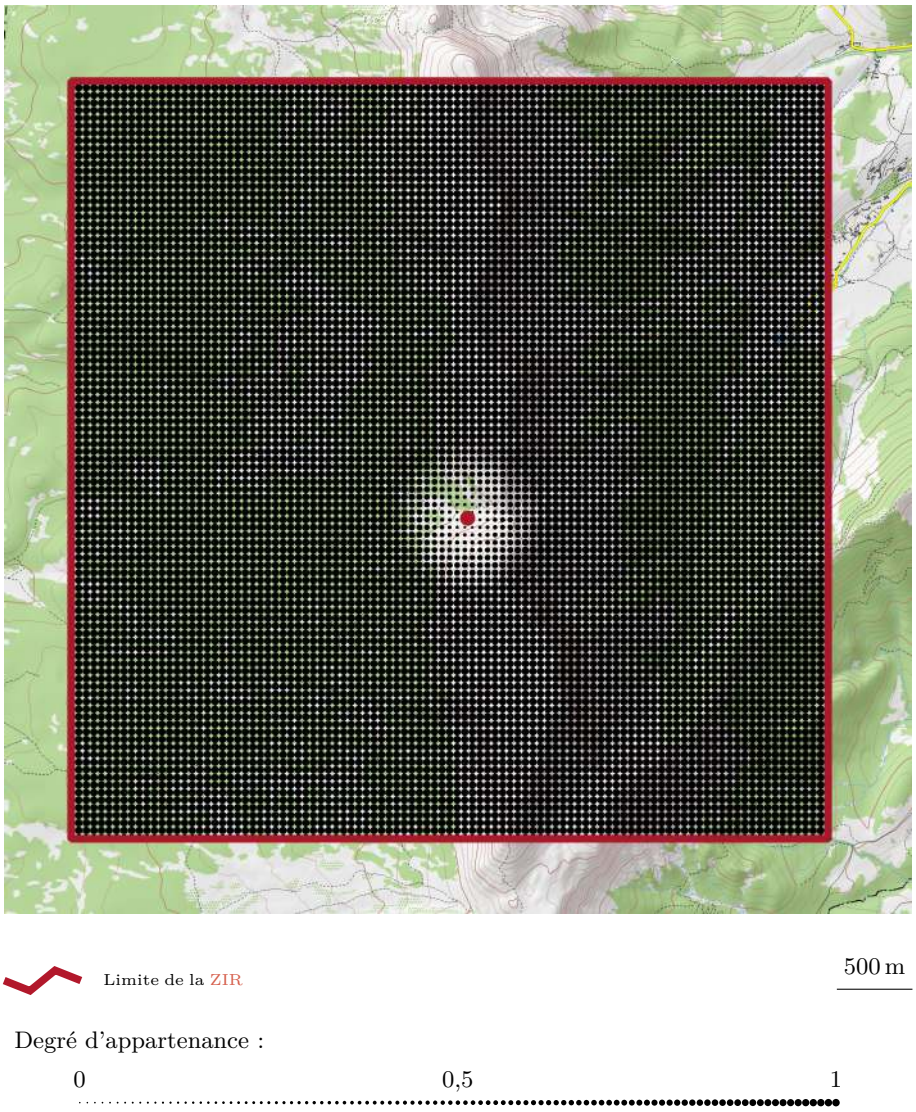
Les ZLC spatialisant les relations de localisation atomiques orl#AuNordDe (Figure 9.13) et orl#HorsDePlanimetrique (Figure 9.14) peuvent alors être fusionnées à l'aide de l'opérateur d'intersection précédemment présenté (chapitre 8), ce qui permet de construire la ZLC de ce troisième indice de localisation, c'est-à-dire l'ensemble des positions orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville* (Figure 9.15). On peut noter que les figures Figure 9.15 et Figure 9.13 présentent assez peu de différences visuelles, seule une petite diminution du degré d'appartenance est visible au voisinage direct du *Pas de la Ville.* Cette observation s'explique de plusieurs manières. Tout d'abord, le mode de représentation que nous avons choisi pour représenter les ZLC tend à « gommer » les variations locales de degré d'appartenance, effet renforcé par l'échelle de la représentation. Mais cette faible différence met surtout en évidence le fait que la relation de localisation orl#HorsDePlanimetrique est moins contraignante que la relation de localisation orl#AuNordDe.

Le cinquième indice de localisation indique que le requérant est situé orl#EntreXEtY le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* 4. La relation de localisation utilisée par cet indice a la particularité d'être *binaire,* elle nécessite donc deux sites X (le *Pas de la Ville*) et Y (*Pierre Blanche*). Comme pour les précédents indices de localisation, les objets faisant office de référence, le *Pas de la Ville* et le *Grand Veymont*, sont nommés. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à la décomposition des objets de référence non nommés. La relation de localisation orl#EntreXetY est, quant à elle, une relation de localisation décomposable. Elle a la particularité de décomposer en deux variantes de la relations de localisation atomique orla#DansLaDirectionAVolDoiseauDeXDepuisY, la seconde inversant les objets de référence X et Y. La relation de localisation orla#DansLaDirectionAVolDoiseauDeXDepuisY est une relation de localisation qui permet de généraliser les relations cardinales (*e.g.* orl#AuNordDe), pour une direction donnée. Ainsi définie la relation de localisation orl#EntreXetY revient a considérer qu'être entre deux objets



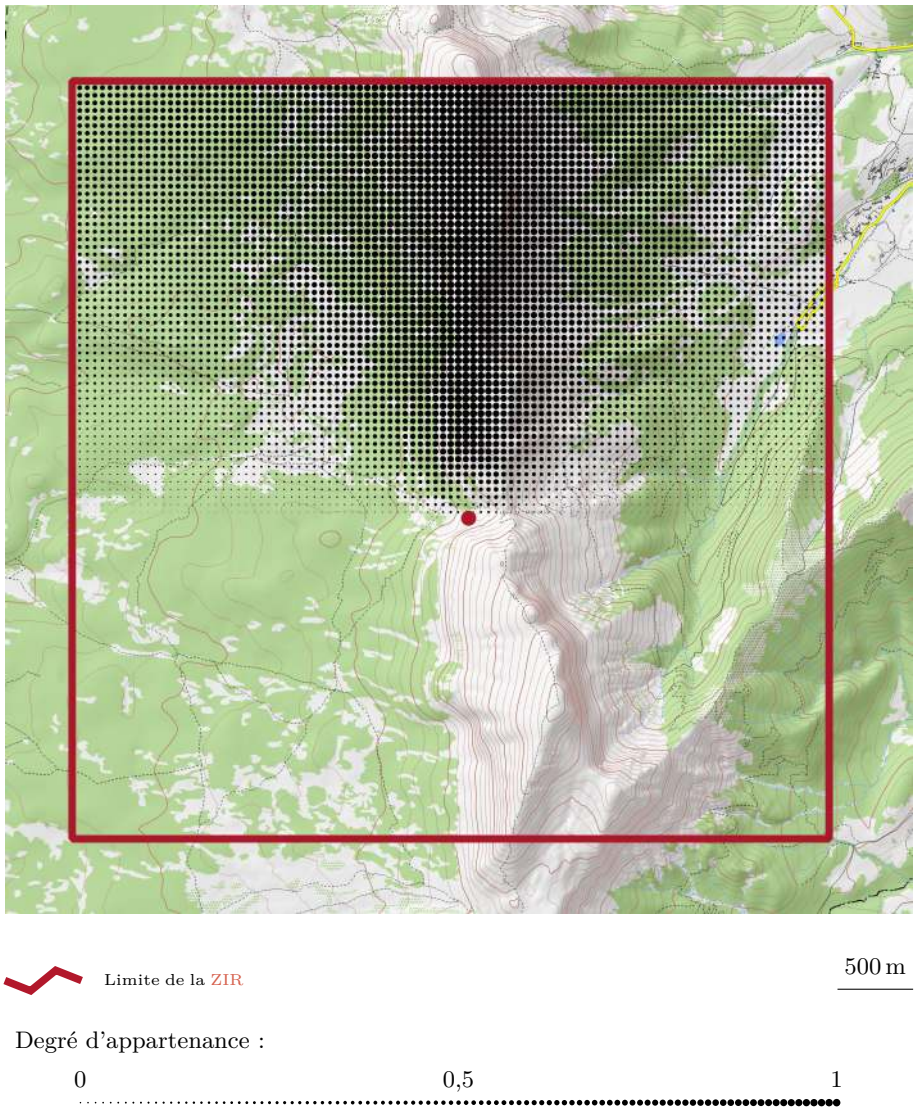
Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.13 – Zone de localisation compatible pour la première relation de localisation (`orl#AuNordDe`) du troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#AuNordDeExterne` du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3).



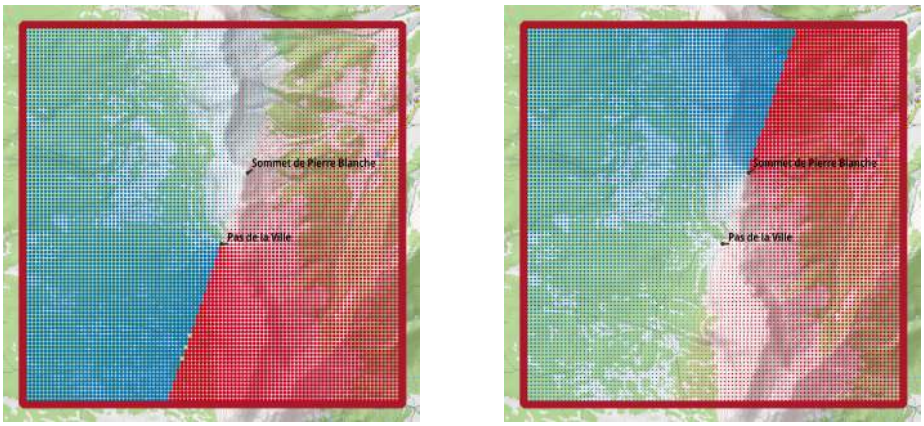
Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.14 – Zone de localisation compatible pour la seconde relation de localisation (`orla#HorsDePlanimétrique`) du troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#AuNordDeExterne` du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3).



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.15 – Zone de localisation compatible pour le troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#AuNordDeExterne` du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3).



(a) (b)

FIGURE 9.16 – Métriques calculées pour l'indice de localisation : « La victime est entre le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* ».

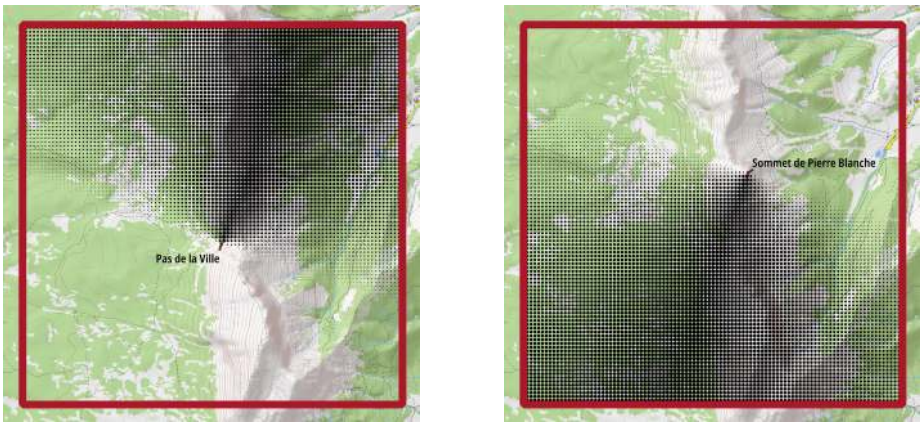
est équivalent à être dans la direction de X depuis Y et inversement.

Comme la relation de localisation orl#`DansLaDirectionDeXDepuisY` est une version générique des relations de cardinalité, elle partage sa métrique, son fuzzyficateur et son rasteriser avec ces relations. La Figure 9.16 représente le valeur de la métrique orla#`EcartAngulaire`, calculée pour ces deux relations de localisation atomiques. Plus précisément, la figure 9.16a représente la valeur de la métrique orla#`EcartAngulaire`, calculée à partir du *Pas de la Ville* et par rapport à la demi-droite partant de ce point et passant par le somme de *Pierre Blanche* et la figure 9.16b représente la valeur de la métrique orla#`EcartAngulaire` calculée à partir du sommet de *Pierre Blanche,* dans la direction du *Pas de la Ville.*

Une fois que la métrique a été calculée pour chacune des deux relations de localisation atomiques (Figure 9.16), on peut construire les ZLC correspondantes à l'aide du fuzzyficateur orla#`EqAngle`, déjà présenté (Figure 9.12) et que nous employons ici avec les mêmes paramètres ($v = 0$, $\delta = 180$). On obtient alors les ZLC représentées par la Figure 9.17.

On peut alors intersecter ces deux ZLC pour construire la ZLC correspondant à cet indice de localisation (4), visible sur la Figure 9.18. Comme on peut le remarquer, la spatialisation de la relation de localisation orl#`EntreXEtY` (Figure 9.18) aboutit à la construction d'une forme singulière. Les positions situées à proximité du segment reliant les deux sites se voient attribuer un degré d'appartenance proche de 1, qui décroit au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. Comme on peut le remarquer, des positions situées à une grande distance des deux objets de référence mais proches de la médiatrice du segment reliant le *Pas de la Ville* et le sommet de *Pierre Blanche* (*i.e.* équidistants, ou presque, à ces deux objets de référence) se voient attribuer un degré d'appartenance non nul. Ce comportement peut être changé en modifiant la valeur du paramètre δ utilisé pour le fuzzyficateur orla#`EqAngle` (ici une valeur de 180° a été utilisée). Plus cette valeur est faible, moins la ZLC spatialisant la relation de localisation orl#`EntreXEtY` est étendue le long de la médiatrice au segment [`XY`]. Nous avons, cependant, choisi de conserver la valeur par défaut du paramètre δ, créant ainsi la ZLC représentée par la Figure 9.18. Ce choix de modélisation nous permet de créer une ZLC « large » et donc d'éviter de créer des faux négatifs.

Les *indices de localisation* 5, 6 et 7 utilisent la même relation de localisation, orl#`Dans-`



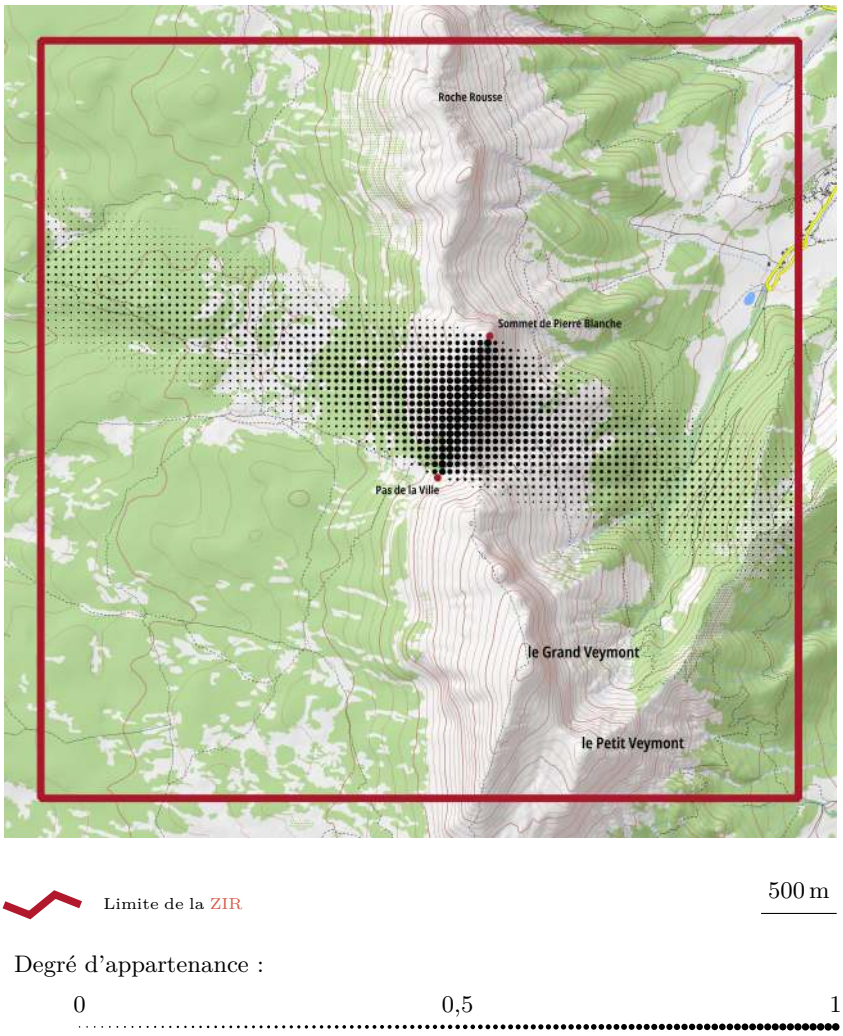
(a) (b)

FIGURE 9.17 – Zones de localisation compatibles intermédiaires pour l'indice de localisation : « La victime est entre le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* ».

`Planimetrique`, mais appliquée à trois objets de référence différents, leur processus de spatialisation est donc identique. Ces trois indices de localisation sont les seuls de cette alerte à utiliser des objets de référence non nommés, respectivement « une zone à peu près plate » (5), « une zone caillouteuse » (6) et « une petite prairie » (7). Dans chacun de ces trois cas, le requérant ne mentionne pas un objet défini, mais un type de zone. Toutes les zones correspondant à cette description peuvent donc être le bon site. Il est donc nécessaire de procéder à l'étape de décomposition des objets de référence non nommés, pour pouvoir créer une zone de localisation compatible pour chaque instance et les combiner de manière à obtenir la zone de localisation correspondant à tous les objets de référence non nommés (Figure 4.6).

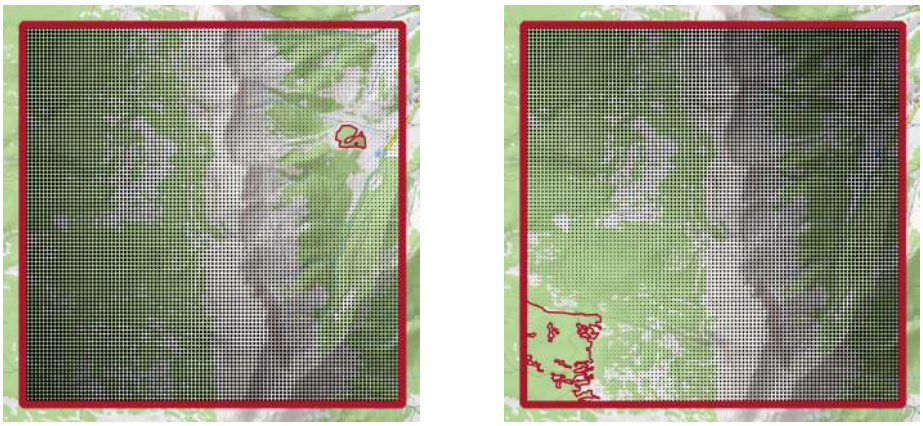
La difficulté de modélisation de ces trois indices de localisation ne réside pas dans l'utilisation et la paramétrisation de la relation de localisation `orl#DansPlanimetrique`, mais dans l'identification des objets de référence. En effet, les « zone[s] à peu près plate[s] », les « zone[s] caillouteuses » et les « petite[s] prairie[s] » ne sont pas représentées dans la BD TOPO, ces indices de localisation ne sont donc pas directement spatialisables. Il est ainsi nécessaire de construire d'une manière ou d'une autre ces objets de référence. Une première solution serait d'enrichir les données dont nous disposons avec de nouvelles sources, comme les données altimétriques (pour identifier les « zone[s] à peu près plate[s] ») ou d'occupation du sol des bases *Corine Land Cover* ou *OCS Grande Échelle.* Cependant, la nomenclature proposée par ces bases de données (et l'échelle dans le cas de la base *Corine Land Cover*) n'est pas assez fine pour permettre de distinguer des zones caillouteuses et des prairies d'autres zones. Face à ces difficultés et sachant que nous n'avons pas étudié la question de l'enrichissement des données métier [5], nous avons donc opté pour une autre approche, consistant à exploiter au mieux les données dont nous disposons, sans créer de nouvel objet de référence. La solution que nous proposons est de transformer les indices de localisation 5, 6 et 7 en un nouvel indice de localisation les approximant au mieux, sans les contredire. Comme la BD TOPO définit la couverture forestière et que le requérant indique implicitement qu'il *n'est pas* situé dans une forêt, nous proposons de transformer ces indices de localisation en : « Le requérant n'est pas dans une forêt ». Ce nouvel indice de localisation est certes moins discriminant que la combinaison des

5. Point qui est par ailleurs traité dans un autre axe du projet Choucas (chapitre 2).



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.18 – Zone de localisation compatible pour le cinquième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#EntreXetY` le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* avec une certitude normale » (4).



(a) (b)

FIGURE 9.19 – Exemples de métriques pour la spatialisation de l'indice de localisation « La victime n'est pas dans une forêt. »

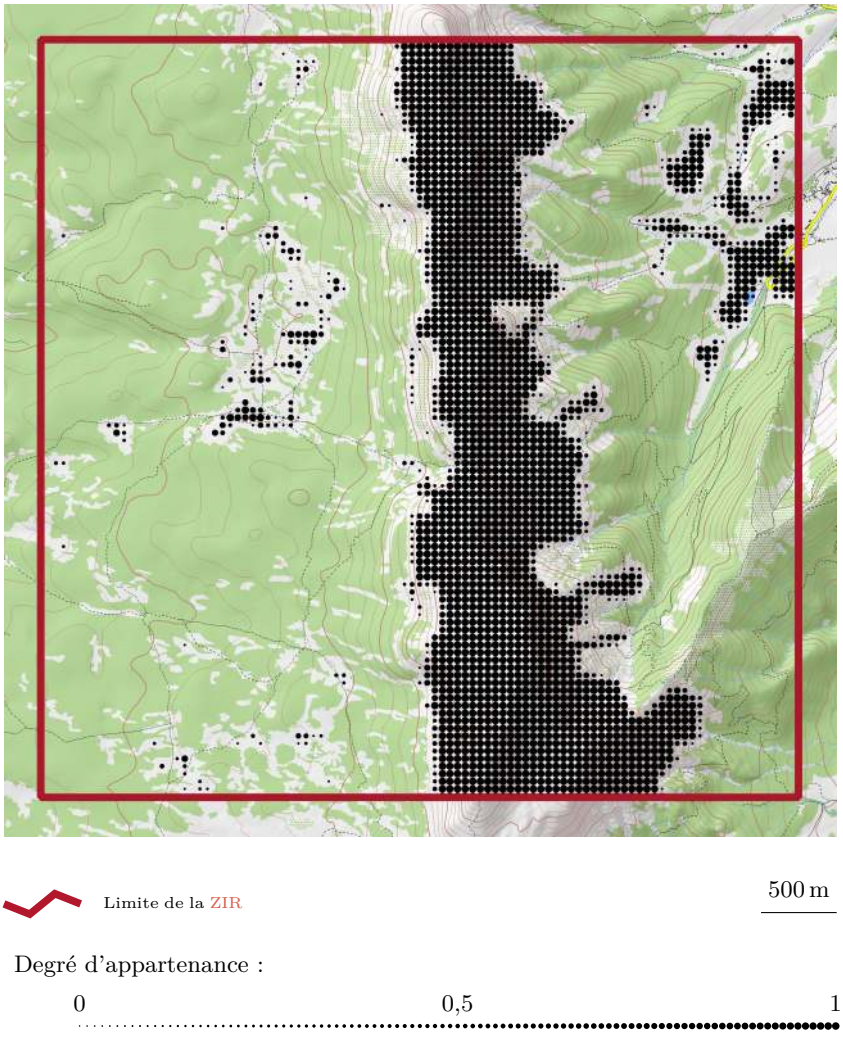
indices 5, 6 et 7, mais il permet de prendre en compte une partie de ces informations, sans ajouter de nouveaux objets de référence, ce qui ne serait pas réalisable dans le cas d'une utilisation opérationnelle de notre méthode.

La création de ce nouvel indice de localisation ne modifie pas la relation de localisation utilisée pour le spatialiser, il s'agit toujours de la relation `orl#DansPlanimetrique`, déjà utilisée pour la spatialisation du premier indice de localisation (1). Par ailleurs, comme pour cette première utilisation, il est nécessaire d'utiliser le modifieur `orla#Not`, qui permet d'inverser la sémantique de la relation de localisation. Comme nous l'avons déjà indiqué, la relation de localisation `orl#DansPlanimetrique` est atomique. Son rasteriser est `orla#Geometrie`, sa métrique est `orla#Distance` et son fuzzyficateur est `orla#InfVal0` (Figure 7.16). Étant donné que l'objet de référence employé par ce nouvel indice de localisation n'est pas nommé (« une forêt »), il est nécessaire de procéder à la décomposition des objets de référence et de construire une ZLC pour chacun d'entre eux. Les figures 9.19a et 9.19b représentent le résultat du calcul de la métrique `orla#Distance` pour deux instances de forêts. La métrique est ensuite fuzzyfiée, pour chaque objet de référence, à l'aide du fuzzyficateur `orla#InfVal0` et de son modifieur `orl#Not`. Le paramètre δ a été fixé 10 mètres, ce qui implique qu'une position située à plus de 10 mètres de la limite d'une forêt sera considérée comme en dehors de la forêt.

Une fois que les métriques calculées pour toutes les instances de forêts ont été fuzzifiées, nous disposons d'une ZLC pour chaque instance, qu'il est nécessaire de fusionner afin d'obtenir la ZLC spatialisant l'indice de localisation : « La victime n'est pas dans une foret ». La Figure 9.20 représente le résultat de ce processus. Comme on peut le remarquer, le couvert forestier occupe une grande partie de la ZIR. L'utilisation de ce nouvel indice de localisation permet donc de réduire fermement la zone de recherche du requérant.

Le dernier indice de localisation de l'alerte est : « le requérant est à 800 mètres du *Pas de la Ville* » (8). Une nouvelle fois, nous sommes en présence d'un indice de localisation qu'il n'est pas nécessaire de décomposer, le *Pas de la Ville* étant un objet de référence nommé et la relation de localisation `orl#DistanceQuantitativePlanimetrique` étant atomique.

Comme le montre la Figure 9.21, la relation de localisation `orla#DistanceQuantitative-Planimetrique` est spatialisée à l'aide du *rasteriser* `orla#Geometrie`, de la *métrique* `orla#Dis-`



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.20 – ZLC pour l'indice de localisation : « La victime n'est pas dans une forêt. »

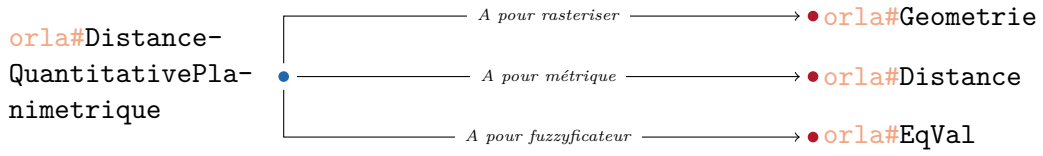


FIGURE 9.21 – *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#DistanceQuantitativePlanimetrique

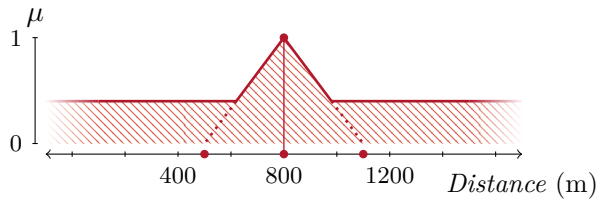


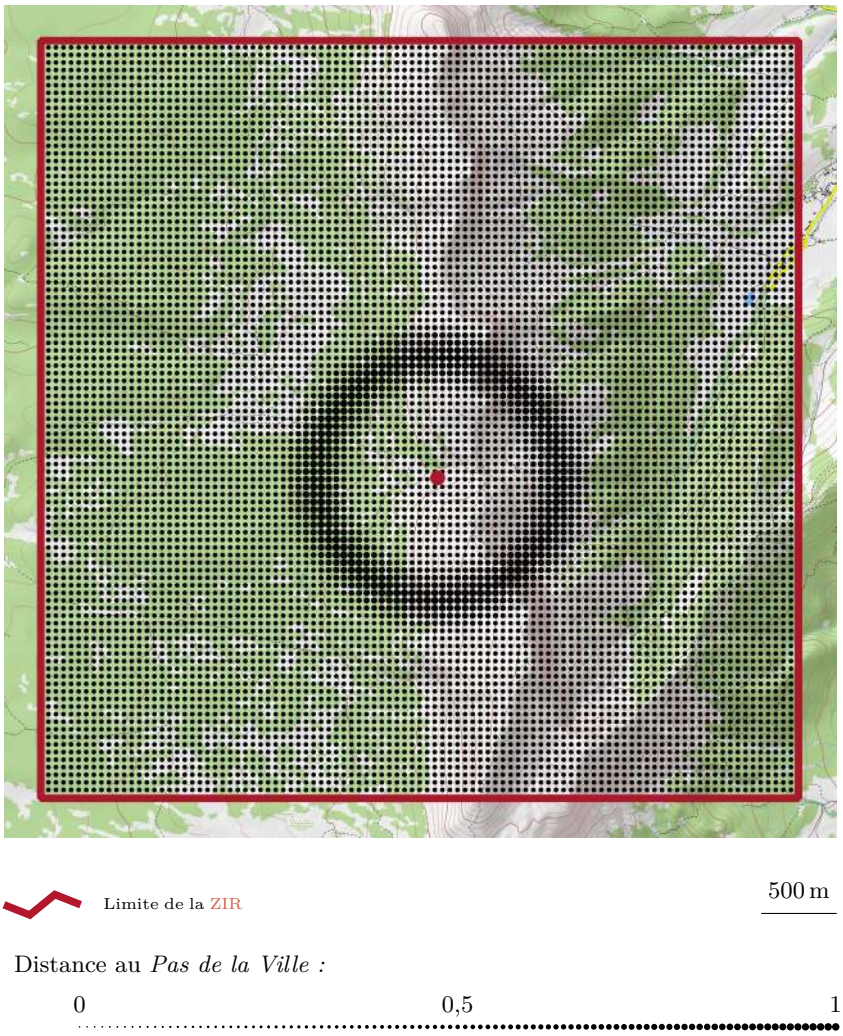
FIGURE 9.22 – Fuzzyficateur orla#EqVal paramétré pour le huitième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#DistanceQuantitative de 800 m du *Pas de la Ville,* avec une certitude moyenne » (8).

tance et du *fuzzyficateur* orla#EqVal. On peut noter qu'elle partage le rasteriser et la métrique de la relation de localisation atomique orla#HorsDePlanimetrique, déjà utilisée pour spatialiser le premier indice de localisation (« Le requérant n'est pas au sommet du *Grand Veymont* ») et lors de la décomposition de la relation de localisation orl#AuNordDeExterne (cf. troisième indice de localisation). Or, comme le troisième indice de localisation a également le *Pas de la Ville* comme site, la métrique nécessaire à la spatialisation de ce dernier indice de localisation a déjà été calculée (Figure 9.11) [6].

Une nouvelle fois, c'est lors de la fuzzyfication qu'est faite la différence entre la spatialisation des deux indices de localisation. Si la relation de localisation atomique orla#HorsDePlanimétrique emploi le fuzzyficateur orla#SupVal0, la relation de localisation atomique orla#DistanceQuantitativePlanimetrique emploie quant à elle le fuzzyficateur orla#EqVal, paramétré par la distance désirée (ici 800 m). Pour prendre en compte la confiance, la valeur minimale de la fonction d'appartenance a été rehaussée à 0,4, seuil défini pour une certitude moyenne (chapitre 8). L'application du fuzzyficateur (Figure 9.22) à la métrique (Figure 9.11) permet de construire la ZLC de cet indice (Figure 9.23). Comme on peut le remarquer, ce dernier indice de localisation n'attribue, à cause de sa certitude, à aucune position de la ZIR un degré d'appartenance nul.

Une fois que les six ZLC identifiées ont été construites (Figures 9.5, 9.8, 9.15, 9.18, 9.20 et 9.23), nous pouvons construire la ZLP de l'alerte, correspondant à l'intersection de ces 6 ZLC (Figure 4.6). La Figure 9.24 représente le résultat de cette opération. Comme on peut le remarquer, la ZLP obtenue est fragmentée, c'est-à-dire que les positions ayant un degré d'appartenance non nul à la ZLP sont regroupées dans plusieurs clusters, non connexes. Le plus important d'entre eux est situé au centre de la ZIR. Un groupe de clusters est situé dans la partie ouest de la ZIR. C'est dans le premier cluster que l'on trouve les positions dont le degré

6. Dans le cadre de son fonctionnement normal, Ruitor n'est pas capable de réaliser ce genre d'optimisations. Ainsi, s'il est nécessaire de calculer deux fois la même métrique, pour spatialiser des indices de localisation différents, le calcul sera effectué deux fois.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.23 – Zone de localisation compatible pour le huitième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est `orl#DistanceQuantitative` de 800 m du *Pas de la Ville,* avec une certitude moyenne » (8).

Indice	Fuzzyficateur	v	δ
1	orla#SupVal0	*0*	500 m
2	orla#InfVal0	*0*	5 m
3	orla#SupVal0	*0*	500 m
	orla#EqAngle	0°	180°
4	orla#EqAngle	27°	180°
	orla#EqAngle	207°	180°
5, 6, 7	orla#SupVal0	*0*	10 m
8	orla#EqVal	800 m	250 m

TABLE 9.1 – Synthèse des paramètres des fonctions d'appartenance utilisés pour la spatialisation des indices de localisation de l'alerte *Grand Veymont.*

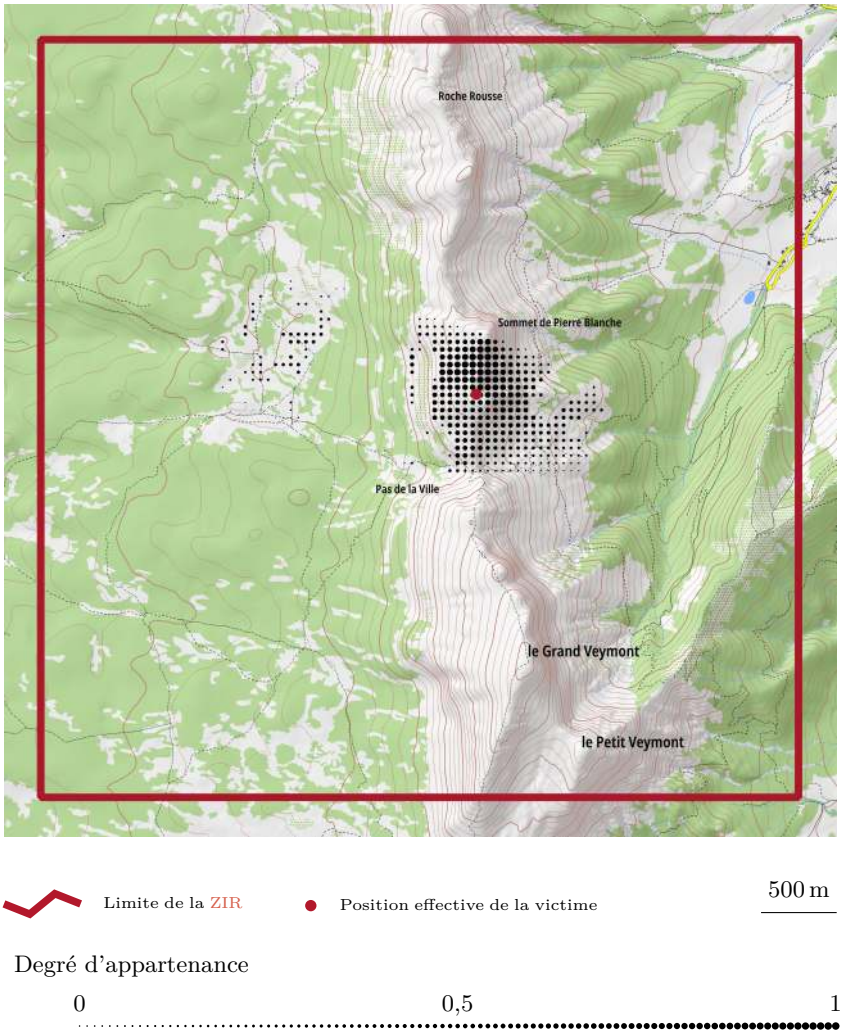
d'appartenance à la ZLP est le plus élevé, le degré le plus important étant de 0,8. Le second cluster n'est constitué que de positions dont le degré d'appartenance est faible (inférieur à 0,4).

Si l'on confronte la ZLP construite à la position effective de la victime (Figure 9.24) on peut remarquer que la victime est située à proximité de la zone où le degré d'appartenance est le plus fort. Dans ce cas, la modélisation que nous proposons offre une bonne approximation de la position réelle de la victime.

9.2.3 Critique de la modélisation

Malgré ces bons résultats, la modélisation que nous proposons pour cette alerte n'est pas exempte de défauts. La première critique que l'on puisse faire sur cette modélisation est qu'elle n'est que partiellement représentative de ce qui aurait été modélisé par un secouriste lors d'un cas réel. Certaines informations, comme celles données par les extraits 1 et 11 ne sont, par exemple, pas spatialisables, une partie de l'information nécessaire ne nous étant pas connue. Or, il est fort probable que le secouriste aurait adapté ses questions pour obtenir les informations nécessaires à la définition des relations de localisation qui lui auraient semblé pertinentes. Ainsi, le résultat que nous proposons est sûrement assez différent de celui qu'auraient obtenu les secouristes en traitant « normalement » l'alerte. Cette observation ne remet pas en question les résultats obtenus, mais il convient de le préciser.

Un second point que l'on peut reprocher à la modélisation proposée est la valeur des seuils. En effet, nous n'avons pas réussi à proposer une démarche permettant de définir les seuils des fuzzyficateurs utilisés pour la modélisation des *relations de localisation.* Si certains d'entre-eux sont assez évidents (*e.g.* le fait que la valeur de référence v pour un écart d'altitude est fixée à 0), la plupart d'entre-eux sont discutables et l'ont été. Nous avons toujours cherché à ne pas proposer des seuils trop sévères, comptant sur la multiplication des *indices de localisation* pour réduire la *zone de localisation probable.* Cependant, cela fait peser la qualité du résultat sur le nombre d'indices disponibles. Il nous semble donc qu'une voie majeure d'amélioration du résultat de cette modélisation serait à chercher dans l'affinage des seuils des fuzzyficateurs.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.24 – Zone de localisation probable pour l'alerte *Grand Veymont.*

Un autre problème notable est l'impact de la représentation géométrique des objets de référence sur les résultats de la modélisation. En effet, les métriques, utilisées pour le calcul des *zones de localisation* sont calculées à partir de la géométrie des objets de référence. Par exemple, le *Pas de la Ville* et le sommet du *Grand Veymont* sont deux objets de référence régulièrement employés dans l'alerte comme objet de référence. Or, ces deux objets sont, comme la plupart des informations oronymiques, représentés dans la BD TOPO par des ponctuels, dont la fonction première n'est pas de représenter l'emprise des objets, mais « d'ancrer » les toponymes, en vue d'une représentation cartographique. L'utilisation de telles géométries comme objets de référence nous expose à quelques problèmes. Par exemple, l'indice de localisation « À 800 mètres du *Pas de la Ville* » a été spatialisé en calculant la métrique `orla#Distance` à partir du ponctuel plaçant l'oronyme « Pas de la Ville » dans la base de données. Quant à l'indice de localisation « je suis sous le sommet du *Grand Veymont* » il a été spatialisé en calculant la différence d'altitude entre le ponctuel représentant le sommet et chaque position de la ZIR. Or, même dans le cas (hypothétique) où les seuils utilisés pour la spatialisation sont incontestable, le fait de calculer la *métrique* à partir d'un seul point est une approximation discutable. En effet, pour ces deux exemples, l'objet de référence mentionné par le requérant n'est pas vraiment assimilable à un point, il s'agit d'une zone sommitale pour le sommet du *Grand Veymont* et d'un point de passage relativement étendu pour le *Pas de la Ville.* S'il peut être satisfaisant de représenter un sommet par un point, cette approximation est plus contestable dans le cas d'un *Pas,* d'autant plus que l'information donnée par le requérant est une distance quantitative. Exlle est donc fortement impactée par la position de l'objet de référence. Une piste d'amélioration pour ce problème serait d'enrichir les données à l'aide de nouvelles géométrie, représentant au mieux les objets de référence, notamment les oronymes. Une solution envisageable pourrait être de construire des géométries floues, comme proposé par Bloch (1996), ce qui permettrait de représenter des objets de référence étendus (*e.g.* un sommet, un pas, *etc.*) par des régions, tout en permettant de prendre en compte des limites imprécises. Cette solution nécessite cependant de nombreuses recherches et une modification conséquente de la méthode que nous proposons ici.

9.3 Seconde alerte : le *fil rouge*

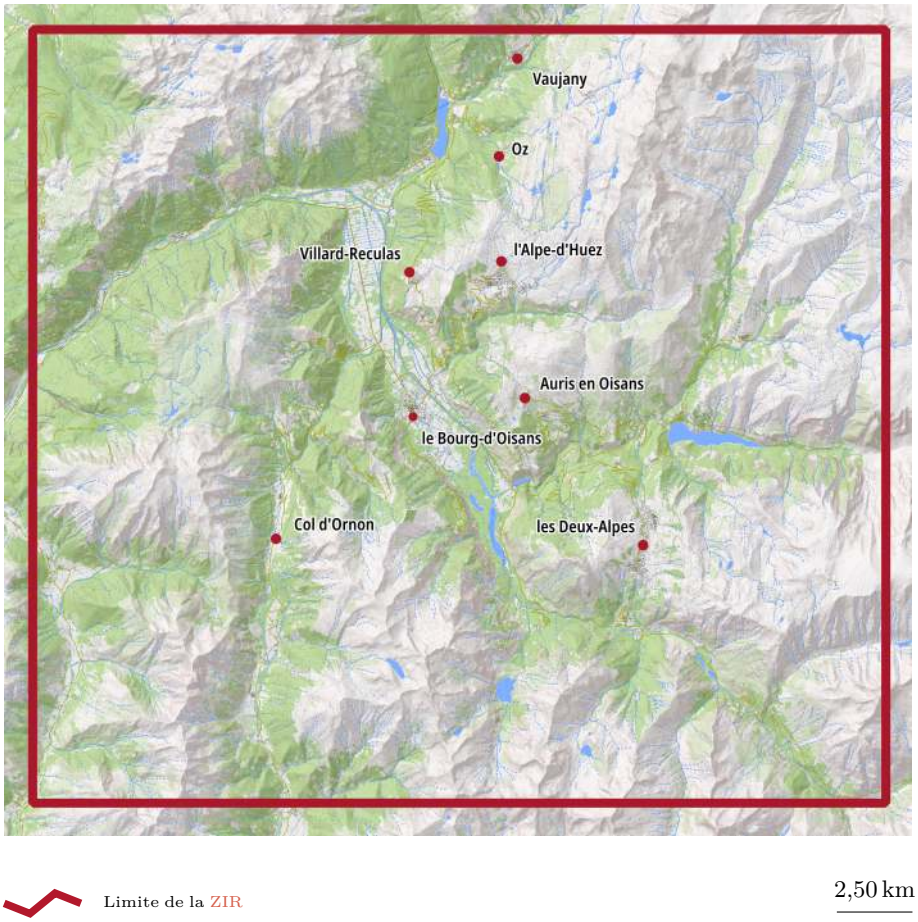
La dernière alerte modélisée est le cas dit du « fil rouge » que nous avions présenté dans le premier chapitre de cette thèse. Comme nous l'avions indiqué lors de sa première présentation, le *fil rouge* est une alerte particulière, contenant de nombreux indices très imprécis et incertains. Par conséquent la ZIR est extrêmement étendue.

9.3.1 Présentation de l'alerte

Faute d'enregistrement audio, nous ne disposons ni du verbatim de cette alerte, ni de sa saisie dans le template prévu à cet effet. Les indices dont nous disposons (et qui avaient été présentés dans le chapitre 1) correspondent à une liste, directement saisie par le secouriste.

Pour rappel voici la synthèse de l'alerte qui nous a été donnée par les secouristes :

1. La victime est partie de *Bourg-d'Oisans,* à pied, sur chemin, en direction d'une station de ski.
2. La victime a marché plusieurs heures.
3. La victime a chuté de plusieurs mètres.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.25 – Zone initiale de recherche pour le *fil rouge*

4. La victime voit une partie de plan d'eau.
5. La victime est sous une route et entend des véhicules.
6. La victime est sous une ligne électrique 3 brins.
7. La victime vient de passer du soleil à l'ombre.
8. Le téléphone de la victime est connecté à une antenne GSM située à la chapelle *St-Philomene* à *Villard-Reymond* et orientée à 90°.

Comme nous l'avions déjà signalé lors de la présentation du *fil rouge* (chapitre 1), ces différentes informations sont fortement imprécises, surtout si on les compare aux extraits de l'alerte *Grand Veymont* (Appendice C). Les descriptions sont ici peu informatives et discriminantes et la construction d'indices de localisations est par conséquent plus délicate. Par conséquent, nous avons défini une ZIR beaucoup plus grande que pour l'alerte *Grand Veymont*, puisque celle-ci mesure 25 km de coté, soit 625 km^2 et est centrée sur Bourg-d'Oisans (Figure 9.25).

La première de ces huit descriptions donne plusieurs informations sur le trajet suivi par la victime jusqu'à sa position actuelle. Elle nous renseigne sur son point de départ, *Bourg-d'Oisans,* sa destination visée, une station de ski inconnue et son mode de déplacement, à pied sur un chemin. Ces informations ne sont, cependant, pas directement transposables en un

indice de localisation. On pourrait certes supposer qu'étant donné que « La victime est partie de *Bourg-d'Oisans* », elle est probablement à proximité de cette ville, ce qui permettrait d'utiliser la relation de localisation orl#AuxAlentoursDe, voire orl#PresDe si d'autres éléments confirment que le requérant est à proximité de son point de départ. Cependant, rien dans cette première description ne nous permet d'affirmer que la victime est toujours à proximité de *Bourg-d'Oisans.* En effet, nous ne connaissons pas la durée de sa sortie et il se peut que la victime ait parcouru suffisamment de kilomètres pour que ces relations de localisation ne soient plus valides. Il nous semble donc prématuré d'utiliser ces relations de localisation. De manière similaire, nous pourrions envisager d'utiliser la relation de localisation orla#SituesurItinerairaeOuReseauSupport, la victime ayant indiqué avoir utilisé un chemin. Cependant, les expressions suivantes nous indiquent que la victime « a chuté de plusieurs mètres ». Il est, par conséquent difficile d'affirmer que la victime se situe toujours sur un chemin, c'est pourquoi il ne nous semble pas pertinent d'utiliser cette relation de localisation. Il est, cependant, possible de construire un indice de localisation à partir de cette première description. En effet, la victime indique qu'elle est partie de *Bourg-d'Oisans* dans la direction « globale » d'une station de ski, ce qui nous renseigne sur sa direction globale. Or, la relation de localisation orl#DansLaDirectionDeXDepuisY a été conçue pour modéliser ce type d'informations, sans préjuger du mode ou du support de déplacement.

Le second élément de cette alerte, « La victime a marché plusieurs heures », donne un premier complément d'informations aux informations précédentes. Grâce à la connaissance du point de départ et à l'identification du temps de déplacement, nous pouvons construire une estimation de la distance parcourue par la victime. Pour ce faire, nous avons défini une relation de localisation orl#ATempsDeMarcheDe, permettant de construire la ZLC atteignable en un temps de marche et à partir d'un point de départ donnés. La possibilité de construire un tel indice de localisation remplace avantageusement l'utilisation d'une relation de localisation telle que orl#AuxAlentoursDe. En effet, cette dernière ne donne qu'une information très vague sur la zone de présence de la victime, alors que la relation de localisation orl#ATempsDeMarcheDe permet une modélisation plus fine, même dans le cas présent, où l'estimation du temps de parcours est très imprécise. Dans le cas de cette alerte, nous avons donc considéré qu'il était inutile de définir un indice de localisation employant les relations de localisation orl#AuxAlentoursDe ou orl#PresDe, la relation orl#ATempsDeMarcheDe quantifiant également un éloignement au point de départ, mais de manière plus discriminante.

Le troisième élément de l'alerte nous indique que « la victime a chuté de plusieurs mètres ». Prise sous cette forme, cette description n'est pas interprétable comme un indice de localisation et aucune des relations que nous avons définies ne permet de l'exprimer. Il est cependant possible de combiner cette information avec les descriptions précédentes, de manière à construire un nouvel indice de localisation. Ces descriptions nous renseignent, en effet, sur le potentiel contexte de cette chute. Comme la victime a indiqué qu'elle se déplaçait à pied, sur un chemin, nous pouvons supposer que c'était également le cas lors de sa chute. Nous pouvons alors en déduire que, suite à sa chute, la victime se situe sous un chemin. Cette information extrapolée peut ainsi être modélisée avec la relation de localisation orl#SousAltitude ou l'une des relations qui en dérivent. Compte-tenu du contexte de la chute, la relation de localisation plus appropriée nous semble être orl#SousProcheDe, puisqu'elle ajoute une contrainte de proximité planimétrique. Ainsi, s'il nous est impossible de construire directement une ZLC grâce à l'information « J'ai chuté de plusieurs mètres », il nous est en revanche possible de dériver de cette information un indice de localisation exprimant la position actuelle de la victime, par rapport au chemin dont elle vient de chuter.

L'interprétation de la quatrième description de l'alerte, « La victime voit une partie d'un plan d'eau », est plus évidente que celle des descriptions précédentes. En effet, deux relations de localisation spécifiques ont été introduites pour traiter des relations de visibilité orl#`SiteVoitCible` et orl#`CibleVoitSite`. Ces différentes relations permettent de distinguer les visibilités actives et passives. Dans le cas présent, la victime décrit ce qu'elle voit, on est donc dans une situation modélisable à l'aide de la relation de localisation orl#`CibleVoitSite`. Cette description présente, cependant, la particularité d'employer la locution « une partie de » précisant que le plan d'eau mentionné n'est pas vu dans son intégralité. Dans sa configuration initiale, la relation orl#`CibleVoitSite` ne permet pas d'exprimer une telle description, il est donc nécessaire d'employer un modifieur, ce que nous détaillerons lors de la modélisation de cet indice de localisation.

De manière similaire, la cinquième description, « La victime est sous une route et entend des voitures », est assez explicite. On reconnaît dans cette formulation l'utilisation de la préposition « sous » traduisant une relation de verticalité. Or, comme nous l'indiquions lors de l'analyse de la seconde description (« La victime a chuté de plusieurs mètres »), la relation de localisation `SousAltitude`, n'apportant aucune contrainte sur l'axe horizontal, n'est pas nécessairement la plus pertinente ici. On peut donc utiliser une nouvelle fois la relation de localisation orl#`SousProcheDe` pour construire un nouvel indice de localisation. Cette description donne une seconde information, « la victime entend des véhicules ». Cette dernière n'est, une nouvelle fois, pas directement interprétable avec une relation de localisation, pourtant cette information peut être exploitée de manière à raffiner la modélisation de *l'indice de localisation.* On peut tirer deux informations différentes de cette indication. Tout d'abord, quelle donne une indication de proximité. En effet, la victime indique indirectement qu'elle se situe à portée de son de la route, ce qui, si l'on disposait d'un modèle adapté, permettrait d'estimer la distance de la victime à la route. Il serait même possible de définir une nouvelle relation de localisation `APorteeDeSonDe` pour retranscrire cette indication. Une telle relation permettrait sans aucun doute d'affiner cette approximation, surtout si elle permet la prise en compte des effets d'échos, particulièrement présents en montagne, pouvant conduire à une perception faussée de la distance d'un son. Cependant, nous n'avons pas travaillé au développement d'une telle méthode, cette alerte étant la seule où une portée sonore est mentionnée. La seconde information que l'on peut tirer de cet élément est la nature de la route. On peut en effet considérer que, pour que la victime prenne conscience d'entendre une route, il est nécessaire que celle-ci soit suffisamment fréquentée pour que le trafic soit notable. Un tel critère permet d'affiner la sélection des objets de référence qui, compte-tenu de l'imprécision de la description, seront relativement nombreux. Il est, cependant, délicat de procéder à une telle sélection sans risquer de ne pas prendre en compte des objets de référence pertinents, et donc de créer des faux négatifs. En effet, l'hypothèse que nous proposons ici est assez contraignante et il nous semble inenvisageable de l'appliquer sans la confirmation de la victime.

Dans la sixième description, la victime indique qu'elle se situe sous une ligne électrique trois brins. Nous avons déjà présenté ce cas, notamment dans le chapitre 6 où nous comparions les différentes implémentations de la théorie des sous-ensembles flous pour représenter des zones de localisation. Si nous n'avions pas encore présenté les différentes relations de localisation, définies dans l'ontologie des relations de localisation. Nous avions déjà expliqué que cette description nécessitait que la relation de verticalité entre le *site* et la *cible* soit contrainte selon l'axe horizontal. Autrement dit, il est ici nécessaire d'être proche du *site* et à une altitude inférieure du *site* pour que l'on puisse affirmer qu'une position soit « sous » le *site.* La relation de localisation `SousProcheDe` a spécifiquement été définie pour modéliser ce type de relation.

La septième description donnée par le secouriste nous indique que la position de la victime vient de passer du Soleil à l'ombre. Une nouvelle fois, nous n'avons pas défini de relation de localisation permettant de modéliser un tel indice, celui-ci n'apparaissant qu'une seule fois dans l'ensemble du corpus d'alertes. Il serait cependant possible de mettre en place une telle relation de localisation, plusieurs bibliothèques [7] permettant de modéliser les ombres produites par le relief en fonction de l'heure de la journée.

La huitième et dernière information que nous ayons sur cette alerte donne la position du relais téléphonique auquel le téléphone de la victime est connecté. Comme pour la description précédente, nous n'avons pas défini une relation de localisation spécifique à ce type d'information, mais pour des raisons différentes. En effet, si l'indication « Je viens de passer du Soleil à l'ombre » est unique et assez spécifique, ce qui nous a conduit à l'ignorer provisoirement, la connaissance de l'antenne de rattachement du téléphone de la victime est plus facilement obtenable par les secouristes, ces derniers pouvant faire une demande de localisation pour chaque alerte (chapitre 1). Toutefois, l'exploitation fine de cet indice est assez complexe, comme nous l'avions rapidement évoqué dans le chapitre 1. L'implémentation d'une hypothétique relation `ConnecteAAntenne` nécessiterait, en effet, de prendre en compte la portée du signal, fortement influencée par les conditions climatiques. Nous avons donc choisi d'ajourner sa définition. Il est, cependant, possible d'utiliser cette information pour extrapoler un nouvel indice de localisation, certes moins précis que celui que l'on pourrait obtenir avec une relation de localisation dédiée, mais tout de même discriminant. On connaît en effet l'orientation générale de l'antenne téléphonique à laquelle le téléphone de la victime est connecté. On peut alors approximer la zone où le téléphone de la victime peut se connecter à une antenne donnée en l'approximant à l'aide d'une relation cardinale. On peut ici employer la relation de localisation `orl#ALEstDe`, pour créer ce cône. Il n'y a ici pas de raisons d'employer une des relations de localisation dérivée de `orl#ALEstDe`, comme `orl#DansLaPartieEstDe` ou `orl#ALEstDeExterne`. En effet, l'objet de référence utilisé pour cet indice de localisation, une antenne GSM, n'est pas de taille suffisante pour que cette distinction ait un sens. Cette approche ne permettra cependant pas de modéliser la portée du signal, le cône construit par la relation `orl#ALEstDe` étant virtuellement infini. Cette approximation dans la modélisation de ce dernier indice est certes insatisfaisante en soi, mais elle devient acceptable lorsque remise dans le contexte de la modélisation de l'alerte dans son ensemble. La multiplication des indices de localisation permet de compenser la faiblesse de certains d'entre eux. De plus, comme nous l'indiquions dans le chapitre 1, la portée des antennes téléphoniques hors des milieux urbains peut être importante et atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Compte-tenu de la taille la ZIR (inférieure à la portée théorique), cette approximation est satisfaisante.

Au terme de l'analyse de l'alerte on dispose donc de 7 indices de localisation à spatialiser :

1. La victime est `orl#DansLaDirectionDeXDepuisY` ou `X` est une station de ski et `Y` *Bourg-d'Oisans*
2. La victime est `orl#ATempsDeMarcheDe` *Bourg-d'Oisans*, avec un déplacement de « plusieurs heures »
3. La victime est `orl#SousProcheDe` un chemin
4. La victime voit (`orl#CibleVoitSite`) une partie d'un plan d'eau
5. La victime est `orl#SousProcheDe` une route

7. Par exemple les fonctions `r.sunmask` et `ta_lighting`, respectivement proposées par les SIG GRASS (GRASS Development Team 2020) et SAGA (Conrad et al. 2015).

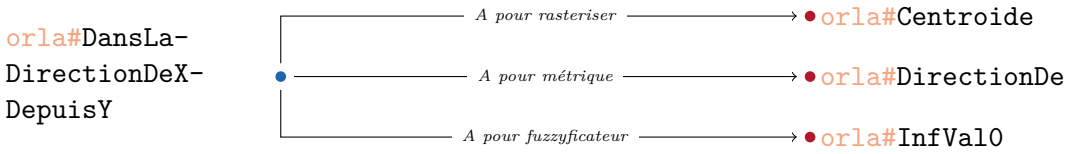


FIGURE 9.26 – Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#DansLaDirectionDeXDepuisY

6. La victime est orl#SousProcheDe une ligne électrique trois brins
7. La victime est orl#ALEstDe l'antenne GSM de la *St-Philomene*

9.3.2 Modélisation de l'alerte

Les informations données par la victime étant très imprécises, il est difficile de définir la *zone initiale de recherche* pour cette alerte. On sait cependant, grâce au premier indice de localisation (1), que la victime est partie de Bourg-d'Oisans. On peut donc centrer la ZIR sur ce lieu. Cependant, aucun autre indice de nous permet d'estimer la taille que devrait faire cette zone. Nous avons donc pris la décision de définir une ZIR dont les limites ne seraient pas atteignables en une journée par un randonneur (à moins qu'il ne se déplace en fond de vallée). Nous avons donc créé une ZIR de 25 km de côté, pour une aire de 625 km^2 [8] (Figure 9.25). L'ensemble des calculs présentés ici ont été réalisées à partir d'une maille de 50 mètres de côté.

Le premier des indices de localisation de cette alerte (1) est fondé sur la relation de localisation orl#DansLaDirectionDeXDepuisY, qui permet de modéliser une relation de direction sans considération d'itinéraire ou de support. Il s'agit d'une relation de localisation atomique utilisant le rasteriser orla#Centroide, la métrique orla#DirectionDe et le fuzzyficateur orla#InfVal0 (Figure 9.26). Cette relation de localisation a la particularité d'être binaire, elle nécessite donc deux sites, X et Y, le premier donnant le point visé et le second le point de départ. Dans le cas présent, l'un des deux sites est clairement identifié (« Bourg-d'Oisans ») alors que le second est désigné par son type (« Une station de ski »). Il est donc nécessaire de procéder à la décomposition de l'indice de localisation en fonction des différentes instances correspondant à la description de l'objet de référence. Dans le cas présent, on peut identifier 7 stations de ski [9] dans la ZIR, chacune d'entre elles pouvant être un objet de référence potentiel. Nous aurions pu compléter cette sélection en y ajoutant les stations situées en bordure de la ZIR, comme *Champrousse,* le requérant pouvant se diriger vers une station (ce qui justifiait de la sélectionner), sans qu'il n'ait eut le temps de l'atteindre (ce qui justifie son absence de la ZIR). Nous avons, cependant, choisi de nous limiter à sélectionner les stations situées dans la ZIR, cette dernière étant de grande taille et une station comme *Champrousse* nous semblant être trop éloignée du point de départ pour être pertinente. On est donc amené à décomposer cet indice de localisation en 7 sous-indices, partageant la même relation de localisation et le même site Y (*i.e.* le même point de départ) et se distinguant par leur destination, le site X.

Pour représenter les objets utilisés comme sites, nous avons, à nouveau, utilisé les données ponctuelles, destinées au placement des toponymes, présents dans la BDTOPO. Les objets

8. Compte-tenu de la grande taille de la ZIR l'ensemble des figures relatives à la spatialisation de cette alerte ont étés rééchantillonnés. Les figures au 1 : 250 000 (*e.g.* Figure 9.28) sont composées de pixels de 250 m de côté et les figures au 1 : 600 000 (*e.g.* Figure 9.27) de pixels de 600 m de côté). La réduction de la résolution des rasters a pu créer certains artéfacts visuels (*e.g.* déformations de zones).
9. Les deux Alpes ; Auris en Oisans ; Ornon ; l'Alpe d'Huez ; Oz ; Villard-Reculas et Vaujany.

géographiques désignés par la victime sont donc représentés par des points, ce qui est une approximation significative. Cependant, nous avons choisi d'utiliser le rasteriser orla#`Centroide` pour la spatialisation de la relation de localisation orl#`DansLaDirectionDeXDepuisY`, l'utilisation d'une autre géométrie n'aurait donc pas impacté le résultat de la modélisation.

Une fois la décomposition effectuée, on peut procéder à la spatialisation indépendante des indices de localisation. L'opération de rasterisation ne présente pas de caractéristiques particulières, si ce n'est que nous avons choisi d'employer la rasteriser orla#`Centroide`, celui-ci nous semblant plus adapté à la modélisation d'une direction.

Une fois la rasterisation, effectuée la métrique orla#`DirectionDe` est calculée. Cette métrique, déjà présentée dans le chapitre 7, mesure la distance de chaque position de la ZIR à une ellipse alignée sur la droite reliant les centroïdes des sites `X` et `Y` et dont la taille (*i.e.* la taille des demi-grand et petit axes) est proportionnelle à la distance entre `X` et `Y`. La figure 9.27a représente le résultat de la métrique pour l'indice de localisation décomposé : « La victime est partie de *Bourg-d'Oisans* en direction des *Deux-Alpes* ». Comme on peut le voir sur cette figure, les deux sites sont légèrement en dehors de l'ellipse. Nous avons en effet considéré que cette relation de localisation perdait en pertinence à proximité des deux sites. Ainsi, nous avons fixé la longueur de l'ellipse à 90 % de la longueur du segment reliant les deux sites. La longueur du demi-petit axe de l'ellipse est, quant à elle, définie en fonction de la longueur du demi grand-axe [10]. En choisissant de faire des deux axes de l'ellipse des longueurs proportionnelles à la distance séparant les deux sites de la relation de localisation, nous faisions l'hypothèse que plus la destination est éloignée de l'origine du déplacement, plus il est probable que la victime suive un chemin s'éloignant considérablement de la droite.

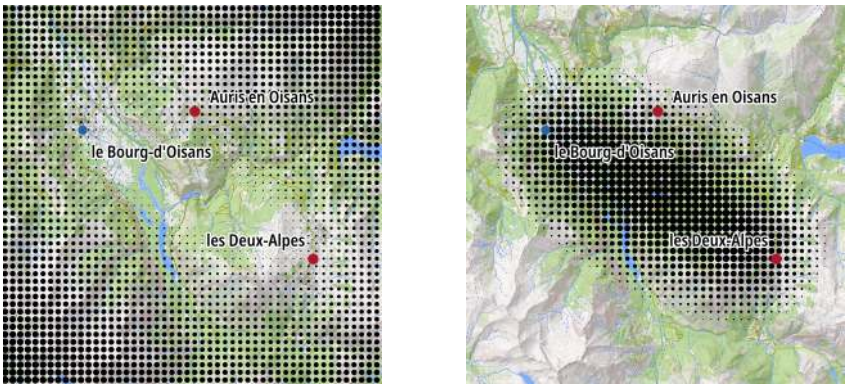
Une fois que la métrique a été calculée nous pouvons passer à la construction de la ZLC par le biais de la fuzzyfication. La figure 9.27b représente le résultat de la fuzzyfication de la figure 9.27a [11]. Comme on peut le remarquer, la zone de localisation ainsi construite inclut et dépasse de part et d'autre des deux sites, même si le degré d'appartenance est plus faible que celui au centre de l'ellipse. Nous avons souhaité ce comportement pour prendre en compte d'éventuels dépassements, potentiellement fréquents en montagne. Ainsi, si la victime, partant de Bourg-d'Oisans à destination des deux-Alpes, suit un chemin l'amenant à contourner sa destination pour arriver par le nord ou le sud (voire l'est). Toute position sur cet itinéraire pourra être considérée comme validant la relation de localisation. Un autre point notable est que, comme la relation de localisation orl#`EntreXEtY` [12], la ZLC ici construite est symétrique, c'est-à-dire que l'inversion des objets `X` et `Y` n'impacte pas le résultat de la spatialisation. Cependant, là où la symétrie de la relation de localisation orl#`EntreXEtY` est un choix de modélisation, celle de la relation orl#`DansLaDirectionDeXDepuisY` est la conséquence de la métrique choisie. Ainsi, si nous changeons le processus de spatialisation de cette relation de localisation, il est probable que cette caractéristique disparaisse.

Après avoir répété le processus de spatialisation de la relation de localisation orla#`DansLaDirectionDeXDepuisY` pour toutes les stations de ski situées dans la ZIR, on peut en calculer l'union et construire la ZLC de ce premier indice de localisation. La Figure 9.28 représente le résultat de cette union. Comme on peut le remarquer, ce premier indice est, compte-tenu de la taille initiale de la ZIR, assez discriminant, une grande part des parties sud, est et ouest de

10. Précisément 25 % de la longueur du demi grand-axe.

11. On pourra remarquer que l'ellipse représentée sur les figures 9.27a et 9.27b ne semble pas être parfaitement parallèle au segment reliant *Bourg-d'Oisans* aux *Deux-Alpes*. Cette déformation est liée au changement de résolution effectué pour la représentation de ces résultats et n'est donc pas présente à la résolution native.

12. Que nous avons déjà utilisée pour modéliser le cinquième indice (4) de l'alerte *Grand Veymont*.



(a) (b)

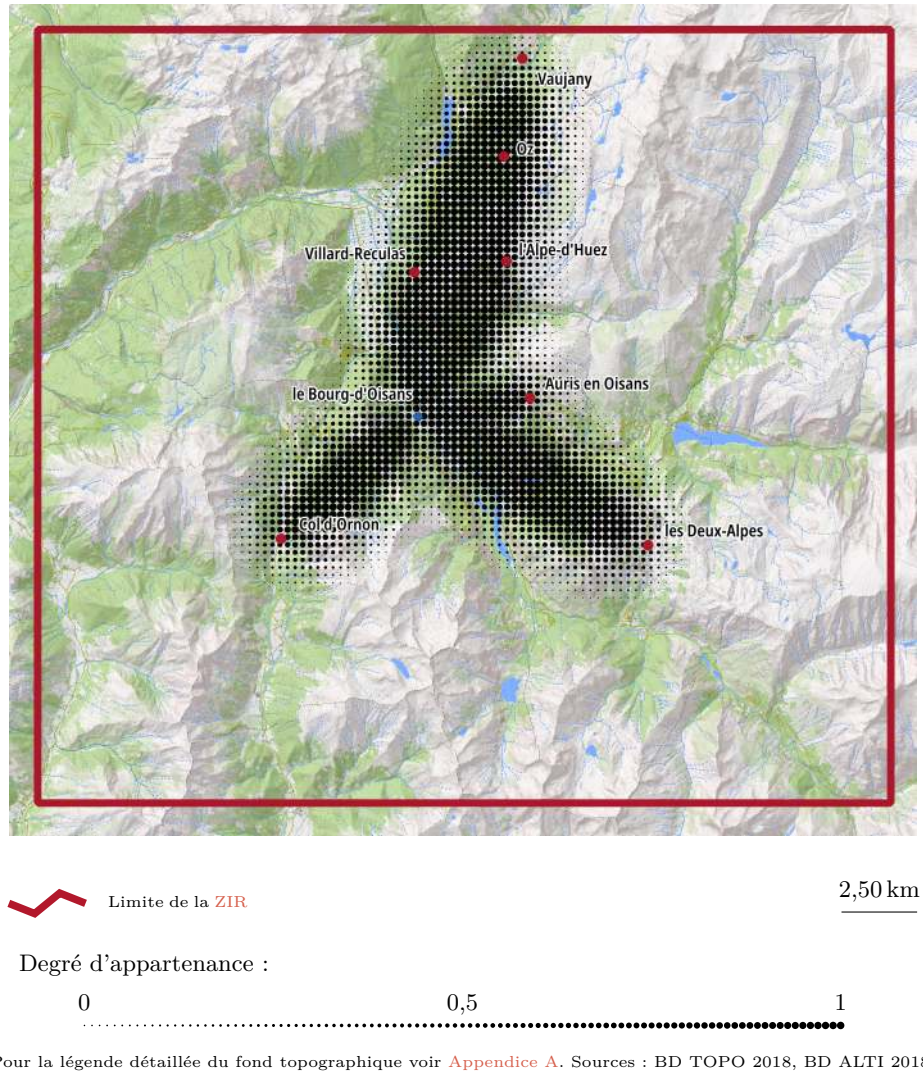
FIGURE 9.27 – Métrique (a) et ZLC (b) de la relation de localisation orla#DansLaDirectionDeXDepuisY pour la station des Deux-Alpes.

la ZIR obtenant un degré d'appartenance nul.

Le second indice de localisation[13] donne une estimation de la durée de déplacement de la victime, entre le début de sa randonnée et le moment de l'appel. Nous avons proposé de modéliser cette information à l'aide de la relation de localisation orl#ATempsDeMarcheDe. Il s'agit une nouvelle fois d'une relation de localisation atomique, qu'il n'est pas nécessaire de décomposer. De même, l'objet de référence utilisé, *Bourg-d'Oisans,* est nommé. Il n'est donc pas nécessaire de procéder à la décomposition des objets de référence. Cet indice de localisation est donc directement spatialisable.

Dans sa version « standard », la relation de localisation atomique orla#ATempsDeMarcheDe utilise le rasteriser orla#Geometrie, la métrique orla#TempsMarche et la fuzzyficateur orla#EqVal prenant comme paramètre la durée de déplacement (Figure 9.29). Cependant cette méthode de spatialisation ne peut s'appliquer ici, le requérant donnant une valeur très imprécise (*i.e.* « Plusieurs heures ») de sa durée de déplacement. Or, la méthode de spatialisation de la relation orla#ATempsDeMarcheDe que nous avons définie ne permet que la modélisation d'indices où la durée de déplacement est clairement définie, comme « J'ai marché environ deux heures », ou « Il a marché pendant cinq heures ». Pour modéliser un indice donnant un intervalle de durée de déplacement (*e.g.* « J'ai marché entre trois et cinq heures, je ne sais plus exactement ») il est nécessaire d'utiliser une fonction d'appartenance plus adaptée, comme une fonction de forme trapézoïdale. Pour ce faire, plusieurs solutions sont envisageables. On peut, par exemple, utiliser un modifieur pour transformer la fonction d'appartenance initiale. On peut également définir un nouveau fuzzyficateur et une nouvelle relation de localisation spécifiquement adaptée à cette situation. Si ces deux approches sont parfaitement défendables, nous avons opté pour une troisième solution, plus pérenne. Nous avons créé une variante *ad hoc* de la relation de localisation orla#ATempsDeMarcheDe utilisant le fuzzyficateur orla#InfVal, ce qui permet la modélisation de situations où la victime donne la borne supérieure de sa durée de déplacement et non une valeur précise. Cette nouvelle relation de localisation, TempsDeMarcheInferieurA[14], nous permet de transformer l'indice de localisation : « J'ai marché

13. La victime est orl#ATempsDeMarcheDe *Bourg-d'Oisans*, avec un déplacement de « plusieurs heures » (2).
14. Cette nouvelle relation de localisation n'a pas encore été intégrée à l'ontologie des relations de localisation, d'où son absence de préfixe.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.28 – ZLC pour l'indice de localisation : « La victime est partie de *Bourg-d'Oisans,* en direction d'une station de ski » (1).

plusieurs heures » en l'indice de localisation « J'ai marché moins de n heures ». Cette transformation ne permet cependant pas de conserver toute la sémantique du premier indice. En effet, la relation de localisation `TempsDeMarcheInferieurA` ne fixe pas de borne inférieure à la durée de déplacement, alors qu'on comprend intuitivement que la formulation : « J'ai marché plusieurs heures » n'est pas compatible avec un déplacement de quelques dizaines de minutes. On pourrait créer une nouvelle relation de localisation employant le fuzzyficateur `oral#SupVal`. Cependant, contrairement à la relation de localisation `TempsDeMarcheInferieurA`, il ne nous semble pas intéressant de définir cette nouvelle variante de la relation de localisation `orl#A-TempsDeMarcheDe`, le cas d'une description semblable à : « J'ai marché plus de deux heures » nous semblant très improbable. Il nous a donc semblé plus pertinent d'utiliser la relation de localisation `TempsDeMarcheInferieurA` couplée au modifieur `orla#Not`. On peut alors créer un nouvel indice de localisation, venant compléter le précédent en définissant une durée minimale de déplacement. Ainsi, l'indice de localisation initial (« J'ai marché plusieurs heures »)

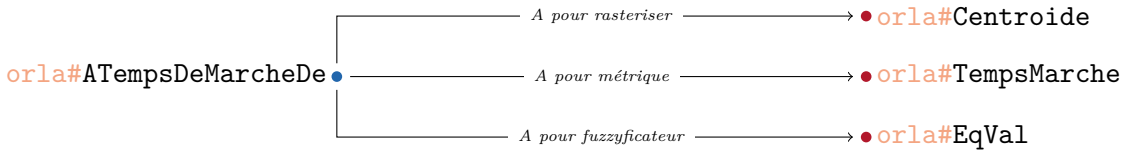


FIGURE 9.29 – Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique `orla#ATempsDeMarcheDe`

est transformé en deux nouveaux indices de localisation : « J'ai marché moins de n heures » et « J'ai marche plus de m heures » [15], liés par une conjonction logique.

Ces deux nouveaux indices de localisation utilisent le même objet de référence (*i.e. Bourg-d'Oisans*) et la même métrique, l'estimation du temps de déplacement nécessaire pour atteindre la position à partir du site, calculée avec le modèle de TOBLER (1993). La Figure 9.30 représente la valeur de la métrique pour l'ensemble des positions de la ZIR.

Une fois le calcul de la métrique effectué, on peut procéder à la fuzzyfication et à la construction des ZLC. Dans le cas présent, deux ZLC sont à construire et donc deux fonctions d'appartenance sont à paramétrer. La première d'entre elles utilise le fuzzyficateur `orla#InfVal` pour sélectionner les positions situées à moins d'un temps de marche donné. Pour prendre en compte la forte imprécision dans l'estimation de la durée de déplacement (« Plusieurs heures »), nous avons fixé une borne supérieure élevée, considérant que la victime avait potentiellement marché toute la journée. La valeur v [16] a donc été fixée à 6 heures, ce qui correspond à la durée d'une longue randonnée. Pour prendre en compte des déplacements plus longs, nous avons également fixé la valeur du second paramètre, δ, à 6 heures, ce qui permet d'attribuer un degré d'appartenance non nul à toutes les randonnées durant moins de 12 heures. Comme on peut le remarquer sur la 9.31a, l'application de cette fonction d'appartenance à la métrique précédemment calculée (Figure 9.30) conduit à la construction d'une ZLC moins discriminante que celle du premier indice de localisation (Figure 9.28). L'ensemble des positions situées en fond de vallée, moins contraintes pas la pente, ont un degré d'appartenance maximal et seules quelques zones, situées à haute altitude et éloignées de *Bourg-d'Oisans* ont un degré d'appartenance faible voir nul.

La seconde ZLC est également construite à l'aide du fuzzyficateur `orla#InfVal`, mais couplé au modifieur `orla#Not`, ce qui permet d'attribuer un degré d'appartenance non nul à toutes les positions atteignables en marchant plus qu'une durée donnée. Toujours confrontés à l'imprécision de l'estimation de la durée de déplacement de la victime, nous avons choisi de considérer que les positions situées à plus de 2 heures de marche, la durée minimale pour que l'on puisse parler de « Plusieurs heures », devaient se voir attribuer un degré d'appartenance maximal. Cependant, rien ne nous garantit que la victime ait suivi ces considérations lexicales lors de la discussion téléphonique avec les secours. Il est donc utile de fixer le paramètre v [17] à une valeur suffisamment faible pour garantir que la victime se soit déplacée plus longtemps que cette valeur. Nous avons choisi de fixer la valeur de v a 30 minutes et le paramètre δ à 1h30. L'application de cette fonction de fuzzyfication à la métrique précédemment calculée permet de construire la 9.31b. Comme on peut le remarquer, seules les positions situées en fond de

15. Ou : « Je n'ai pas marché moins de m heures ».
16. Pour rappel, cette valeur défini, pour le fuzzyficateur `orla#InfVal`, dans la borne maximale où les valeurs appartiennent totalement à la ZLC (Figure 7.13).
17. Qui fixe ici le seuil à partir du quel le degré d'appartenance n'est plus nul (Figure 7.14).

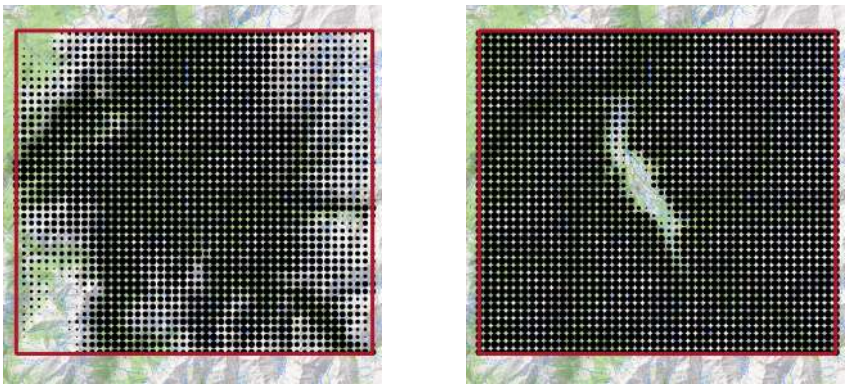
Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.30 – Métrique orla#TempsMarche calculée à partir de *Bourg-d'Oisans.*

vallée et à proximité directe de *Bourg-d'Oisans* se voient attribuer un degré d'appartenance nul.

L'intersection des ZLC représentées par les figures 9.31a et 9.31b permet de construire la ZLC de ce second indice de localisation, c'est-à-dire la ZLC contenant les positions qui sont atteignables en moins de 12 heures de marche (Figure 9.31a), mais en plus d'une demi-heure (Figure 9.31b). Comme on peut le remarquer sur la Figure 9.32, la ZLC ainsi obtenue est étendue, ce second indice de localisation est donc assez peu discriminant. Cependant, il complète efficacement le précédent indice, puisque des positions considérées comme pertinentes d'après le premier indice de localisation (*e.g.* le fond de la vallée de *Bourg-d'Oisans*) se voient attribuer un degré d'appartenance nul. L'observation inverse est également vraie, puisque des positions considérées comme pertinentes selon ce second indice (*e.g.* la partie est de la ZIR) sont considérées comme peu pertinentes selon le premier indice de localisation.

L'indice de localisation suivant (3) utilise la relation de localisation orl#SousProcheDe que nous avions déjà présenté, sans la nommer, dans le chapitre 6. Comme nous l'avons déjà



(a) (b)

FIGURE 9.31 – ZLC spatialisant la zone atteignable en moins de 12h de marche (a) et ZLC spatialisant la zone atteignable en plus d'une demi-heure de marche (b).

montré, cette relation est définie comme la composition des relations orla#SousAltitude et orla#Proximal, elle n'est donc pas atomique. La première de ces deux relations de localisation atomiques, orla#SousAltitude, a déjà été employée dans les exemples précédents, comme pour la spatialisation de l'indice de localisation : « Le requérant est orl#SousAltitude du sommet du *Grand Veymont* » (2). Pour rappel, cette relation de localisation atomique emploie orla#Geometrie comme rasteriser, orla#DeltaNearestVal comme métrique et orla#InfVal0 comme fuzzyficateur (Figure 7.15). La relation de localisation atomique orla#Proximal complète la relation orl#SousAltitude, leur combinaison permettant d'exprimer une relation de localisation verticale, avec une contrainte sur l'éloignement planimétrique. La relation de localisation orla#Proximal est spatialisée à l'aide du rasteriser orla#Geometrie, de la métrique orla#DistanceEuclidienne et du fuzzyficateur orla#InfVal (Figure 9.33).

L'objet de référence employé dans ce troisième indice de localisation (« Un chemin ») n'est ici pas nommé. Il est donc nécessaire de décomposer également l'indice de localisation en fonction des instances correspondant à la description donnée et situées dans la ZIR. La BD TOPO contient, au sein des 625 km^2 de la ZIR, de très nombreuses instances de chemin. Pour faciliter la modélisation de cet indice de localisation, nous avons légèrement filtré cet ensemble d'instances, de manière à en retirer les instances situées dans les parties nord-est et sud-ouest de la ZIR, qui sont très peu susceptibles d'être l'instance désignée par le secouriste. Cette opération de désélection manuelle a, certes, été réalisée pour des raisons techniques, mais elle s'intègre parfaitement dans le processus métier des secouristes, ces derniers pouvant retirer (ou ajouter) manuellement des objets à la sélection automatique. Après cette sélection, nous disposons de 1 976 objets de type « chemins » ou « sentiers » qui sont autant d'objets de référence potentiels. Un indice de localisation est alors construit pour chacune de ces instances [18]. À cela, s'ajoute la décomposition des relations de localisation atomiques, qui subdivise chacun de ces 1 976 nouveaux indices de localisation en deux nouveaux indices, le premier correspondant à la relation de localisation orla#SousAltitude et le second à la relation de localisation orla#Proximal. Au terme de la décomposition de ce troisième indice de localisation, on dispose donc de 3 952 nouveaux indices à spatialiser indépendamment.

Pour spatialiser la première relation de localisation atomique (orla#SousAltitude), il est

18. Conformément à la deuxième étape de la phase de décomposition (chapitre 4).

nécessaire de calculer, pour chaque objet de référence, la métrique orla#DeltaNearestVal. Cette métrique calcule, pour chaque position de la ZIR, la différence entre l'altitude de chaque position avec celle de la position, appartenant à l'objet de référence, la plus proche. La figure 9.34a représente la valeur de cette métrique pour un chemin donné. Une fois le calcul de la métrique effectué, on peut procéder à la construction de la ZLC spatialisant la relation de localisation atomique orla#SousAltitude, pour chacune des instances. Pour la modélisation de cette alerte, nous avons légèrement modifié les valeurs de la fonction d'appartenance que nous avions utilisé lors du chapitre 6. En effet, lors de ce premier essai, nous avions choisi de fixer le paramètre v à -5 m et le paramètre δ à 5 m. Le choix d'une valeur négative de v était justifié par le fait que l'altitude des linéaires représentant les lignes électriques dans la BD TOPO était définie par la hauteur des pylônes et non par celle du sol. Un tel paramétrage nous semblait ici trop sévère, d'une part car l'altitude des objets « chemin » de la BD TOPO équivaut à la hauteur du sol, mais également car il nous semble préférable d'adopter une démarche multipliant les indices peu précis (*i.e.* avec des fonctions d'appartenance « larges »), plutôt que de se reposer sur une paire d'indices optimisés. Nous avons donc fixé la valeur de v à 0 et conservé la valeur de 5 m pour δ. La figure 9.36a représente la fonction d'appartenance ainsi définie. Avec un tel paramétrage, toutes positions située à une altitude inférieure à l'objet de référence se voient attribuer un degré d'appartenance maximal et les positions situées légèrement au-dessus de l'objet de référence (jusqu'à 5 m) ont un degré d'appartenance non nul. Si l'on applique cette fonction de fuzzyfication à la métrique représentée par la figure 9.34a, on obtient la figure 9.34b, représentant la ZLC de la relation de localisation orla#SousAltitude pour une instance donnée de chemin.

En parallèle du traitement de la première relation de localisation atomique, on peut procéder au traitement de la relation de localisation orla#Proximal. La métrique utilisée par cette seconde relation est orla#DistanceEuclidienne. La figure 9.35a représente le résultat de cette métrique pour un chemin donné. Comme précédemment, nous avons choisi de modifier légèrement les valeurs de la fonction d'appartenance par rapport aux valeurs que nous avions utilisées dans le chapitre 6, les précédentes valeurs (v et δ fixées à 50 m) nous semblant trop restrictives pour cette alerte. Nous avons donc choisi de fixer la valeur de δ à 150 m, ce qui permet une décroissance plus lente de la fonction d'appartenance et donc une fuzzyfication moins sévère. Nous avons laissé le paramètre v à sa valeur précédente de 50 m, celle-ci nous ayant semblé être toujours pertinente. La figure 9.36b représente la fonction d'appartenance ainsi construite. Si l'on applique cette fonction d'appartenance à la métrique précédemment calculée (Figure 9.35a) on obtient la ZLC de cette seconde relation de localisation atomique. La figure 9.35b représente la ZLC résultante de cette opération pour un chemin donné.

Une fois que l'on dispose des ZLC spatialisant les relations de localisations orla#SousAltitude et orla#DistanceEuclidienne pour chaque instance (Soit 3 952 ZLC dans le cas présent), commence la phase de fusion. Durant la première étape de cette phase, les ZLC correspondant à la spatialisation des relations de localisation atomiques orla#SousAltitude et orla#DistanceEuclidienne pour chaque instance de chemin sont intersectées, de manière à construire la ZLC spatialisant la relation de localisation orl#SousProcheDe. Dans le cas de cet indice de localisation, 3 952 ZLC sont fusionnées deux à deux, en 1 976 ZLC, une par instance. La Figure 9.37 représente cette zone pour l'instance de « chemin » précédemment prise en exemple. Comme on peut le remarquer [19], la ZLC ainsi obtenue est avant tout contrainte par la relation de localisation orla#Proximal (Figure 9.35b). La relation de localisation orla#Sous-

19. C'est une remarque que nous avions déjà formulée dans le chapitre 6.

`Altitude` ne limite quant à elle que l'étendue dans la partie supérieure.

La seconde étape de la phase de fusion consiste à regrouper toutes les ZLC spatialisant la relation de localisation `orl#SousProcheDe`, calculées pour chaque instance en une seule ZLC, spatialisant le troisième indice de localisation (3). La Figure 9.38 représente le résultat de cette opération. Comme on peut le remarquer, la zone de localisation construite à partir de cet indice de localisation est beaucoup plus fragmentée que celles issues des précédents indices.

Le quatrième indice de cette alerte emploie la relation de localisation `orl#CibleVoitSite`. Il s'agit d'une relation de localisation atomique utilisant le rasteriser `orla#Geometrie`, la métrique `orla#PartVisible` et le fuzzyficateur `SupVal`. Comme précédemment, la victime ne mentionne pas un objet de référence particulier, mais en désigne un type (*i.e.* un « plan d'eau »). Il est donc une nouvelle fois nécessaire de procéder à la décomposition de l'indice de localisation. Comme pour le précédent indice de localisation, nous n'avons pas sélectionné tous les objets de type « surface d'eau » présents dans la ZIR. Cependant, ce choix n'a pas été fait pour des raisons techniques, comme précédemment, mais car un grand nombre des objets présents dans la base de données ne nous semblaient pas correspondre à la description donnée par la victime. Au final, six plans d'eau ont été sélectionnés.

Comme pour le second indice de localisation (2), il n'est pas possible d'utiliser directement la relation de localisation envisagée (`orl#CibleVoitSite`) pour modéliser cet indice de localisation. En effet, cette relation est destinée à modéliser des situations où le requérant indique voir un objet. La métrique `orla#PartVisible`, couplée au fuzzyficateur `orla#SupVal` permet de considérer qu'un objet est visible à partir du moment où une portion minimale est visible. Toutefois, dans le cas présent, la victime indique qu'elle ne voit qu'une partie d'un plan d'eau et non son intégralité, ce que le fuzzyficateur `orla#SupVal` ne peut modéliser. Étant donné que ce problème est très semblable à celui que nous avions relevé lors de la modélisation du second indice de localisation (2), une solution similaire peut être envisagée. Nous proposons donc de compléter cet indice avec un second indice de localisation, employant à nouveau la relation de localisation `orl#CibleVoitSite` mais couplée au modifieur `orla#Not`. Ainsi, si le premier indice de localisation permet de construire la ZLC de toutes les positions voyant au moins une partie de l'objet de référence, ce second indice de localisation permet la sélection de toutes les positions ne voyant pas l'intégralité de l'objet de référence.

Nous avons fixé le paramètre v de la fonction d'appartenance du premier indice de localisation à 0,10 et le paramètre δ qui y est associé à 0,10. Par conséquent, toute position voyant une partie, même minime de l'objet de référence aura un degré d'appartenance à la première ZLC non nulle et toute position d'où l'on peut voir au moins 10 % de l'objet de référence aura un degré d'appartenance maximal. Pour le second indice de localisation la valeur de v a été fixée à 0,90 et celle de δ a 0,10. Par conséquent, toute position d'où l'on peut voir plus de 90 % de l'objet de référence aura un degré d'appartenance inférieur a 1.

L'ensemble de figures 9.39 représente la valeur de la métrique `orla#PartVisible` pour un plan d'eau donné (Figure 9.39a), ainsi que les deux ZLC (Figures 9.39b et 9.39c) calculées à l'aide des deux fonction de fuzzyfication décrites. Comme on peut le voir sur la figure 9.39c, peu de positions permettent de voir plus de 90 % de la surface de ce plan d'eau. Cependant, cet effet est, une nouvelle fois renforcé par la diminution de la résolution nécessaire à la représentation et gomme les variations locales. La figure 9.39d représente, quant à elle, le résultat de la combinaisons de ces deux ZLC, c'est-à-dire la ZLC au sein de laquelle on voit une partie du plan d'eau étudié.

Une fois que les ZLC ont été calculées pour tous les objets de référence candidats, on peut procéder à leur fusion et construire la ZLC de cet indice de localisation, représentée par la

Figure 9.40.

Les cinquièmes (5) et sixièmes (6) indices de localisation utilisent tous deux la relation de localisation `orl#SousProcheDe`, comme le troisième indice de localisation (3). Par conséquent, nous ne reviendrons pas ici sur la méthode de construction de la ZLC de ces deux indices, celle-ci ayant déjà été détaillée ci-dessus. Nous avons pris la décision de conserver les mêmes paramètres que ceux sélectionnés pour le troisième indice de localisation.

Comme pour les instances de chemin, nous avons choisi de filtrer les instances de routes situées dans la ZIR. Les mêmes zones ont été retirées, 4 743 routes ont donc été sélectionnées. La Figure 9.41 représente le résultat de la spatialisation de ce cinquième indice de localisation. Comme on peut le constater, la structure spatiale ainsi obtenue est assez similaire à celle de la Figure 9.38.

Pour le sixième indice de localisation, les objets de référence potentiels n'ont pas été filtrés, seuls 34 instances correspondant à la description donnée par la victime. Comme l'illustre la Figure 9.42 la ZLC obtenue après la spatialisation de ce sixième indice de localisation est beaucoup plus réduite que celle des indices précédents, ce qui s'explique par le faible nombre d'objets de référence et par la petite taille de la ZLC de chacune de ces instances.

Le dernier indice de localisation de cette alerte (7) est sans aucun doute le plus simple à modéliser. Il est en effet le seul indice de cette alerte à ne nécessiter ni décomposition des relations de localisation, ni des objets de référence indéfinis. Comme nous l'expliquions lors de la modélisation de l'alerte *Grand Veymont* (cf. indice 3), les relations cardinales comme `orl#AuNordDe` ou `orl#ALEstDe` sont des relations de localisation atomiques, utilisant le rasteriser `orla#Centroide`, la métrique `orla#` avec pour paramètre la direction et le fuzzyficateur `orla#EqAngle`. La seule particularité de cet indice de localisation, comparé au troisième indice de l'alerte *Grand Veymont,* est son objet de référence. En effet, les antennes téléphoniques ne sont pas représentées dans la BD TOPO. Nous avons donc complété notre jeu de données avec les données métier de l'ANFR. La Figure 9.43 représente le résultat de la spatialisation de ce septième indice de localisation.

Une fois que les ZLC des 7 indices de localisation ont été construites, on peut procéder à la dernière étape de la phase de fusion, la fusion des ZLP correspondant à la spatialisation des indices de localisation, qui aboutit à la construction de la ZLP de l'alerte. Dans le cas de l'alerte *fil rouge*, la ZLP ainsi obtenue est représentée par la Figure 9.44.

Comme on peut le remarquer, la ZLP ainsi obtenue est significativement différente de celles obtenues pour l'alerte *Grand Veymont.* En effet, les ZLP de ces précédentes alertes sont relativement « compactes » et forment une zone d'un seul tenant. La zone que nous obtenons ici composée de plusieurs clusters, parfois éloignés de plusieurs kilomètres.

Les degrés d'appartenance les plus élevés à la ZLP se trouvent dans la partie centrale de la ZIR (Figure 9.46c). Le degré d'appartenance à la ZLP des positions situées dans le cluster situé le plus au nord de la ZIR (Figure 9.46b) est principalement limité par le dernier indice de localisation (7). En effet, cette zone est quasiment située au nord de la Chapelle *St-Philomene,* ce qui conduit à un très faible degré d'appartenance pour cet indice de localisation. Or, comme nous l'expliquions précédemment, la relation de localisation `orla#AEstDe`, utilisée pour modéliser le dernier élément de l'alerte *fil rouge,* ne propose qu'une approximation de la zone où le signal de l'antenne GSM est présent. Il est par conséquent très probable que ce cluster de points ait été disqualifié par un modélisation plus fine de ce dernier indice de localisation. Cette remarque est également valable pour le cluster isolé en fond de vallée. Son existence s'explique par la présence de légers reliefs en fond de vallée, suffisants pour ne pas disqualifier ces positions par les indices de localisation 3, 5 et 6, mais pas assez pour leur attribuer un fort

Indice	**Fuzzyficateur**	v	δ
1	orla#SupVal0	*0*	100 m
2	orla#SupVal	2 h	−1 h 30 min
	orla#Not, orla#SupVal	6 h	6 h
3	orla#InfVal	50	150 m
	orla#InfVal0	*0*	5 m
4	orla#SupVal	10%	10%
	orla#InfVal	90%	10%
5	orla#InfVal0	*0*	5 m
	orla#InfVal	50 m	150 m
6	orla#InfVal0	*0*	5 m
	orla#InfVal	50 m	10 m
7	orla#EqAngle	*0*	180°

TABLE 9.2 – Synthèse des paramètres des fonctions d'appartenance utilisés pour la spatialisation des indices de localisation de l'alerte *Fil rouge.*

degré d'appartenance.

Les valeurs les plus importantes de degré d'appartenance se situent au centre de la ZIR, mettant une nouvelle fois en valeur l'importance du dernier indice de localisation (7).

9.3.3 Critique de la modélisation

Comme pour la modélisation de la première alerte (*Grand Veymont,* section 9.2) le premier reproche que l'on puisse faire à la modélisation proposée est la valeur des paramètres des fuzzyficateurs utilisés pour la spatialisation des indices de localisation. Comme précédemment, les valeurs sélectionnées l'on été empiriquement et, bien que le résultat ait été validé par les secouristes, il nous semble possible d'améliorer le résultat de cette modélisation par une configuration plus fine des *fuzzyficateurs.* Le problème nous semble d'autant plus important ici que la ZLP obtenue ici est très fragmentée. En effet, dans l'alerte *Grand Veymont* la ZLP était composée d'une grande zone principale, assez peu étendue. Une paramétrisation plus fine des fonctions d'appartenance aurait certainement permis de réduire la taille de cette zone et donc d'identifier plus précisément la position de la victime. Cependant, cette plus grande précision n'aurait pas été spécialement intéressante pour les secouristes, la ZLP initiale étant suffisamment réduite pour qu'il soit relativement facile de localiser la victime. Cette observation n'est cependant pas valable dans le cas du *fil rouge.* En effet, la ZLP que nous obtenons ici est composées de nombreuses petites zones fragmentées. Prises indépendamment, ces zones sont faciles à explorer par les secouristes, puisque de taille réduite. Cependant, ces zones sont si nombreuses et réparties dans la ZIR qu'il n'est pas envisageable de toutes les explorer. Une meilleure paramétrisation des fuzzyficateurs permettrait, certes, de réduire la taille de ces zones et donc d'améliorer leur précision, mais surtout de faire disparaitre certaines d'entre elles et donc de faciliter la localisation de la victime. Ainsi, si une meilleure définition des seuils des fonctions d'appartenance n'offre qu'un gain de précision dans le cas de l'alerte *Grand veymont,* elle devient fortement nécessaire pour le *fil rouge,* puisqu'il s'agit d'un moyen permettant de limiter les zones à explorer, sans qu'il soit nécessaire d'ajouter de nouveaux indices de localisation.

Un second problème que nous avons identifié est l'utilisation que nous avons faite de certaines relations de localisation. Par exemple, pour la modélisation du second indice de localisation nous avons employé la relation de localisation `orl#ATempsDeMarcheDe`, employant le modèle de Tobler (1993) par le biais de la métrique `orla#DistanceTemps`. Cependant lors du calcul de la métrique nous n'avons pas fait varier la valeur du coefficient g de Tobler (1993), permettant de pénaliser la vitesse de déplacement si celui-ci est effectué hors sentier. La métrique représentée sur la Figure 9.31 est donc sensiblement plus optimiste que celle qui aurait été obtenue à l'aide d'une implémentation complète du modèle de Tobler (1993).

Une autre critique que l'on pourrait faire à la modélisation proposée est que, pour certains *indices de localisation* (« La victime est sous un chemin » (3) et « la victime est sous une route » (5)) nous avons pris le parti de limiter manuellement les *objets de référence* sélectionnés. Cette décision nous a conduit à ne pas traiter tous les objets qui auraient pu être considérés comme des *objets de référence* par les secouristes. Cette approximation n'est cependant pas très problématique, d'une part car ce type de sélection manuelle des *objets de référence* est envisagé comme une des actions possibles des secouristes durant la phase de traitement de l'alerte, mais également car, dans le cas présent, les positions qui auraient été prises en compte par les objets de référence retirés, se voient attribuer un degré d'appartenance nul par d'autres indices. Ainsi, la ZLP n'est pas modifiée par le retrait de ces *objets de référence.*

Un autre reproche que l'on puisse faire à cette modélisation est que le dernier indice de localisation (7) ne propose qu'une approximation grossière de l'information contenue dans la description. Nous pouvons supposer qu'une modélisation plus fine, fondée sur une relation de localisation adaptée, aurait permis de réduire la ZLP, notamment en attribuant un degré d'appartenance nul aux deux clusters de faible degré d'appartenance situés au Nord de Bourg-d'Oisans (Figure 9.46b).

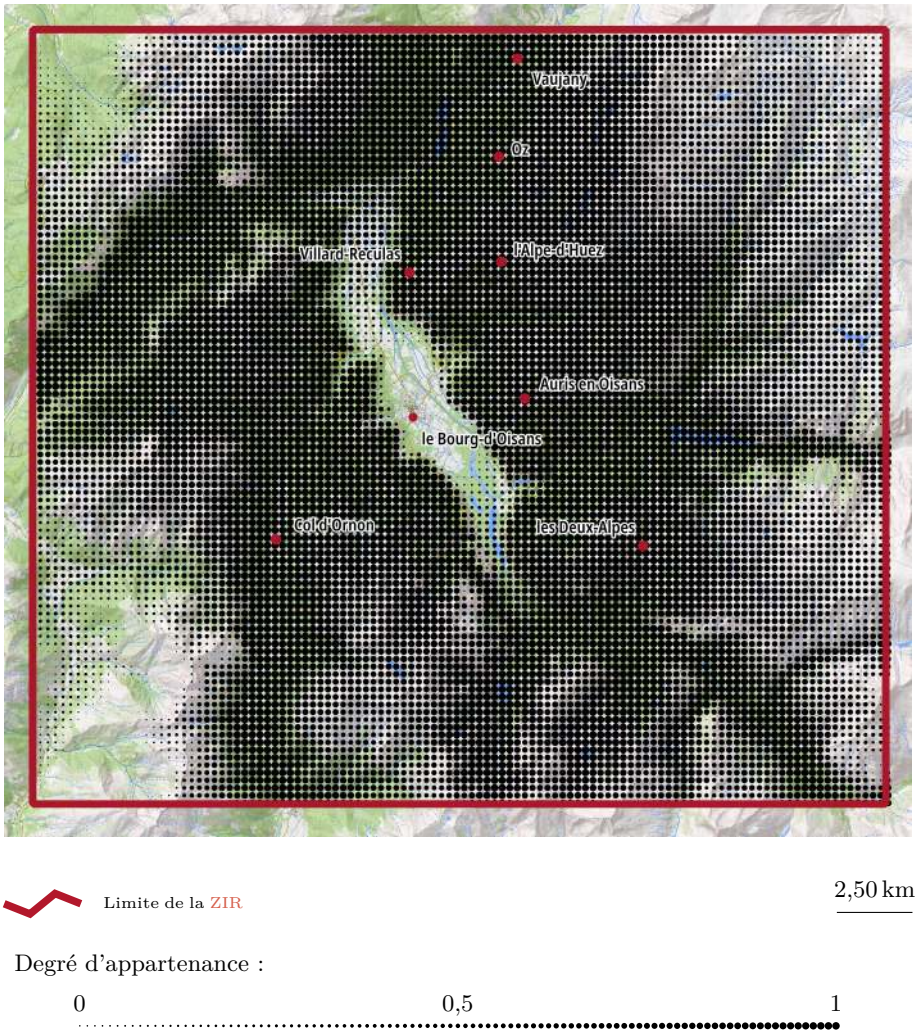
Les secouristes du PGHM de Grenoble nous ont signalé que, dans son état actuel, cette modélisation n'arrivait pas à identifier la position réelle de la victime. Après avoir étudié les résultats intermédiaires, il s'est avéré que cette erreur était liée à la spatialisation de l'indice 6 (« La victime est `orl#SousProcheDe` une ligne électrique trois brins »). Comme nous l'avons expliqué au début de ce chapitre (section 9.1), toutes les données que nous avons utilisées pour la modélisation des alertes présentées dans ce chapitre proviennent de la BD TOPO. Or, cette base de données ne propose pas une représentation exhaustive du territoire. Certains objets visibles sur le terrain ne figurent pas dans la base de données, puique n'entrant pas dans ces spécifications. Parmi les objets qui ne figurent pas dans la BDTOPO on trouve une partie des lignes électriques. En effet, la BD TOPO n'intègre que les électriques opérées par RTE, c'est-à-dire les lignes à haute-tension (voltage $\geq 63\,\text{kV}$) et très haute-tension (voltage $\geq 150\,\text{kV}$) (IGN 2020b). Une grande partie des lignes électriques présentes sur le territoire, notamment les lignes électriques de basse et de moyenne tension (gérées par Enedis) sont donc absentes de la base de données. La ZLC spatialisant le sixième indice de localisation du *fil rouge*(Figure 9.42), aboutit donc à un résultat trop strict, une partie des lignes électriques auxquelles la victime peut se référer n'étant pas prises en compte. Nous avons donc calculé une nouvelle fois la spatialisation de cet indice de localisation en ajoutant les lignes basse et moyenne tension de la ZIR à l'ensemble des objets de référence, mais en conservant le paramétrage du fuzzyficateur précédemment proposé (Figure 9.36). Environ 1 500 lignes électriques, provenant du portail *opendata* d'Enedis, ont donc été rajoutées aux 34 instances de lignes électriques précédemment prises en compte. La Figure 9.45 représente le résultat de cette actualisation de la ZLC. Comme on peut le remarquer, cette nouvelle ZLC est considérablement plus étendue que sa précédente itération, assez contraignante. Certaines positions, qui se voyaient attribuer un degré d'appartenance nul à la ZLP à cause de cet indice, peuvent donc être moins contraintes, ce qui peut modifier la ZLP.

La Figure 9.46 présente la ZLP de l'alerte *fil rouge*, construite après l'actualisation de l'indice de localisation : « La victime est sous une ligne électrique trois brins » (6). On peut remarquer que la *zone de localisation probable obtenue* est plus étendue que précédemment, de nouveaux clusters de positions non nulles apparaissant, et que le degré d'appartenance des positions qui y appartenaient déjà est généralement supérieur à la précédente version de la ZLP.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté l'implémentation de notre méthode dans un prototype, Ruitor, et détaillé la manière dont nous avons procédé pour modéliser des alertes réelles. Pour ce faire, nous avons sélectionné deux alertes : *Grand Veymont* et le *fil rouge* et avons cherché à les spatialiser avec les *relations de localisation* définies dans l'ontologie ORL. Nous avons analysé ces deux alertes de manière à identifier la manière la plus adaptée de les modéliser, puis nous avons construit les *zones de localisation compatibles* correspondant à chacune d'entre elles.

La spatialisation de ces deux alertes nous a permis de mettre en évidence plusieurs défauts à nos modélisations. Certains sont directement liés à la méthode que nous avons définie, comme le fait qu'il n'existe pas de solution autre qu'empirique pour fixer les seuils des *fuzzificateurs,* et d'autres sont liés aux données que nous utilisons. Nous avons ainsi pu identifier de nombreuses pistes d'amélioration de notre méthode.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.32 – ZLC pour l'indice de localisation :« La victime a marché plusieurs heures depuis *Bourg-d'Oisans* » (2).

.

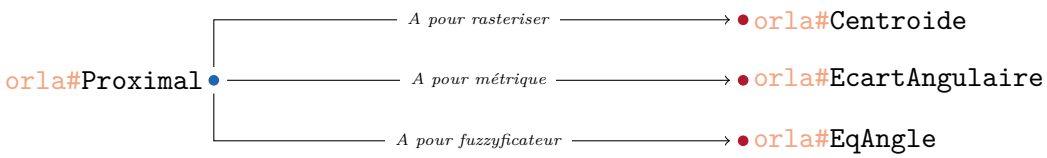


FIGURE 9.33 – Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique `orla#Proximal`

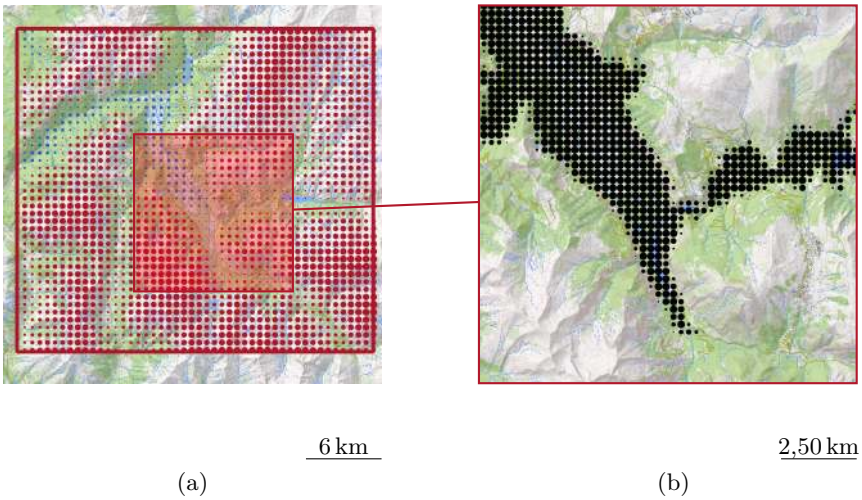


FIGURE 9.34 – Métrique (a) et ZLC (b) pour la relation de localisation `orla#SousAltitude` appliquée à une instance de chemin.

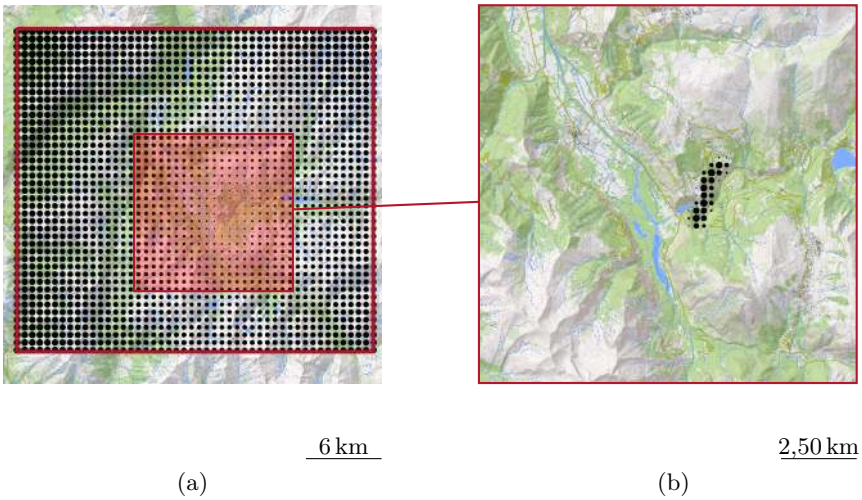


FIGURE 9.35 – Métrique (a) et ZLC (b) pour la relation de localisation `orla#Proximal` appliquée à une instance de chemin.

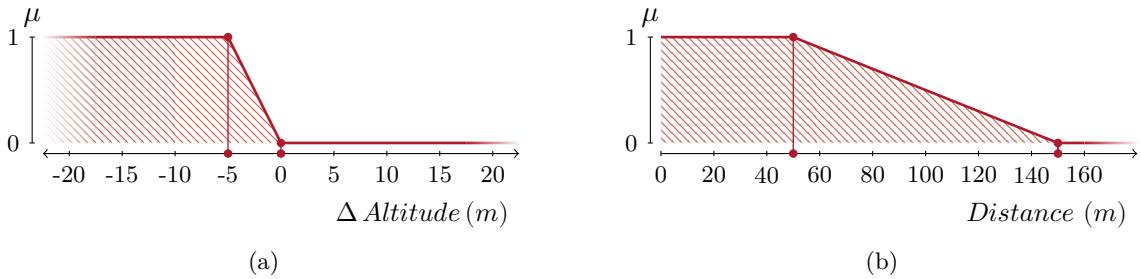
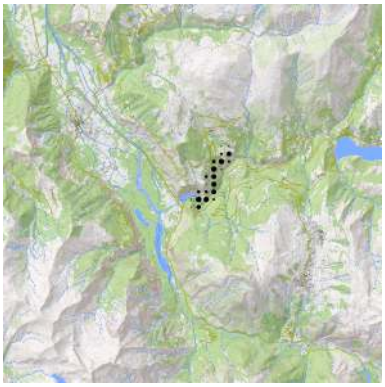


FIGURE 9.36 – Fonctions d'appartenance pour la spatialisation des relations de localisation atomiques `orla#SousAltitude` (a) et `proximal#Proximal` (b).



500 m

FIGURE 9.37 – ZLC de la relation de localisation `orl#SousProche` pour une instance de chemin.

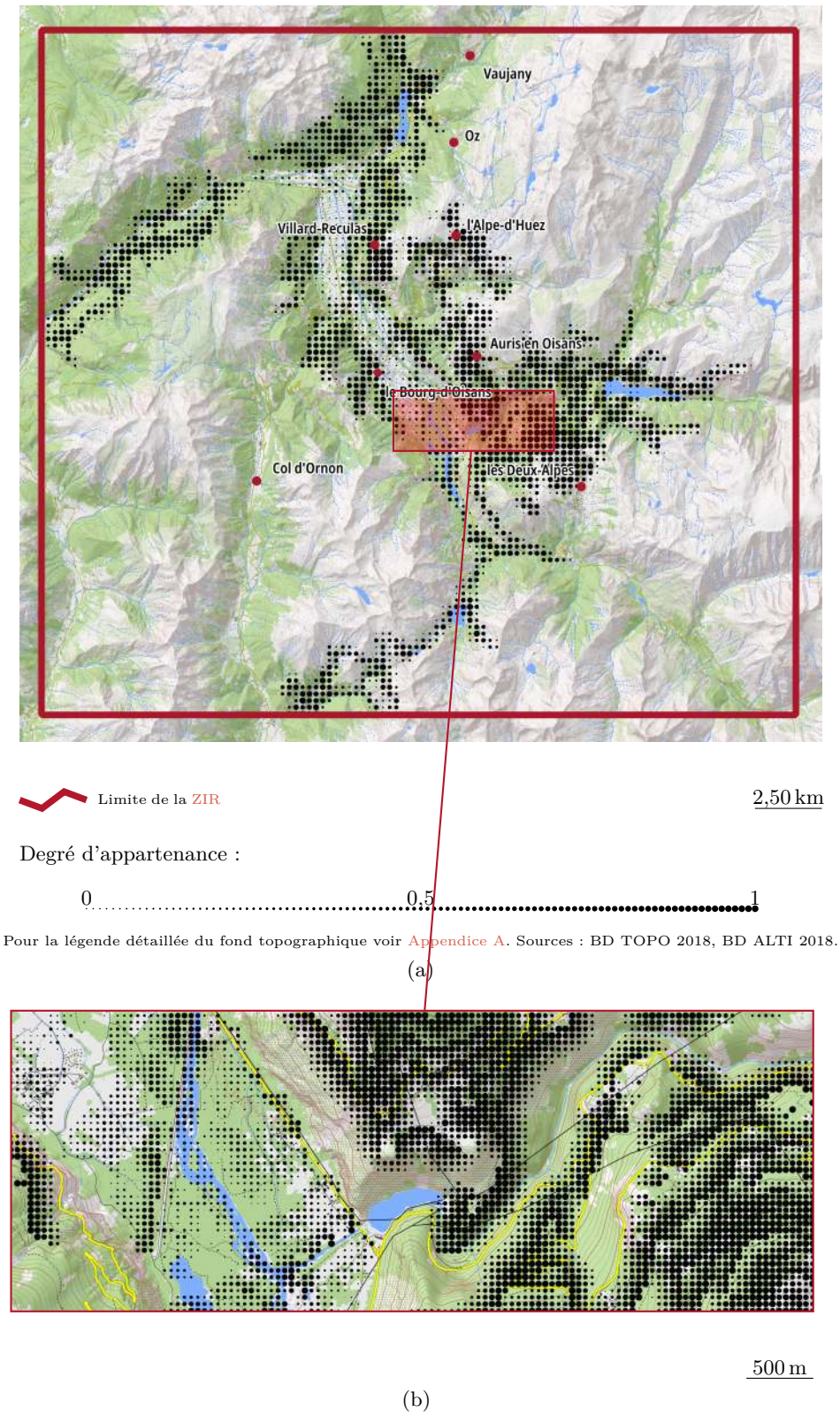
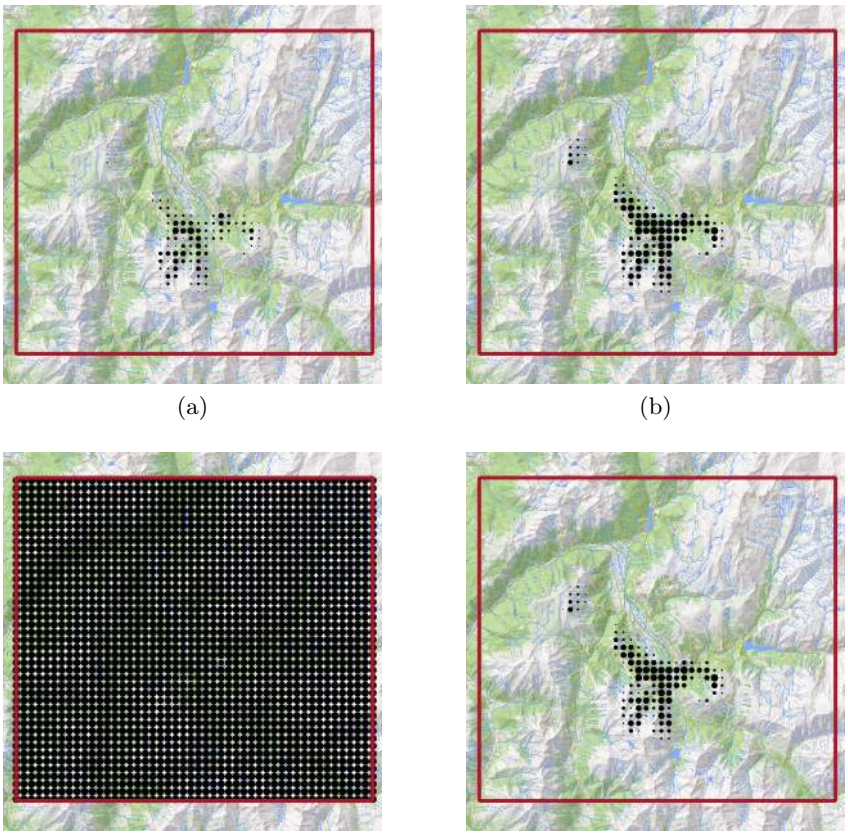
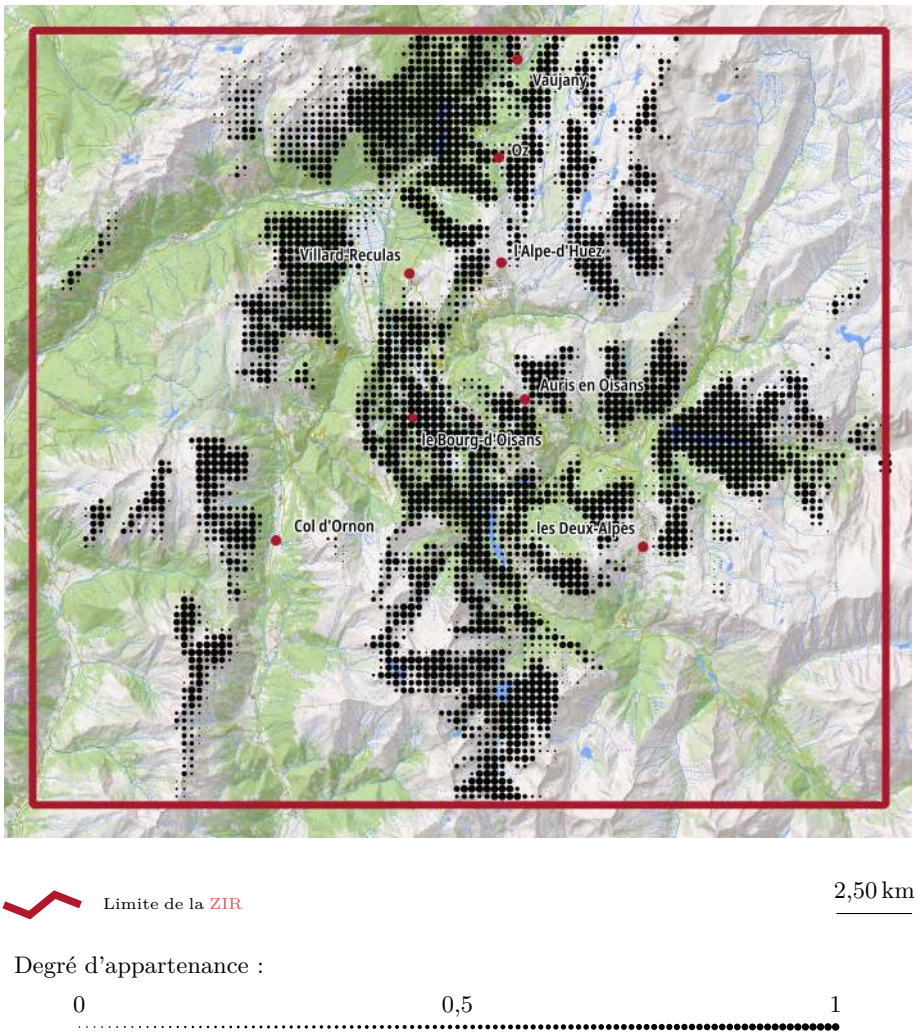


FIGURE 9.38 – ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous un chemin » (3).



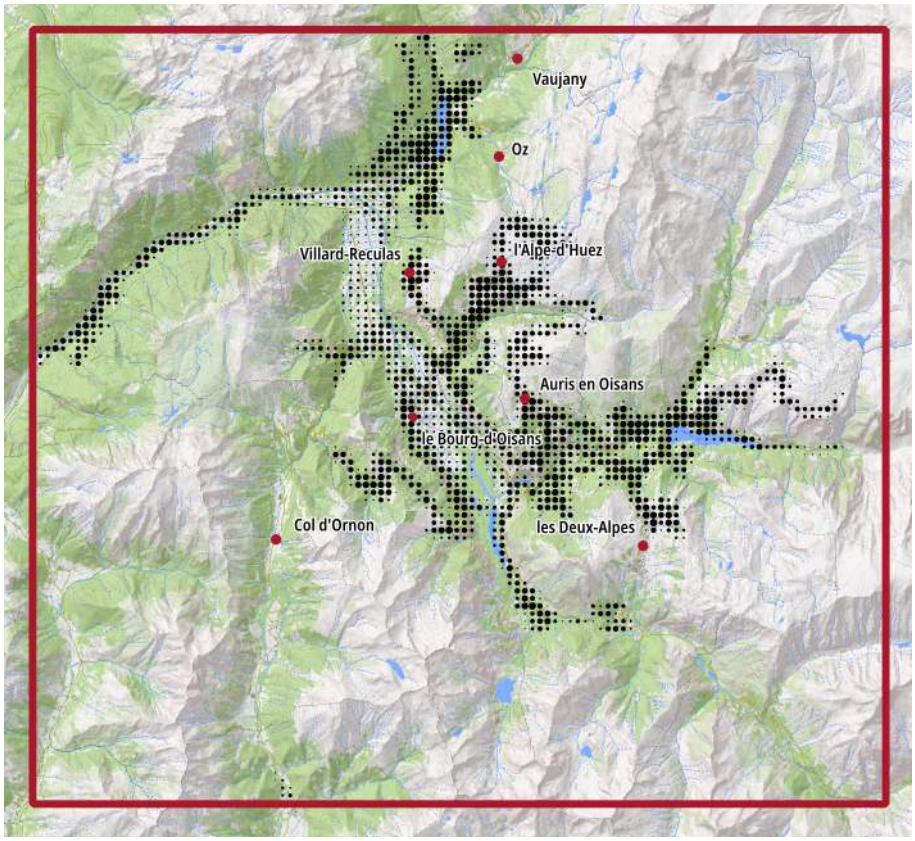
(a) (b) (c) (d)

FIGURE 9.39 – Métrique (a) et zones de localisations compatibles pour la relation de localisation `orla#CibleVoitSite` appliquée à une instance de lac. La première ZLC (b) représente la zone où l'on voit au moins une partie d'un lac, la seconde ZLC (c) la zone ou l'on ne voit pas l'intégralité du lac. La troisième ZLC (d) est l'intersection des précédentes.



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.40 – ZLC pour l'indice de localisation : « La victime voit une partie de plan d'eau » (4).



Limite de la ZIR

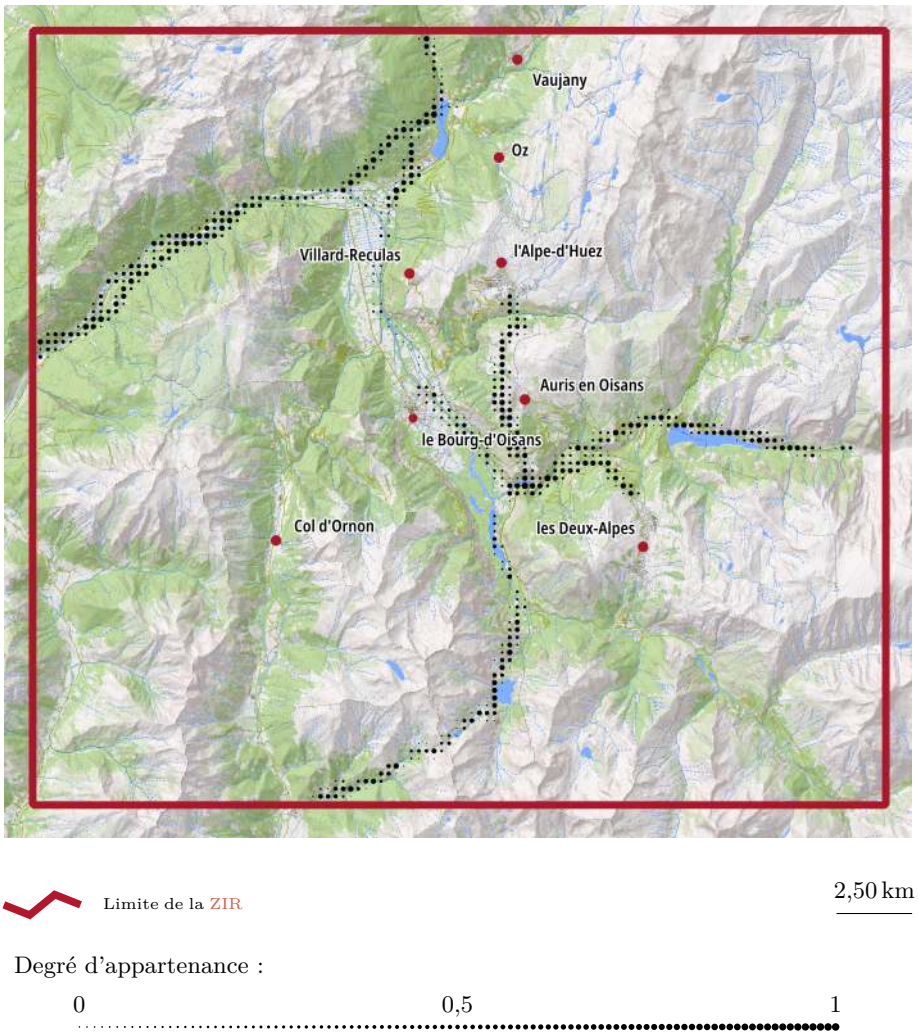
2,50 km

Degré d'appartenance :

0 — 0,5 — 1

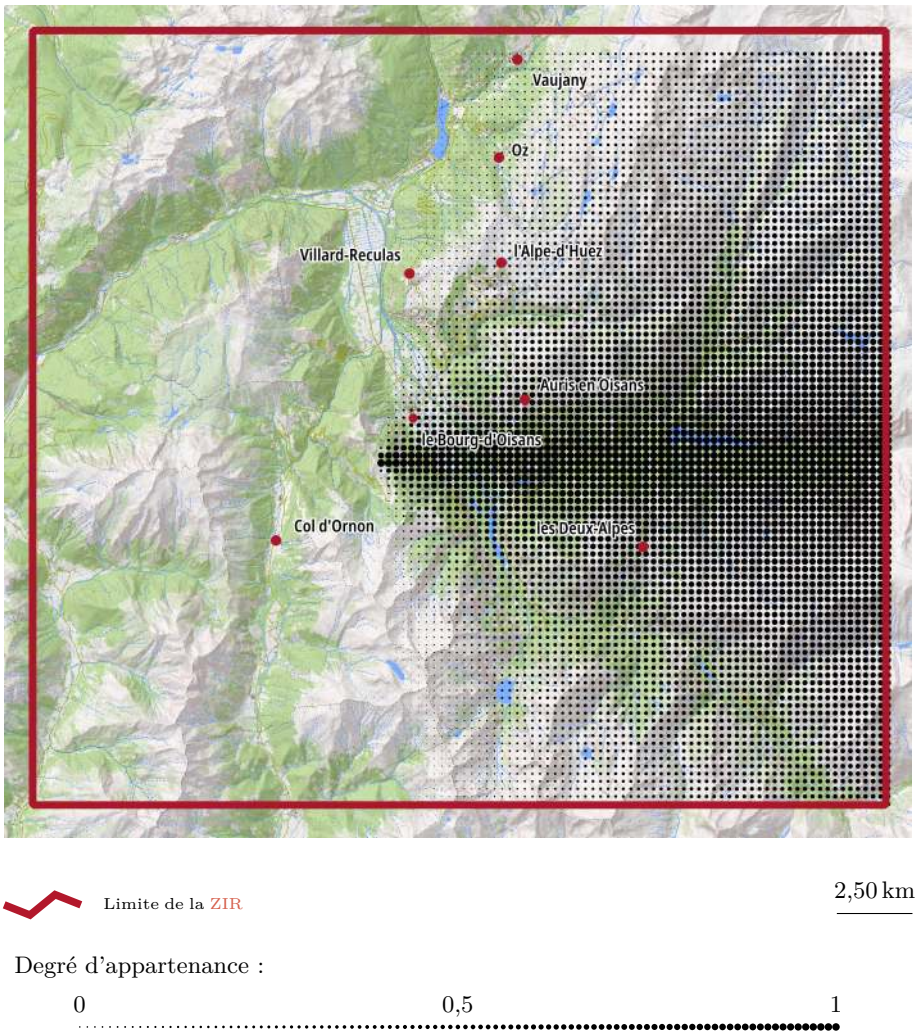
Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.41 – ZLC pour l'indice de localisation :« La victime est sous une route » (5).



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.42 – ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous une ligne électrique trois brins » (6)



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.43 – ZLC pour l'indice de localisation « La victime est à l'est de l'antenne GSM de la chapelle *St-Philomene* » (7)

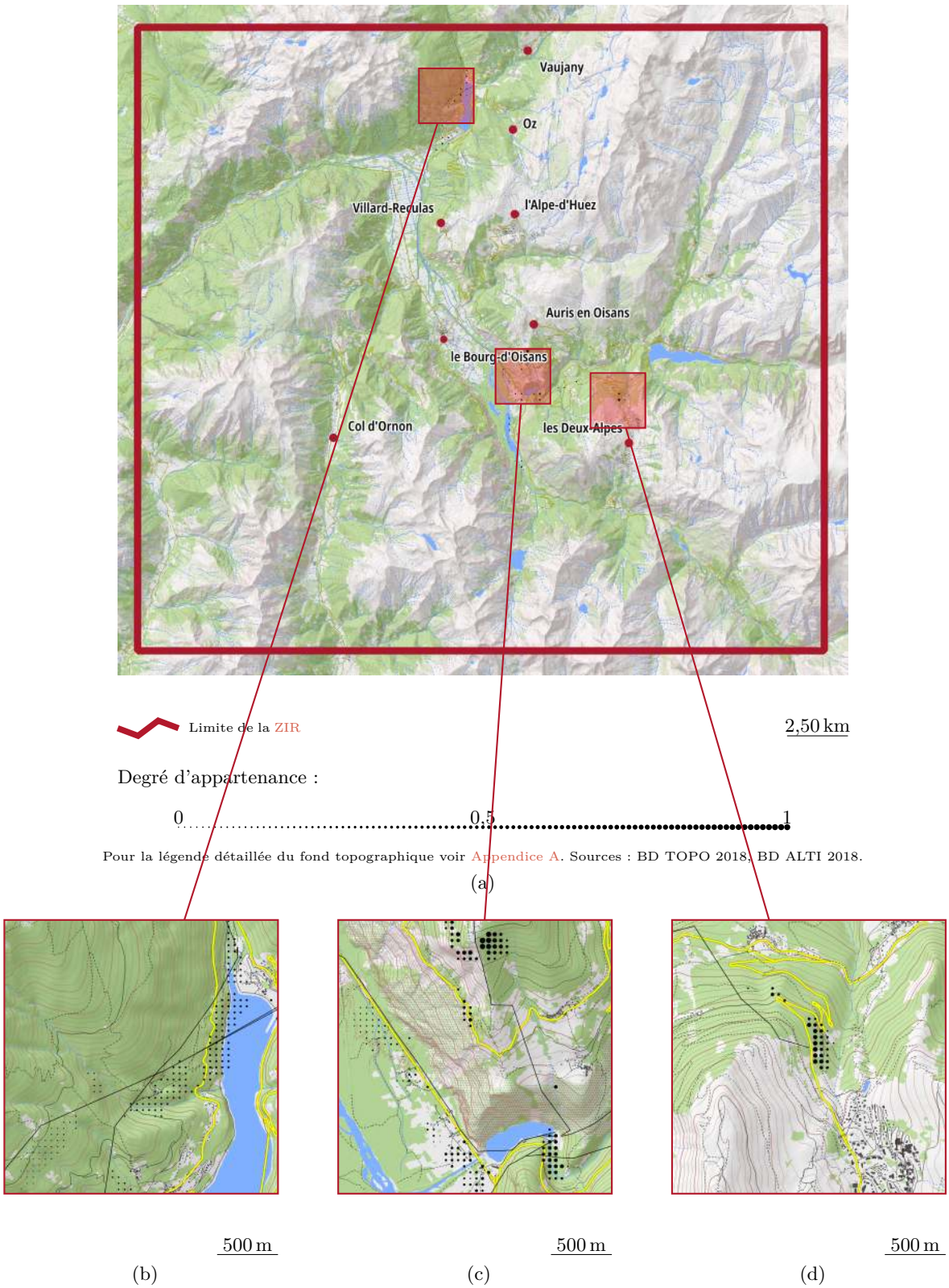
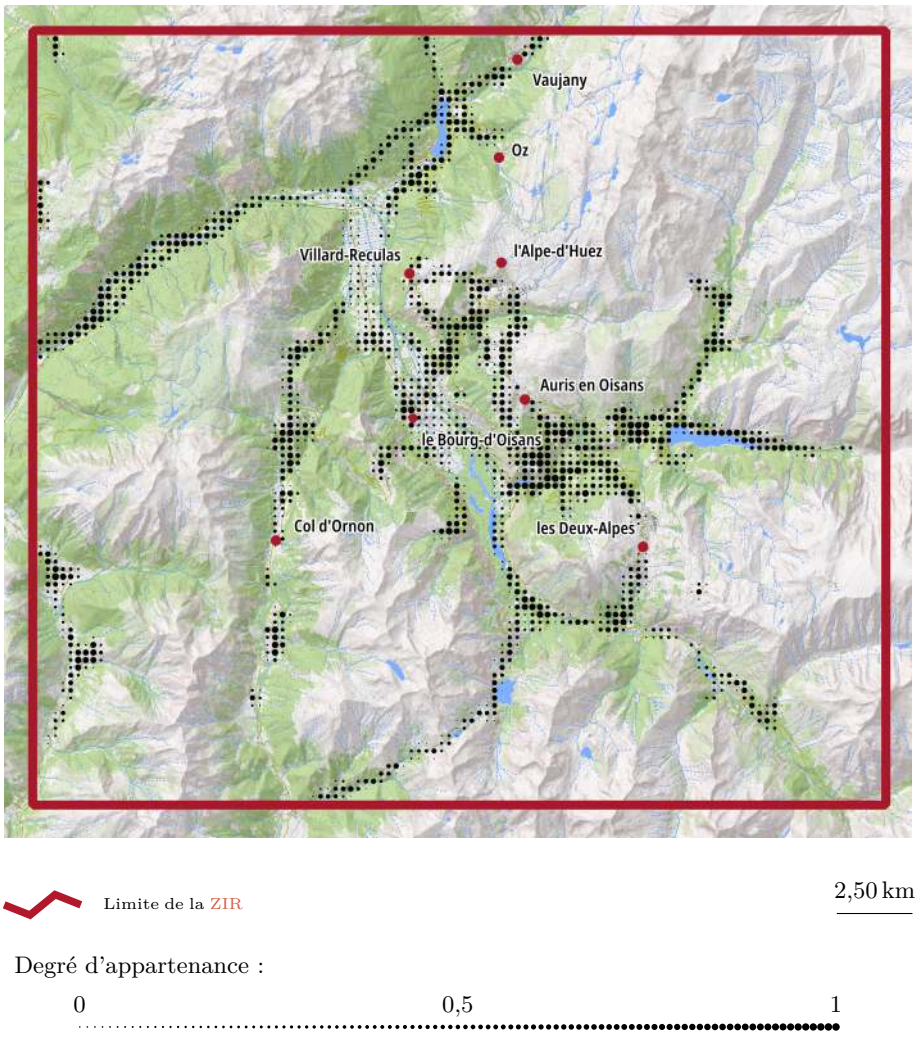


FIGURE 9.44 – ZLP de l'alerte *fil rouge*



Pour la légende détaillée du fond topographique voir Appendice A. Sources : BD TOPO 2018, BD ALTI 2018.

FIGURE 9.45 – ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous une ligne électrique trois brins » (6), après ajout des lignes basses et moyenne tension.

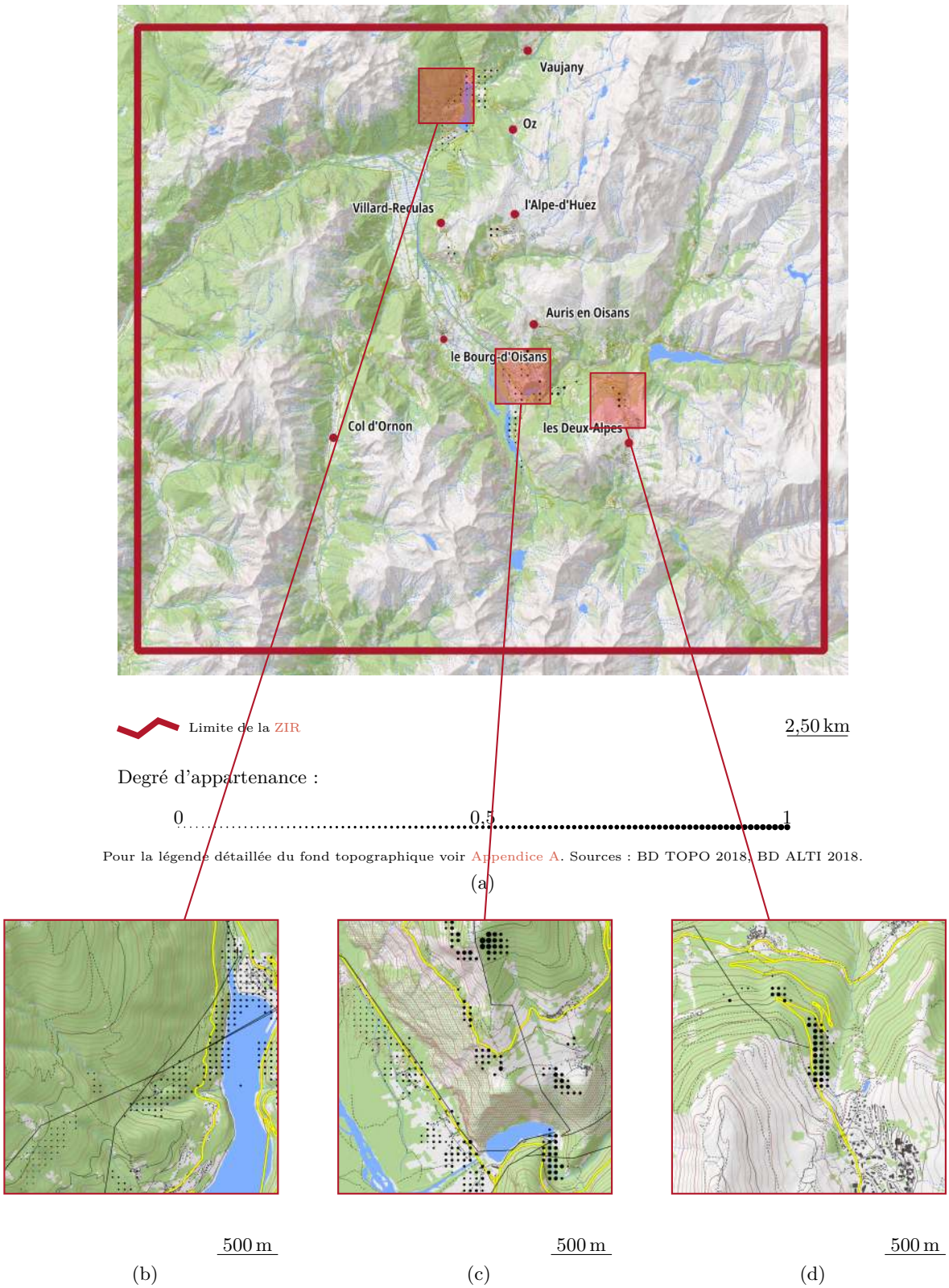


FIGURE 9.46 – ZLP de l'alerte *fil rouge* après mise à jour de l'indice de localisation 6.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse de doctorat est de définir et d'implémenter une méthode permettant d'identifier la (ou les) position(s) correspondant à une description de position, avec pour finalité d'aider les secouristes en montagne à localiser des personnes perdues ou blessées. Pour ce faire, nous avons travaillé à l'identification des *différentes relations de localisation* utilisées dans le contexte du secours en montagne pour décrire une position et nous avons identifié leur sémantique. Pour permettre une spatialisation la plus efficace possible, nous avons également dû travailler à la prise en compte de l'imprécision des relations de localisation et à l'incertitude des indices de localisation.

La première partie (I) de cette thèse était dédiée à la présentation du contexte applicatif, organisationnel et scientifique de cette thèse. Nous y avons présenté le fonctionnement des secours en montagne français, leur manière de procéder pour localiser des personnes perdues en montagne et les limites de cette méthode (chapitre 1). Nous avons également présenté le projet de recherche Choucas et les propositions qu'il porte pour aider les *unités de secours en montagne* dans leur tâche de localisation. Puis, nous avons défini la problématique de notre thèse et le contexte scientifique dans lequel elle s'inscrit (chapitre 2). Enfin, nous avons dressé un état de l'art sur les questions au centre de notre travail de recherche, la modélisation de l'imprécision et des relations de localisation (chapitre 3).

Dans la seconde partie (II) de ce manuscrit, nous avons défini une méthode permettant de transformer une description de position en une zone de localisation compatible et de combiner ces différentes zones afin d'identifier la position décrite par le requérant lors d'une alerte (chapitre 4). Cette méthode est basée sur un processus en trois phases : la décomposition des indices de localisation (chapitre 5), la spatialisation de ces mêmes indices (chapitre 7) en des zones de localisation floues (chapitre 6) et la fusion de ces zones (chapitre 8).

Enfin, la dernière partie (III) de cette thèse était consacrée à l'application de notre méthode à des cas réels. À partir d'enregistrements d'alertes passées, nous avons constitué un ensemble d'indices de localisation, simulant l'action d'un secouriste durant la phase d'alerte, puis nous les avons spatialisés et fusionnés, avant d'en analyser les résultats (chapitre 9).

Bilan des contributions

La principale contribution de cette thèse est la définition et l'implémentation d'une méthode de transformation des positions exprimées dans un référentiel indirect en des positions exprimées dans un référentiel direct. Le développement de cette méthode nous a conduit à travailler à la résolution de plusieurs problèmes scientifiques, tels que la prise en compte de l'imprécision des *indices de localisation* donnés par la victime, de la confiance du secouriste en ces indices ou de leur fusion. Mais la question centrale de ce travail est la spatialisation des descriptions de positions. Pour y répondre, nous avons proposé une méthode que nous avons voulue générique, tout en la calibrant spécifiquement pour notre cas d'application : le secours en montagne.

Cette méthode a été structurée selon trois grandes phases : la *décomposition,* la *spatialisation* et la *fusion.* Chacune d'entre elles répond à un objectif précis. La décomposition traite

les indices de localisation saisis par le secouriste de manière à les rendre spatialisables. La spatialisation transforme ces indices en des *zones de localisation compatibles* et la fusion les regroupe, jusqu'à aboutir à une seule zone, la *zone de localisation probable* (ZLP), correspondant au résultat de la spatialisation pour l'ensemble de l'alerte traitée.

Pour permettre la prise en compte de l'imprécision des indices de localisation, nous avons construit notre méthode autour du cadre théorique de la théorie des sous-ensembles flous (Zadeh 1965). Ainsi, la phase de spatialisation crée des zones de localisation floues, c'est-à-dire dotées de limites progressives. On peut alors faire la distinction entre les positions correspondant partiellement ou totalement à l'indice de localisation spatialisé et donc modéliser leur imprécision.

La confiance du secouriste traitant l'alerte en la véracité des indices de localisation qu'il collecte a, quant à elle été modélisée à l'aide de la théorie des possibilités (Zadeh 1978). Ce cadre théorique nous permet d'attribuer un degré de confiance à chaque indice de localisation et de le répercuter sur la zone de localisation le spatialisant.

L'objectif du projet Choucas n'étant pas de proposer des solutions se substituant aux secouristes, nous avons conçu notre méthode de manière à ce qu'elle s'intègre avec peu de contraintes dans le processus métier de localisation des victimes. Celle-ci méthode est donc conçue pour que les indices de localisation qu'elle spatialise soient saisis par des humains, et non identifiés automatiquement à partir de l'appel téléphonique (ou son *verbatim* écrit) à l'aide de techniques issues du domaine du traitement automatisé des langues. Pour permettre la saisie des indices de localisation et leur spatialisation, nous avons créé, à partir de l'analyse d'un corpus d'alertes passées, une ontologie des *relations de localisation* — nommée ORL —, listant et définissant de nombreuses relations de localisation utilisées par les victimes et les secouristes pour décrire la position des victimes par rapport à des objets repères. Bien qu'elle s'inspire d'autres travaux, notamment l'ontologie GUM-Space (Bateman et al. 2010), l'ontologie des relations de localisation présente la caractéristique d'être spécifique à la description de positions en montagne, ce qui en fait une production exploitable indépendamment de notre travail de thèse, par exemple pour des travaux traitant de la question de la localisation en montagne.

L'étude des relations de localisation préalable à la construction de l'ontologie des relations de localisation nous a permis de constater l'existence de certaines récurrences sémantiques entre concepts. Nous avons proposé d'exploiter ces récurrences, de manière à faciliter la spatialisation des relations de localisations. Le principe de décomposition consiste à subdiviser une relation de localisation en plusieurs *relations de localisation atomiques,* dont la sémantique de la conjonction est équivalente à la sémantique de la relation de localisation initiale. Les relations de localisation atomiques décomposant une relation de localisation sont alors spatialisables indépendamment, puis fusionnables, de manière à obtenir la zone de localisation spatialisant la relation de localisation non décomposée.

Le rôle de la phase de décomposition est, en partie, d'effectuer cette décomposition des relations de localisation de manière à permettre leur spatialisation et celui de la phase de fusion de les combiner, de manière à obtenir la zone de localisation spatialisant la relation de localisation non décomposée. La définition des relations de localisation atomiques et les liens de décomposition les rattachant aux relations de localisation sont formalisés dans l'ontologie des relations de localisation atomiques (ORLA). Pour pouvoir spatialiser les relations de localisation atomiques, nous avons associé chacun des concepts de cette ontologie à un ensemble de concepts décrivant des méthodes qui seront appliquées lors de la spatialisation.

Une autre contribution de notre thèse est la proposition d'une méthode générique de spatialisation permettant de traduire une position décrite par une relation de localisation et un

objet ou type d'objet de référence, en une région floue correspondant à cette position. Trois concepts différents, correspondant à autant d'étapes de la spatialisation ont été définis. Le *rasteriser* transforme l'objet utilisé comme référence en un raster. Le choix du *rasteriser* permet de sélectionner la partie de l'objet qui est utilisée comme référence (centre, frontière, ensemble de l'objet). La seconde étape est celle de la construction de la *métrique*. Durant cette étape, une mesure permettant de quantifier la sémantique de la relation de localisation spatialisée est calculée pour toutes les positions de la zone étudiée à partir de l'objet de référence rasterisé. Cette métrique est ensuite utilisée pour construire une zone de localisation compatible floue lors de la dernière étape de la phase de spatialisation : la *fuzzyfication.* Un grand nombre de *rasterisers,* de *métriques* et de *fuzzyficateurs* ont été définis. Certains sont très spécifiques et ne sont employés que pour la spatialisation d'une relation de localisation particulière, mais une grande partie d'entre eux sont génériques et partagés par plusieurs relations de localisation. Ces derniers peuvent donc être réemployés pour modéliser d'autres relations de localisation, voire pour en définir des nouvelles, qui n'ont pas été définies dans ORLA, ce qui offre une grande flexibilité.

L'ensemble de la méthode a été implémentée dans un prototype, Ruitor, qui constitue également une contribution en tant qu'outil et nous a permis de confronter nos propositions théoriques à la modélisation d'alertes réelles. Cela nous a permis de mettre en évidence les qualités et les défauts de notre approche.

Les deux qualités majeures de notre méthode sont sa généricité et son évolutivité. La généricité de la méthode est principalement permise par le principe de décomposition et la réalisation de la spatialisation à l'aide de trois composants spécifiques et indépendants, le *rasterizer,* la *métrique* et le *fuzzyficateur.* La possibilité de combiner ces trois éléments pour définir un grand nombre de relations de localisation atomiques et la possibilité de combiner ces mêmes relations de localisation atomiques permet la définition d'un grand nombre de *relations de localisation.* L'évolutivité de notre méthode est, en partie, une conséquence de sa généricité. En effet, l'ajout d'un nouveau concept, comme une *métrique,* permet de définir de nombreuses nouvelles relations de localisation atomiques, ces dernières étant construites par la combinaison de concepts. L'utilisation d'une ontologie pour formaliser les liens de décomposition permet également de faciliter l'évolution de notre méthode. En effet, cette approche permet d'extraire la formalisation de la spatialisation de l'implémentation, la rendant plus facilement consultable et modifiable et facilite donc son évolution.

Perspectives

Comme l'ont montré les applications de notre méthode à des cas réels (chapitre 9), de nombreuses pistes d'évolutions sont envisageables. On peut identifier trois grandes catégories d'améliorations potentielles : celles concernant l'affinement de la paramétrisation, celles permettant d'étendre notre méthode, lui permettant de traiter plus finement des situations plus complexes, et celles qui ne pourront naître que d'une confrontation de notre méthode à l'expérience des secouristes.

Calibration de la méthode

Une première piste consiste à améliorer la paramétrisation de notre méthode. En effet, dans la situation actuelle certains paramètres, comme les valeurs de confiance associées aux seuils (chapitre 8), ont été fixés empiriquement.

C'est un problème qui se pose également pour le choix de la résolution du calcul. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 6, la représentation raster des ZLC implique de définir une résolution de maille, qui impacte la précision du résultat, mais également le temps de calcul et le volume du résultat. Pour les modélisations présentées dans le chapitre 9, où nous n'étions pas contraint par les temps de calcul, nous avons pris la décision de travailler à l'aide de la résolution la plus fine possible, compte-tenu du nombre d'objets de référence à traiter. Toutefois, cette solution n'est pas pérenne, notre méthode visant à être appliquée dans des contextes où le temps peut être limité. Nous souhaitons donc offrir aux secouristes la possibilité de paramétrer la résolution du calcul. Pour ce faire, deux solutions seraient envisageables : la première serait de laisser le secouriste fixer manuellement la maille du calcul, ce qui est déjà techniquement possible, mais non accessible pour l'utilisateur dans l'état actuel du prototype. Une seconde solution serait d'adapter automatiquement cette résolution en fonction de la zone étudiée, ce qui libérerait les secouristes de ces considérations. Cependant la mise en place de cette solution pose un autre problème : nous ne savons pas quelle est la meilleure résolution de spatialisation. Il est en effet possible que des résolutions plus faibles que celles que nous avons utilisées dans nos essais (*e.g.* 100, voire 250 m) soient satisfaisantes pour déclencher une intervention, ce que nous ne pouvons pas savoir à l'heure actuelle. Il est donc possible qu'une spatialisation à une résolution fixe et peu élevée soit satisfaisante pour la localisation d'appels. Pour évaluer l'effet de tels changements de résolution, il peut être intéressant de procéder à une analyse de sensibilité, laquelle permettrait de quantifier l'impact de tels changements sur la qualité des résultats. Cette étude pourrait être réalisée à partir d'alertes déjà étudiées, comme celles présentées au court du chapitre 9. Il nous semble également nécessaire de confronter notre méthode à de nouveaux cas et à l'avis des secouristes pour approfondir ces questions.

Le problème majeur de la calibration de la méthode est la paramétrisation des fuzzyficateurs. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 9 cette paramétrisation doit être effectuée manuellement, en fonction de considérations empiriques. Or, si l'utilisation de fuzzyficateurs spécialisés comme `orla#SupVal0` (qui permet d'attribuer un degré d'appartenance non nul aux valeurs de la métrique supérieures à zéro) ou `orla#EqVal0` (qui permet d'attribuer un degré d'appartenance non nul aux valeurs de la métriques proches de zéro) facilite l'utilisation de certaines relations de localisation (*e.g.* `orl#AltInf`), il est toujours nécessaire de fixer la valeur d'un paramètre δ. Si cette tâche n'est que peu contraignante pour l'exercice de modélisation effectué dans le chapitre 9, sachant que nous n'étions pas contraint par le temps, il nous semble difficile de demander aux secouristes de paramétrer les fuzzyficateurs durant la phase de secours.

Une première solution serait de définir un paramétrage par défaut des fuzzyficateurs, mais cette solution n'est pas envisageable, un même fuzzyficateur pouvant être couplé avec plusieurs métriques, qui ne partagent donc pas leurs unités. On peut raffiner cette solution en rattachant la paramétrisation à la relation de localisation et non plus au fuzzyficateur. Pour donner un exemple, avec cette solution toute utilisation de la relation de localisation `orl#SousAltitude` utilisera le même paramétrage implicite du fuzzyficateur `orla#InfVal0`, mais ce paramétrage pourra être différent lorsque ce fuzzyficateur est appelé par une autre relation de localisation, comme `orla#DansPlanimetrique`. Bien qu'elle soit plus satisfaisante, cette seconde solution ne règle pas tous les problèmes qui peuvent être posés par la question de la paramétrisation. Peut-on, par exemple, considérer que la relation de localisation `orl#PresDe` traduit le même ordre de grandeur lorsqu'elle s'applique à une maison ou à une ville ? Des relations de localisation comme `orl#AuxAlentoursDe` intègrent même cette notion dans leur définition. Il nous semble donc indispensable de prendre également en compte la taille, voir la saillance, de l'objet de

référence lors de la spatialisation. Les principes de décomposition et de modélisation autonome (chapitre 4) permettent, en effet, d'utiliser un paramétrage spécifique pour chaque objet de référence, ce qui permettrait d'aboutir à une modélisation beaucoup plus fine.

La définition d'une méthode de paramétrisation des fuzzyficateurs prenant en compte la nature et les caractéristiques (géométriques ou non) des objets de référence pose toutefois de nombreux problèmes scientifiques. Il est en effet nécessaire d'identifier les caractéristiques des objets impactant ces paramètres, d'identifier si le type d'objet à une influence sur ces paramètres, *etc.*

Une des pistes envisagées est de recourir à des méthodes d'apprentissage, alimentées par des données recueillies lors d'entretiens ou de sondages. On pourrait, par exemple, demander à un panel de randonneurs comment ils décriraient une position donnée. Il a même été envisagé d'organiser ce type d'études sur le terrain ou à l'aide d'un environnement en réalité virtuelle, qui permettrait aux personnes interrogées de décrire plusieurs positions. Toutes ces solutions ont leurs propres limites, mais elles offrent des pistes de réflexion intéressantes quant à la question de la paramétrisation du fuzzyficateurs.

Extension de la méthode

Différentes pistes d'amélioration de notre méthode ont été envisagées au cours de notre travail. La plus avancée d'entre elles est la décomposition des objets de référence lorsqu'ils ont un aspect composite.

Nous avons en effet remarqué que certains objets de référence utilisés par les requérants étaient « composites », c'est-à-dire qu'ils sont une composition de plusieurs parties relativement différentes. C'est par exemple le cas des lignes électriques [1], qui sont composées de pylônes et d'un câble suspendu ou des lignes de téléphérique, composées des mêmes éléments mais auxquels s'ajoutent une station d'arrivée et de départ. Le problème que soulèvent ces objets est que la sémantique ou le paramétrage des relations de localisation qui s'y appliquent peuvent changer en fonction de la partie de l'objet considérée. Par exemple, pour une ligne de téléphérique il paraît raisonnable de considérer qu'une relation de proximité a un rayon plus important si elle se rapporte aux bâtiments qu'aux pylônes ou au câble, ces derniers étant plus saillants. Autrement dit, on est plus vite loin d'un pylône que d'une gare de téléphérique. Les parties de l'objet peuvent influer le paramétrage des relations de localisation. Un exemple peut être celui d'une route contenant des ponts et des tunnels. Si un requérant décrit sa position en indiquant se trouver « sous une route », il est pertinent d'adapter le concept à la composante de l'objet. On sera `orl#SousProcheDe` une route mais `orl#SousRecouvertPar` un tunnel ou un pont. Les parties de l'objet peuvent donc influencer le choix des concepts.

La solution que nous avons envisagée pour traiter ces cas consiste à ajouter une étape à la phase de décomposition : la décomposition des objets de référence composites (chapitre 6, (Bunel et al. 2019b)). Le rôle de cette étape, qui vient après la décomposition des objets de référence non nommés, est de créer un nouvel indice de localisation pour chaque composante des objets de référence, puis d'adapter si nécessaire la relation de localisation utilisée ou son paramétrage. Cette étape permettrait une plus grande finesse lors du processus de spatialisation des indices de localisation. Cependant, elle est assez contraignante à mettre en place. Cette étape nécessite en effet la création de nouvelles informations, notamment la formalisation des liens de composition existant entre objets de référence et la formalisation de l'impact de

1. Ce cas a été présenté durant le chapitre 6.

la nature de l'objet de référence sur la relation de localisation. La généralisation de cette proposition impliquerait donc une refonte de l'ontologie des relations de localisation et des relations de localisation atomiques, mais également la création d'une nouvelle ontologie, celle des objets de référence composites.

Une seconde piste d'amélioration que nous avons déjà explorée, mais dont nous n'avons pas rendu compte dans ce mémoire, parce qu'elle n'était pas assez aboutie, est la définition d'une méthode d'évaluation de la qualité des zones de localisation construites et plus particulièrement de la zone de localisation probable. Comme les alertes étudiées dans le chapitre 9 l'ont montré, la *zone de localisation probable* produite par notre méthode peut, en fonction des indices de localisation, avoir des configurations très différentes. Elle peut par exemple être d'un bloc, ou fragmentée, comme le résultat de la spatialisation du *fil rouge.* Dans ce second cas, il est difficile de savoir dans quelle zone chercher en priorité. Une première approche est de se focaliser sur les zones dont le degré d'appartenance est le plus élevé, mais ce critère ne permet pas de distinguer toutes les zones.

Pour faciliter l'exploitation des résultats, nous avons réfléchi à mettre en place une méthode permettant de caractériser chaque fragment de la ZLP, puis de les classer de manière à faciliter l'analyse des secouristes. Pour ce faire, différentes pistes méthodologiques ont été explorées, comme la définition d'un système d'inférence flou ou d'une méthode fondée sur la théorie des fonctions de croyance (Shafer 1976) et inspirée des travaux de Olteanu (2008). Cependant, nous n'avons pas encore réussi à identifier des métriques de classifications qui soient pleinement pertinentes, ce travail doit donc encore être approfondi. Une piste d'amélioration serait d'étudier en détail, avec les secouristes les modélisations que nous avons proposées dans le chapitre 9, de manière à identifier les parties des ZLP qui leur semblent les plus pertinentes, puis de chercher à identifier des métriques permettant d'approcher informatiquement cette évaluation.

Un autre point que nous souhaiterions aborder est la prise en compte de l'incomplétude des données. À l'heure actuelle, notre méthode ne permet pas d'éviter les faux négatifs liés à l'absence d'une instance dans la base de données utilisée. Ainsi, si un requérant indique être situé a proximité d'un objet de référence, mais que ce dernier n'existe pas dans la base de données utilisée, sa position sera simplement ignorée. Il est donc nécessaire de travailler à la mise en place d'une solution permettant d'éviter ce type d'erreur.

Une autre perspective d'amélioration serait de proposer de nouvelles relations de localisation adaptées aux besoins métier. Le chapitre 9, et plus particulièrement la modélisation du *fil rouge,* nous ont permis de constater que certains indices très spécifiques, comme « la victime entend des voitures » ou « le téléphone de la victime est connectée à une antenne téléphonique donnée », n'étaient pas correctement modélisés avec les relations de localisation que nous avions identifiées. Nous proposons donc de compléter l'ontologie des relations de localisation spécifiquement dédiées à la modélisation de ce type d'indices. Le choix de l'implémentation de nouvelles relations de localisation devra cependant être discuté avec les principaux utilisateurs de notre méthode : les secouristes.

Une dernière possibilité d'extension que nous envisageons pour ce travail, serait d'étendre notre méthode pour qu'elle puisse traiter des objets de référence imprécis. Comme l'ont montré certains indices de localisation traités dans le chapitre 9, la représentation géométrique de certains objets de référence, notamment les formes du relief, peut être sommaire. Des objets très fréquents, comme les *combes,* les *pas* ou les *vallées* peuvent, par exemple, être représentés par des points. Or il s'agit d'objets foncièrement imprécis, qu'il serait pertinent de modéliser comme tels. Cependant cela nécessite de pouvoir construire une base de données géographique

floue, mais également que notre méthode soit à même de travailler à partir de ces objets. La mise en place d'une telle possibilité nécessiterait d'importantes modifications dans le fonctionnement de la phase de spatialisation et plus particulièrement dans le calcul de la métrique, qui doit être adaptée au cas flou. Cette dernière perspective est probablement la plus complexe à mettre en place. Cependant nous sommes persuadé qu'il s'agit d'une évolution pertinente, voire nécessaire.

Annexes

Annexe A

Légende du fond de carte topographique

Cette annexe détaille les figurés utilisés pour le fond topographique des cartes des résultats des modélisations floues.

Voirie :

Autoroute

Nationale

Départementale

Autre

Sentier

Hydrographie :

Surface eau permanente

Surface eau

Cours d'eau

Cours d'eau intermittant

Végétation :

Forêt

Forêt ouverte

Bati :

Bati

Énergie :

Lignes électriques

Annexe B

Définition des *relations de localisation* dans l'ontologie ORL

Cette annexe présente la définition de l'ensemble des *relations de localisation* définies dans l'ontologie ORL. Par souci de lisibilité, seules les classes non abstraites sont représentées et les concepts ne sont pas préfixés par le nom de l'ontologie. Les définitions et exemples sont directement extraits de l'ontologie, mais quelques corrections ont pu y être apportées. Tous les exemples présentés proviennent des alertes retranscrites. Les concepts sans exemple n'ont pas été utilisés dans les alertes.

`ADistanceQuantitativeRelativeDe` : La *cible* est située à une certaine distance du *site*. Cette distance est quantitative et est exprimée par une métrique dépendant du *site* (*e.g.* « À un pâté de maisons »). Il n'y a pas de contrainte sur la dimension de la distance, elle peut être *planimétrique, altimétrique* ou les deux.

> *« [Il] est à une longueur en dessous [du dos d'âne], donc à une petite longueur du haut du couloir de la Meije »*

`ADistanceTempsDe` : La *cible* est à une certaine distance du *site*. Cette distance est exprimée en temps de parcours. Il est par conséquent nécessaire de connaître le mode de déplacement ou la vitesse de déplacement.

`ADroiteDe` : La *cible* est à droite du *site*. Ce concept nécessite de connaître l'orientation de la *cible*.

> *« [...] sur la droite quand on regarde vers le haut de la station. »*

`ALEstDe` : La *cible* se situe globalement à l'est du *site*, sans préciser si elle est dans la partie est du *site* ou disjointe et à l'est du *site*.

`ALEstDeExterne` : La *cible* est disjointe (⇒ `HorsDePlanimetrique`) et se situe globalement à l'est du *site* (⇒ `AEstDe`).

`ALExtremiteDe` : Le *site* est de forme allongée (il a alors deux extrémités), ou possède une ou plusieurs parties saillantes allongées (il peut alors avoir plusieurs extrémités). La *cible* est située au niveau (⇒ `ProcheDe`) l'une de ces extrémités. Elle peut être située à l'intérieur du *site*, ou non.

> *« Il est à l'extrémité ouest d'une espèce de terrasse en béton. »*

`AGaucheDe` : La *cible* est à gauche du *site*. Ce concept nécessite de connaître l'orientation de la *cible*.

> *« Juste sur la gauche, il y a une autre dent. Je ne sais pas comment elle s'appelle. »*

`ALaFrontiereDe` : Le *site* a une emprise spatiale linéaire ou surfacique. La *cible* est « proche » de ses frontières. La *cible* peut indifféremment se situer à l'intérieur (⇒ `DansPlanimétrique`) ou à l'extérieur du *site* (⇒ `HorsDePlanimétrique`). Si elle est à l'intérieur, elle est alors dans le complémentaire de la zone de l'espace qui vérifie la relation `AuMilieuDe`. La distance à considérer dépend très probablement de la nature ou de la taille du *site*.

> *« Je suis un peu à la sortie de la forêt. »*

`ALaMemeAltitudeQue` : La *cible* est située à la même altitude que le *site*. Le *site* peut être une altitude absolue ou un objet dont l'altitude sert de référence.

> *« C'est à 2300 mètres d'altitude. »*

`ALOuestDe` : La *cible* se situe globalement à l'ouest du *site*, sans préciser si elle en est à l'intérieur ou à l'extérieur.

« […] et là on est à l'ouest. »

`ALOuestDeExterne` : La *cible* se situe globalement à l'ouest (⇒ `AOuestDe`) et est disjointe du site (⇒ `HorsDePlanimetrique`).

« On est versant ouest, côté Vercors intérieur. »

`ApresJalonSurItineraire` : La *cible* est située sur un itinéraire (⇒ `SitueSurItineraireOuReseauSupport`), et après le *site,* qui est un jalon de cet itinéraire. Cela suppose d'avoir défini un référentiel des directions associé à l'itinéraire, généralement lié au sens de progression (l'avant est vers la destination, l'arrière vers l'origine).

« Après le parking de la Villette. »

`ATempsDeMarcheDe` : La *cible* est à tel temps de marche du *site,* en marchant depuis le *site* vers la *cible.*

« On est à 10 minutes du sommet de la Bastille. »

`AuDessusALAplombDe` : La *cible* est à une altitude supérieure à celle du *site* et le *site* est plus ou moins situé sur la ligne de plus grande pente qui passe par la *cible,* ou inversement. Typiquement, *site* et *cible* appartiennent à une même vallée et sont situés à peu près au même niveau longitudinalement.

`AuDessusAltitude` : La *cible* a une altitude supérieure au *site.* La distance entre le *site* est la *cible* n'est pas contraignante.

« Au-dessus de Percolin, y'a la cabane du berger de Bellefont et on est 50 mètres au-dessus. »

`AuDessusProche` : La *cible* est proche et a une altitude supérieure au site.

« Juste au-dessus de Bernin. »

`AuDessusDeJalonSurItineraire` : La *cible* est au-dessus du *site* et sur un chemin menant au site (⇒ `SitueSurItineraireOuReseauSupport`).

« […] Sur le sentier qui mène à la cascade de l'Oursière, haut dessus de la cascade de l'Oursière. »

`AuMilieuDe` : Le *site* a une emprise spatiale linéaire ou surfacique. La *cible* est située à l'intérieur du *site* (⇒ `DansPlanimetrique`), suffisamment loin de ses frontières pour qu'on ne puisse pas considérer qu'elle en est au bord.

`AuNordDe` : La *cible* se situe globalement au nord du *site,* sans préciser si elle en est à l'intérieur ou à l'extérieur.

`AuNordDeExterne` : La *cible* se situe globalement au nord et est disjointe du *site.*

« […] non, côté Nord (du Pas de la Ville), pardon. »

`AuSudDe` : La *cible* se situe globalement au sud du site, sans préciser si elle en est à l'intérieur ou à l'extérieur.

`AuSudDeExterne` : La *cible* se situe globalement au sud et est disjointe du *site.*

« Je suis entre le Grand Veymont et Pas de la Ville, tout à fait, coté sud. »

`AuxAlentoursDe` : La *cible* est suffisamment proche du *site* pour qu'on puisse considérer que le *site* est un point de repère qui a un sens, mais potentiellement suffisamment loin pour qu'on ne puisse pas considérer qu'on est nécessairement dans le cas `Proximal` ou `PresDe`. La proximité qui pourrait s'en déduire est généralement dépendante d'un « rayonnement » qui pourrait êtrre affecté au *site* (lié à sa renommée, à sa taille typiquement pour un lieu habité, à sa saillance, *etc.*). Il peut y avoir connexion topologique entre la *cible* et le *site,* ou non.

« Dans le massif de la Chartreuse »

`AvantJalonSurItineraire` : La *cible* est située sur un itinéraire (⇒ `SitueSurItineraireOuReseauSupport`) et avant le *site* qui en est un jalon. Cela suppose d'avoir défini un référentiel des directions associé à l'itinéraire, généralement lié au sens de progression sur l'itinéraire.

`AvoirASaDroite` : La *cible* est munie d'un référentiel des directions intrinsèque : elle a une gauche et une droite (et un avant, un arrière). Dans ce référentiel des directions, et plus précisément sur l'axe gauche-droite de ce référentiel, le *site* est situé à droite de la *cible* (donc la *cible* a le site à sa *droite,* au sens commun de l'expression).

`AvoirASaGauche` : La *cible* est munie d'un référentiel des directions intrinsèque : elle a une gauche et une droite (et un avant, un arrière). Dans ce référentiel des directions, et plus précisément sur

l'axe gauche-droite de ce référentiel, le site est situé à gauche de la cible (donc la *cible* a le *site* à sa gauche, au sens commun de l'expression).

`AvoirDerriereSoit` : La cible est munie d'un référentiel des directions intrinsèque : elle a un avant et un arrière, (et une gauche, une droite). Dans ce référentiel des directions, et plus précisément sur l'axe avant-arrière de ce référentiel, le site est situé derrière la cible (donc la cible a le site derrière elle, au sens commun de l'expression).

`AvoirDevantSoit` : La *cible* est munie d'un référentiel des directions intrinsèque : elle a un avant et un arrière, (et une gauche, une droite), par exemple parce que c'est un être animé muni d'un visage. Dans ce référentiel des directions, et plus précisément sur l'axe avant-arrière de ce référentiel, le *site* est situé devant la *cible* (donc la *cible* a le *site* devant elle, au sens commun de l'expression).

> *« Devant moi j'ai la plaine, et à gauche j'ai quand même des sapins. »*

`CibleVoitSite` : Le *site* est visible depuis la *cible*.

> *« Je suis vraiment en montagne, je vois les plaines, je vois un grand découvert devant moi. »*

`DansLaDirectionDeXDepuisY` : Cette relation de localisation nécessite deux *sites* : X qui fixe la direction et Y qui donne le point d'origine de cette direction. Cette relation de localisation indique que la *cible* est située quelque part « sur un cheminement entre X et Y ». Cette relation diffère de `EntreXetY` pour deux raisons : (1) il y a une tolérance au dépassement dans l'axe du segment $[XY]$, à une extrémité ou à l'autre, pour tenir compte des éventuels détours nécessaires selon le support du cheminement (espace homogène *vs* muni d'un réseau, etc.) ; (2) dans la direction orthogonale à l'axe $[XY]$, la *cible* est a priori davantage susceptible d'être éloignée du segment à l'aplomb du milieu de celui-ci qu'à ses extrémités

`DansLaPartieBasseDe` : La *cible* est située dans la partie basse du *site*.

`DansLaPartieDeXLaPlusProcheDeY` : Le *site* 1 (X) est un surfacique (en 2,5D) le *site* 2 (Y) est situé en dehors du *site* 1 et permet de délimiter une portion du *site* 1 qui est « la partie la plus proche » du *site* 2. La *cible* est alors située dans le *site* 1 (`DansPlanimétrique`), dans cette « partie la plus proche » du *site* 2.

> *« Dans la Combe de la Glière côté télésiège. »*

`DansLaPartieEstDe` : La *cible* se situe dans le *site* et dans sa partie est.

`DansLaPartieHauteDe` : La *cible* est située dans la partie haute du *site*. Cela suppose de pouvoir définir une « partie haute » du *site*.

`DansLaPartieNordDe` : La *cible* se situe dans le *site* et dans sa partie nord.

`DansLaPartieOuestDe` : La *cible* se situe dans le *site* et dans sa partie ouest.

> *« Il est à l'extrémité ouest d'une espèce de terrasse en béton. »*

`DansLaPartieSudDe` : La *cible* se situe dans le *site* et dans se partie sud.

`DansPlanimetrique` : La *cible* est située dans l'espace 2,5 D délimité par le *site,* qui est donc considéré comme délimitant une région sur la surface terrestre. Cette relation de localisation est mutuellement exclusive avec `HorsDePlanimetrique`, mais n'en est pas le complémentaire (cf. `ALaFrontiereDe`, qui est compatible avec `HorsDePlanimetrique`, avec `DansPlanimetrique`, ou avec une situation ou ni l'un ni l'autre ne s'applique).

> *« Non, on est en forêt. »*

`DeAutreCoteDeXParRapportAY` : La *cible* est de l'autre côté du *site* X par rapport au *site* Y. Autrement dit, la *cible* et le *site* Y sont de part et d'autre du *site* X. C'est une situation opposée à `DuMemeCoteQueParRapportA`, où la *cible* et le *site* X sont situés du même côté du *site* Y. Comme pour la relation `DuMemeCoteQueParRapportA`, cela suppose qu'on peut partitionner l'espace en deux zones appelées les deux « côtés » du *site* X. Selon la forme et la nature du *site* X (et son contexte spatial) : (1) soit le *site* X a intrinsèquement deux côtés (un col, une crête, une rivière, une ville située sur une rivière, *etc.*), (2) soit, pour deux *sites* assimilables à des ponctuels et sans contexte spatial particulier, c'est le couple (*site* X, *site* Y) qui permet de définir deux côtés au *site* X : un côté qui contient le *site* X, et un côté qui ne le contient pas. Typiquement, la limite est alors la perpendiculaire au segment joignant le *site* X au *site* Y, passant par le *site* X.

> *« Les rochers de l'homme, vous descendiez de l'autre côté plutôt ? »*

`ADistanceQuantitativePlanimetrique` : La *cible* est à telle distance du *site*, exprimée dans une unité de longueur (et non un temps de marche ou d'accès). La distance considérée est planimétrique.

> *« J'estime [que je suis] à 800 m [du Pas de la Ville], je crois, à peu près, à vol d'oiseau »*

`DuMemeCoteQueXParRapportAY` : La *cible* située du même côté que le *site X*, par rapport au *site Y*. Cela suppose qu'on peut partitionner l'espace en deux zones appelées les deux « côtés » du *site Y*. Selon la forme et la nature du *site Y* (et son contexte spatial) : (1) soit le *site Y* a intrinsèquement deux côtés (un col, une crète, une rivière, une ville située sur une rivière, *etc.*), (2) soit, pour deux *sites* assimilables à des ponctuels et sans contexte spatial particulier, c'est le couple (*site X*, *site Y*) qui permet de définir deux côtés au *site Y* : un côté qui contient le *site X*, et un côté qui ne le contient pas. Typiquement, la limite est alors la perpendiculaire au segment joignant le *site X* au *site Y* et passant par le *site Y*. Cette relation est l'exact opposé de `DeLAutreCoteDeParRapportA`.

> *« C'est côté lac Robert. »*

`EntreXetY` : Relation ternaire, nécessitant deux *sites*. La *cible* est située entre les deux *sites*. Le cadre de référence est particulièrement important ici. Il faudra le modéliser pour pouvoir spatialiser cette relation. Par exemple, si les deux *sites* peuvent être considérés comme de faible extension spatiale (donc assimilables à des ponctuels), le cadre de référence peut inclure un ou plusieurs tracés à une dimension qui relient les deux *sites* : tracé d'un itinéraire, *etc.* (ou une ligne droite en l'absence d'information). Si l'extension spatiale est plus importante, on peut définir une zone « entre les deux » comme dans le modèle 5IM (Clementini et al. 2006). Mais attention aux cas déictiques comme « je vois *Z* entre *X* et *Y* » ou « nagez entre les deux poteaux » de (Bateman et al. 2010).

> *« Là on est dans le secteur entre […] Cordéac et Pellafol. »*

`HorsDePlanimetrique` : La *cible* est située en dehors de l'espace 2,5 D délimité par le *site,* qui est donc considéré comme délimitant une région sur la surface terrestre. Cette relation de localisation est mutuellement exclusive avec `DansPlanimetrique`, mais n'en est pas le complémentaire.

`PresDe` : La *cible* est « proche » du *site* (distance qualitative, forcément subjective), mais pas dans le *site* (la relation de localisation `DansPlanimetrique` n'est pas valide) si ce dernier a une emprise non ponctuelle. Par ailleurs, la situation se différencie de la situation `Proximal` par la distance qui peut être un peu plus grande, et par l'absence de relation fonctionnelle. Enfin, `DansPlanimetrique` implique `PresDe` mais l'inverse n'est pas vrai.

> *« Il était près du sommet et dans le brouillard. »*

`Proximal` : La *cible* est dans le *site* ou à sa proximité immédiate, qui peut être une proximité fonctionnelle.

> *« Elle est à 50 mètres, je suis sur un promontoire car le réseau ne passait pas. »*

`SiteVoitCible` : Le *site* voit la *cible* (vision active). La position de la *cible* est visible depuis une autre position connue (*e.g.* un refuge depuis lequel un témoin contacte les secours).

`SitueSurItineraireOuReseauSupport` : La *cible* se situe sur un réseau ou un itinéraire. Le « sur » a ici un sens fonctionnel. Le *site* peut être un élément de réseau au sens large : réseau parcourable à pied, réseau de pistes de ski, voies d'escalade ou d'alpinisme, réseau hydrographique (*e.g.* en kayak ou canyoning), itinéraire de ski de randonnée, *etc.* Aucun a priori n'est considéré sur la modélisation géométrique du réseau dans les données. Il n'y a pas nécessairement de connexion topologique entre la *cible* et le *site* : la *cible* peut se trouver de fait légèrement éloignée de l'élément de réseau (*e.g.* cas d'une aire de pique-nique accesible depuis le réseau de randonnée pédestre).

> *« On est sur le GR 54. »*

`SousALAplombDe` : La *cible* est à une altitude supérieure à celle du *site* et ce dernier est plus ou moins situé sur la ligne de plus grande pente qui passe par la *cible,* ou inversement. Typiquement, le *site* et la *cible* appartiennent à une même vallée et sont situés à peu près au même niveau longitudinalement.

`SousAltitude` : La *cible* a une altitude inférieure à celle du *site.* Sa distance au site n'est pas contrainte.

> *« Je pense pas qu'ils soient passés par les vires en dessous. »*

`SousJalonSurItineraire` : La *cible* est située sur un chemin menant au *site* et sous ce dernier.

« On est sous le déversoir du lac de Belledonne. »

`SousProcheDe :` La *cible* est proche et a une altitude inférieure au *site*.

« On est à 100 mètres ou 150 mètres, ou 200 mètres du col, vraiment juste en dessous. »

`SousRecouvertPar :` La *cible* est sous le *site* et elle est recouverte par ce dernier.

« […] un mec [est] coincé sous un arbre. »

Annexe C

Retranscription de l'alerte : *Grand Veymont*

Avec R. le requérant, S. le secouriste.

S. : Oui bonjour vous êtes avec le secours en montagne.

R. : Oui bonjour, [anonymisation]. Je suis accompagnateur en montagne et… hum… Une victime qui a la maladie de [coupé]… Je savais pas… Bref… Là elle est un peu au bout de ses forces, et… [*Inaudible*] hélicoptère, et elle me dit « oui… », enfin vraiment je le sens pas. J'ai eu du mal à faire, entre le sommet du Grand Veymont et là où je suis…

S. : [*Parle en même temps*] Vous êtes où ?

R. : … La descente est très, très lente, et là…

S. : [*Parle en même temps*] Vous êtes entre le Grand Veymont et le Pas de la ville ?

R. : Je suis entre le Grand Veymont, sous le Grand Veymont et Pas de la Ville, tout à fait. Je suis côté… côté sud donc, hein…

S. : Heu… côté sud du Pas de la Ville ?

R. : Excusez-moi, non, côté nord. Au temps pour moi, côté nord, pardon. C'est moi qui…

S. : Vous êtes au-delà du Pas de la ville alors ? Vous êtes entre Pas de la ville et Pierre blanche ?

R. : Tout à fait, je suis au-delà du Pas de la ville, sur la zone… la zone à peu près plate, caillouteuse, mais plate. Y'a une petite prairie…

S. : Vous êtes à combien… À combien du Pas de la ville ?

R. : Heu… J'estime… Heu… en kilomètres… Heu… Peut-être… Heu… J'estime à… Je sais pas… 800 mètres, je crois, à peu près… à vol d'oiseau…

S. : Ouais, ouais, OK.

R. : Voilà

S. : D'accord. Vous êtes un groupe de combien ? [*Enregistrement coupé*]

Références

Aitken, Robert (1977). « Wilderness Areas in Scotland ». Thèse de doct. University of Aberdeen (cf. p. 94).

Alker, Sandra, Joy, Victoria, Roberts, Peter et Smith, Nathan (2000). « The Definition of Brownfield ». Anglais. In : *Journal of Environmental Planning and Management* 43.1, p. 49-69. doi : 10.1080/09640560010766 (cf. p. 54).

Arabacioglu, Burcin Cem (2010). « Using fuzzy inference system for architectural space analysis ». Anglais. In : *Applied Soft Computing* 10.3, p. 926-937. doi : 10.1016/j.asoc.2009.10.011 (cf. p. 42, 50, 77 sq.).

ARCEP (2019). *Baromètre du numérique 2019*. Rapp. tech. Conseil Général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies(CGE),l'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP) et l'Agence du numérique, p. 250 (cf. p. 23).

Aurnague, Michel et Vieu, Laure (1993). « A three-level approch to the semantics of space ». Anglais. In : *The Semantics of Prepositions. From Mental Processing to Natural Language Processing*. Sous la dir. de Cornelia Zelinsky-Wibbelt. Berlin : de de Gruyter, Walter (cf. p. 38, 81).

Aurnague, Michel, Vieu, Laure et Borillo, Andrée (1997). « Représentation formelle des concepts spatiaux dans la langue ». In : *Langage et cognition spatiale*. Sous la dir. de Michel Denis. Paris : Masson, p. 69-102 (cf. p. 38, 80, 87, 133).

Bachelard, Gaston (1934). *La formation de l'esprit scientifique*. 5e éd. Paris : Vrin. 257 p. (cf. p. 27).

Ballu, Yves (1997). *Naufrage au mont Blanc. L'affaire Vincendon et Henry*. Glénat (cf. p. 12 sq.).

Bard, Sylvain, Bouchon-Meunier, Bernadette, Ruas, Anne et Detyniecki, Marcin (2003). « Gestion des connaissances imprécises pour évaluer la généralisation cartographique ». In : *Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications*. Rencontres francophones sur la logique floue et ses applications (Tours, 26 nov. 2003). Sous la dir. de Carl Frélicot. Tours, p. 89-96 (cf. p. 79).

Bateman, John, Hois, Joana, Ross, Robert et Tenbrink, Thora (2010). « A linguistic ontology of space for natural language processing ». Anglais. In : *Artificial Intelligence* 174.14, p. 1027-1071. doi : 10.1016/j.artint.2010.05.008 (cf. p. 38, 60, 77, 80-86, 138 sqq., 286, 300).

Batton-Hubert, Mireille et Pinet, François (2019). « Formalisms and Representations of Imperfect Geographic Objects ». Anglais. In : *Geographic Data Imperfection 1 : From Theory to Applications*. Sous la dir. de Mireille Batton-Hubert, Éric Desjardin et François Pinet. Wiley. Chap. 5, p. 73-105. doi : 10.1002/9781119507284.ch5 (cf. p. 51).

Bejaoui, Lotfi (2009). « Qualitative topological relationships for objects with possibly vague shapes : implications on the specification of topological integrity constraints in transactional spatial databases and in spatial data warehouses ». Anglais. Thèse de doct. Université Blaise Pascal, Université Laval. 150 p. (cf. p. 71).

Bejaoui, Lotfi, Pinet, François, Bedard, Yvan. et Schneider, Michel (2009). « Qualified topological relations between spatial objects with possible vague shape ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 23.7, p. 877-921. doi : 10.1080/13658810802022814 (cf. p. 70 sqq., 148).

Bennett, Brandon (1994). « Modal logics for qualitative spatial reasoning ». In : *Bulletin of the IGPL* (cf. p. 87).

– (2001). « What is a Forest ? On the Vagueness of Certain Geographic Concepts ». Anglais. In : *Topoi* 20.2, p. 189-201. doi : 10.1023/a:1017965025666 (cf. p. 54).

Berli, Justin, Bunel, Mattia et Ducruet, César (2018). « Sea-Land Interdependence in the Global Maritime Network : the Case of Australian Port Cities ». In : *Networks and Spatial Economics*. doi : 10.1007/s11067-018-9403-4 (cf. p. 91).

Bloch, Isabelle (1996). « Fuzzy relative position between objects in images : a morphological approach ». In : *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*. T. 2, p. 987-990 (cf. p. 38, 42, 77, 146, 149, 253).

– (2013). « Fuzzy Models of Spatial Relations,Application to Spatial Reasoning. A Hommage to Lotfi Zadeh ». Anglais. In : *On Fuzziness*. Sous la dir. de Rudolf Seising, Enric Trillas, Claudio Moraga et Settimo Termini. T. 1. Chap. 8 (cf. p. 85).

Boillot, Floriane (2017). *Secours en montagne : un partenariat original*. url : https://www.interieur.gouv.fr/fr/Archives/Archives-des-dossiers/2017-Dossiers/La-Haute-Savoie/Secours-en-montagne-un-partenariat-original (cf. p. 18).

Borillo, Andrée (1998). *L'espace et son expression en français*. Paris : Ophrys (cf. p. 38, 77, 79 sq., 83 sqq., 91, 110, 133, 137).

Bouchon-Meunier, Bernadette (1995). *La logique floue et ses applications*. Paris : Addison-Wesley France (cf. p. 41, 43, 51 sq., 54, 61, 63-66, 196 sq., 201 sq., 205).

– (2007). *La logique floue*. Que sais-je ? 2702. Paris : Presses universitaires de France (cf. p. 41, 43, 52, 54, 61, 63 sq., 66 sq., 73, 193, 195, 201 sqq., 205).

Brandtberg, Tomas (2002). « Individual tree-based species classification in high spatial resolution aerial images of forests using fuzzy sets ». Anglais. In : *Fuzzy Sets and Systems* 132.3, p. 371-387. doi : 10.1016/s0165-0114(02)00049-0 (cf. p. 42, 78).

Brennetot, Arnaud et Ruffray, Sophie de (2014). « Découper la France en régions ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography* (cf. p. 55).

Bresenham, Jack (1965). « Algorithm for computer control of a digital plotter ». In : *IBM Systems Journal* 4.1. doi : 10.1147/sj.41.0025, (cf. p. 169).

Brunet, Roger (2001). *Le déchiffrement du monde*. Belin (cf. p. 55).

Brunet, Roger, Ferra, Robert et Théry, Hervé (1992). *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*. Montpellier : GIP RECLUS/La Documentation française (cf. p. 10, 52, 55, 69).

Brunet, Roger, François, Jean-Christophe et Grasland, Claude (1997). « La discontinuité en géographie : origines et problèmes de recherche [Entretien de Claude Graslan et Jean-Christophe François] ». In : *L'espace géographique* 26.4, p. 297-308. doi : 10.3406/spgeo.1997.1096 (cf. p. 55).

Bucher, Bénédicte, Falquer, G., Clementini, Eliseo et Sester, M. (2012). « Towards a typology of spatial relations and properties for urban applications ». In : *Proceedings of 3u3d2012 : Usage, Usability, and Utility of 3D City Models*. doi : 10.1051/3u3d/20120201 (cf. p. 84).

Bunel, Mattia (2020). « Un état de l'art sur l'imprécision spatiale et sa modélisation ». In : *Cybergéo*. à paraitre (cf. p. 42, 56 sq., 59, 62, 72-75, 77 sq.).

Bunel, Mattia, Bahoken, Françoise, Ducruet, César, Lagesse, Claire, Marnot, Bruno, Mermet, Éric et Petit, Séléna (2018). « Geovisualizing the sail-to-steam transition through vessel movement data ». In : *Advances in Shipping Data Analysis and Modeling*. Sous la dir. de Ducruet C. Routledge Studies in Transport Analysis. Routledge (cf. p. 91).

Bunel, Mattia, Duchêne, Cécile, Olteanu-Raimond, Ana-Maria, Villanova-Oliver, Marlène, Bonhoure, Grégoire et Jouan, Tiphaine (2019a). « An approach for identifying and analysing reference features and spatial relations used in mountain emergency calls ». In : *International Cartographic Conference*. T. 2. Proceedings of International Cartographic Conference. Tokyo, Japan, p. 1-8. doi : 10.5194/ica-proc-2-12-2019 (cf. p. 50, 133, 137).

Bunel, Mattia et Ducruet, César (2017a). « Geo-visualizing global maritime flows over long time : preliminary results from the Geoseastems portal ». In : *Ateliers Mondis-Geovisu*. Toulouse, France (cf. p. 222).

– (2017b). « The contribution of geomatics to the maritime networks studies : from conception to developmentof a geoportal ». In : *Journées du GIS d'Histoire & Sciences de la mer*. Marzagalli, Silvia. Nice, France (cf. p. 222).

Bunel, Mattia, Olteanu-Raimond, Ana-Maria et Duchêne, Cécile (2019b). « Objets et relations spatiales composites et prise en compte du vague pour interpréter un référencement spatial indirect ». Anglais. In : *Revue Internationale de Géomatique* 29.1, p. 81-106. doi : 10.3166/rig.2019.00075 (cf. p. 111, 150, 157, 289).

Burrough, Peter et Couclelis, Helen (1996a). « Practical Consequences of Distinguishing Crisp Geographic Objects ». In : *Geographics Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough. .7. Taylor et Francis, p. 335-337 (cf. p. 50).

Burrough, Peter et Frank, Andrew (1996b). *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Anglais. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. CRC PR INC. 345 p. (cf. p. 54, 68).

Caille, Frédéric (2016). *Amitié et dévouement : une histoire des Sauveteurs Volontaires du Salève*. Bref article en lien avec une conférence grand public, paru dans la Revue municipale de Collonges-sous-Salève (Hte-Savoie), hiver 2016. (cf. p. 11).

Campari, Irene (1996). « Uncertain Boundaries in Urban Space ». In : *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough. Taylor et Francis. Chap. 4, p. 57-69 (cf. p. 54).

Carlson, Laura et Covey, Eric (2005). « How far is near ? Inferring distance from spatial descriptions ». Anglais. In : *Language and Cognitive Processes* 20.5, p. 617-631. doi : 10.1080/01690960400023501 (cf. p. 38).

Carniel, Anderson Chaves, Ciferru, Ricardo Rodrigues et Aguiar Ciferri, Cristina Dutra de (2016). « Handling Fuzzy Points and Fuzzy Lines using the FuzzyGeometry Abstract Data Type ». Anglais. In : *Journal of Information and Data Management* 7.1, p. 33-51 (cf. p. 69, 73, 75).

Castanedo, Frederico (2013). « A Review of Data Fusion Techniques ». Anglais. In : *The Scientific World Journal*. doi : 10.1155/2013/704504 (cf. p. 44).

Centre Fédéral de Documentation Lucien Devies (2020). *Un historique du Secours en montagne jusqu'en 1972*. Club Alpin français. url : http://centrefederaldedocumentation.ffcam.fr/secoursenmontagne.html (visité le 19/05/2020) (cf. p. 11-14).

Chandellier, Antoine (2016). *L'épopée du secours en montagne*. Veurey : le Dauphiné Libéré (cf. p. 13).

Charre, Joël (1995). *Statistiques et Territoires*. GIP Reclus (cf. p. 76).

Chaudhry, Omair et Mackaness, William (2008). « Creating Mountains out of Mole Hills : Automatic Identification of Hills and Ranges Using Morphometric Analysis ». Anglais. In : *Transactions in GIS* 12.5, p. 567-589. doi : 10.1111/j.1467-9671.2008.01116.x (cf. p. 54).

Choucas (2020). *Projet Choucas : site Web*. url : http://choucas.ign.fr (cf. p. 26).

Clementini, Eliseo (2005). « A model for uncertain lines ». Anglais. In : *Journal of Visual Languages & Computing* 16.4, p. 271-288. doi : 10.1016/j.jvlc.2004.11.003 (cf. p. 71).

– (2008). « Objects with Broad Boundaries ». Anglais. In : *Encyclopedia of GIS*. Sous la dir. de Shashi Shekhar et Hui Xiong. Avec une préf. de Brian Berry et Michel Goodchild. 1 t. New York : Springer, p. 793-798 (cf. p. 58, 69, 71).

– (2013). « Directional relations and frames of reference ». Anglais. In : *GeoInformatica* 17.2, p. 235-255. doi : 10.1007/s10707-011-0147-2 (cf. p. 80 sq.).

Clementini, Eliseo et Billen, Roland (2006). « Modeling and computing ternary projective relations between regions ». In : *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 18* (cf. p. 97, 300).

Clementini, Eliseo et Felice, Paolino di (1996). « An Algebraic model for Spatial Objets with Indeterminate Boundaries ». Anglais. In : *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. London : Taylor. Chap. 11, p. 155-169 (cf. p. 42, 70 sq., 74, 148).

Clementini, Eliseo, Felice, Paolino di et Oosterom, Peter van (1993). « A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction ». Anglais. In : *Advances in Spatial Databases*. International Symposium on Spatial Databases. Sous la dir. de David Abel et Beng Chin Ooi. Springer Berlin Heidelberg. doi : 10.1007/3-540-56869-7_16 (cf. p. 89 sq.).

Clementini, Eliseo et Laurini, Robert (2008). « Un cadre conceptuel pour modéliser les relations spatiales ». In : *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information* 17.1 (cf. p. 84).

Cohn, Anthony, Bennett, Brandon, Gooday, John et Gotts, Nicholas (1997). « Qualitative Spatial Representation and Reasoning with the Region Connection Calculus ». In : *GeoInformatica* (cf. p. 87 sq.).

Cohn, Anthony et Gotts, M (1996). « The 'egg-yolk' representation of regions with indeterminate boundaries ». Anglais. In : Burrough, Peter et Frank, Andrew. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. CRC PR INC. Chap. 1, p. 3-28 (cf. p. 42, 70 sq., 74, 148).

Collins, John et Varzi, Achille (2000). « Unsharpenable Vagueness ». In : *Philosophical Topics* 28.1, p. 1-10 (cf. p. 42, 55).

Conrad, Olaf, Bechtel, Benjamin, Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, Volker et Böhner, Jüergen (2015). « System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 ». In : *Geoscientific Model Development* 8.7. doi : 10.5194/gmd-8-1991-2015 (cf. p. 257).

Contributeurs Wikipédia (2020a). *Expédition italienne au K2 de 1954*. url : https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9dition_italienne_au_K2_de_1954 (visité le 27/05/2020) (cf. p. 12).

– (2020b). *Face ouest des Drus*. url : https://fr.wikipedia.org/wiki/Face_ouest_des_Drus (visité le 20/05/2020) (cf. p. 12).

– (2020c). *Guide de haute montagne*. url : https://fr.wikipedia.org/wiki/Guide_de_haute_montagne (visité le 20/05/2020) (cf. p. 10).

Couclelis, Helen (1992). « People Manipulate Objects (but Cultivate Fields) : Beyond the Raster-Vector Debate in GIS ». Anglais. In : *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*. Sous la dir. d'Andrew Frank, Irene Campari et Ubaldo Formentini. T. 639. Lecture Notes in Computer Science. Springer. Chap. 3, p. 65-77. doi : 10.1007/3-540-55966-3_3 (cf. p. 70).

– (1996). « Towards an operational typology of geographic entities with ill-defined boundaries ». In : *Geographic objects with indeterminate boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. Chap. 3, p. 45-56 (cf. p. 54).

Cross, Valerie et Firat, Aykut (2000). « Fuzzy objects for geographical information systems ». Anglais. In : *Fuzzy Sets and Systems* 113.1, p. 19-36. doi : 10.1016/s0165-0114(99)00010-x (cf. p. 79).

Dasiopoulou, Stamatia, Mezaris, Vasileios, Kompatsiaris, Ioannis et Papastahis, Vasileios (2005). « Knowledge-assisted semantic video object detection ». In : *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* (cf. p. 86).

De la Losa, Arnaud (2000). « Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques ». Thèse de doct. Université de Marne-la-Vallée (cf. p. 90).

Derungs, Curdin et Purves, Ross (2016). « Mining nearness relations from an n-grams Web corpus in geographical space ». In : *Spatial Cognition & Computation* (cf. p. 93).

Descamps, Philippe (2018). « Dernier de cordée ». In : *Le Monde diplomatique* (cf. p. 10, 13).

Devies, Lucien (1946). *L'organisation des secours en montagne en France*. In : *La Montagne. revue mensuelle du Club alpin français*. Sous la dir. de Maurice Paillon. T. 11. Club Alpin Français, p. 67-70 (cf. p. 11 sq.).

Devillers, Rodolphe, Desjardin, Éric et Runz, Cyril de (2019). « Imperfection of Geographic Information : Concepts and Terminologies ». Anglais. In : *Geographic Data Imperfection 1 : From Theory to Applications*. Sous la dir. de Mireille Batton-Hubert, Éric Desjardin et François Pinet. Chap. 2, p. 11-24. doi : 10.1002/9781119507284.ch2 (cf. p. 51, 54).

Didelon, Clarisse, Ruffray, Sophie de, Boquet, Mathias et Lambert, Nicolas (2009). « Un monde d'iterstices. Apport de la logique floue pour l'analyse des cartes interprétatives ». In : *CFC* 209, p. 71-82 (cf. p. 42).

– (2011). « A World of Interstices : A Fuzzy Logic Approach to the Analysis of Interpretative Maps ». In : *The Cartographic Journal* 48.2, p. 100-107. doi : 10.1179/1743277411Y.0000000009 (cf. p. 42, 55).

Dijkstra, Edsger (1959). « A note on two problems in connexion with graphs ». In : *Numerische Mathematik* 1, p. 269-271 (cf. p. 91 sq.).

Dilo, Areti (2006). « Representation of and reasoning with vagueness in spatial information : A system for handling vague objects ». Anglais. Thèse de doct. Wageningen University (cf. p. 54, 72).

Dilo, Arta, By, Rolf de et Stein, Alfred (2007). « A system of types and operators for handling vague spatial objects ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 21.4, p. 397-426. doi : 10.1080/13658810601037096 (cf. p. 72, 74 sq., 149).

Dittrich, André, Vasardani, Maria, Winter, Stephan, Baldwin, Timothy et Liu, Fei (2015). « A Classification Schema for Fast Disambiguation of Spatial Prepositions ». Anglais. In : *Proceedings of the 6th ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming*. 6th ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming (IWGS15). Sous la dir. de Farnoush Banaei–Kashani, Chengyang Zhang et Abdeltawab Hendawi. Bellevue : ACM Press, p. 78-86. doi : 10.1145/2833165.2833167 (cf. p. 38).

Du, Shihong, Wang, Xiaonan, Feng, Chen-Chieh et Zhang, Xiuyuan (2016). « Classifying natural-language spatial relation terms with random forest algorithm ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 31.3, p. 542-568. doi : 10.1080/13658816.2016.1212356 (cf. p. 38).

Duchêne, Cécile (2004). « The CartACom model : a generalisation model for taking relational constraints into account ». In : *8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (cf. p. 82).

Duchêne, Cécile, Olteanu-Raimond, Ana-Maria, Bunel, Mattia et Brasebin, Mickael (2019). *État de l'art sur les relations de localisation. Livrable 3.2.1.* Rapp. scient. ANR Choucas (cf. p. 37, 80 sq., 83, 85-88, 93, 96, 98).

Ďuračiová, Renata et Chalachanová, Jana Faixová (2017). « Fuzzy Spatio-Temporal Querying the PostgreSQL/PostGIS Database for Multiple Criteria Decision Making ». Anglais. In : *Dynamics in GIscience*. Sous la dir. d'Igor Ivan, Jiří Horák et Tomáš Inspektor. Berlin : Springer International Publishing, p. 81-97. doi : 10.1007/978-3-319-61297-3_7 (cf. p. 78, 149).

Durand, Jacques (1961). « L'attraction des nombres ronds et ses conséquences économiques ». In : *Revue française de sociologie* 2.3 (cf. p. 92).

Dutozia, Jérôme, Emsellem, Karine et Voiron-Canicio, Christine (2014). « Théorie des ensembles flous et science géographique : trois champs d'application, des pistes de convergence ». In : *Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications*. Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (oct. 2014). Cargèse, p. 33-41 (cf. p. 50, 55).

Dutton, Geoffrey (1992). « Handling Positional Uncertainty in Spatial Databases ». Anglais. In : *Proceedings 5th International Symposium on Spatial Data Handling*. T. 2, p. 460-469 (cf. p. 58, 60).

Egenhofer, Max (1989). « A formal definition of binary topological relationships ». englush. In : *Foundations of Data Organization and Algorithms*. International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms. Sous la dir. de Witold Litwin et Hans-Jörg Schek. Springer Berlin Heidelberg, p. 457-472. doi : https://doi.org/10.1007/3-540-51295-0_148 (cf. p. 88).

Egenhofer, Max et Franzosa, Robert (1991a). « Point-set topological spatial relations ». Anglais. In : *International journal ofgeographical information systems* 5.2, p. 161-174. doi : https://doi.org/10.1080/02693799108927841 (cf. p. 88).

Egenhofer, Max, Giudice, Nicholas, Moratz, Reinhard et Worboys, Michael, éd. (2011). *Spatial Information Theory. 10th International Conference COSIT 2011*. Anglais. Avec une préf. de Max Egenhofer, Nicholas Giudice, Reinhard Worboys et Moratz Mike. Springer. doi : 10.1007/978-3-642-23196-4 (cf. p. 90).

Egenhofer, Max et Herring, John (1990). « A mathematical framework for the definition of topological relations ». Anglais. In : *Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handing*. International Symposium on Spatial Data Handing. Zurich, p. 803-813. doi : 10.1080/02693799108927841 (cf. p. 69, 88).

– (1991b). *Categorizing binary topological relations between regions, lines and pointsin geographic databases, the 9-intersection : Formalism and its Use for Naturallanguage SpatialPredicates*. Rapp. tech. Department of Surveying Engineering, University of Maine (cf. p. 89).

Egenhofer, Max et Mark, David (1995). « Naive Geography ». Anglais. In : *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*. International Conference on Spatial Information

Theory (COSIT). Semmering : Springer Berlin Heidelberg, p. 1-15. DOI : 10.1007/3-540-60392-1_1 (cf. p. 37, 87, 91, 93).

ELIE, Antoine et BALMAIN, Olivier (2006). *Historique du groupement hélicoptère sécurité civile en montagne*. URL : http://helicomontage.fr/Securite_civile.html (visité le 19/05/2020) (cf. p. 13).

ERWIG, Martin et SCHNEIDER, Markus (1997). « Vague regions ». Anglais. In : *Advances in Spatial Databases*. Sous la dir. d'Oliver GÜNTHER et Hans-Jörg SCHEK. Berlin : Springer, p. 298-320. DOI : 10.1007/3-540-63238-7_36 (cf. p. 54, 69, 71).

ESRI (2020). *Créer des zones de desserte*. Sous la dir. d'ESRI. URL : https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/ready-to-use/itemdesc-generate-service-areas.htm (visité le 29/06/2020) (cf. p. 93).

EVANS, Andrew et WATERS, Tim (2008). « Mapping vernacular geography : web-based GIS tools for capturing "fuzzy" or "vague" entities ». In : *International Journal of Technology, Policy and Management* 7.2, p. 134-150 (cf. p. 60).

FEN-CHONG, Julie (2012). « Organisation spatio-temporelle des mobilités révélées par la téléphonie mobile en Ile-de-France ». Thèse de doct. Université Panthéon-Sorbonne — Paris I (cf. p. 22).

FISHER, Peter (1991). « First Experiments in Viewshed Uncertainty : The accuracy of the Viewshed Area ». In : *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57 (cf. p. 177).

– (1992). « First Experiments in Viewshed Uncertainty : Simulating Fuzzy Viewshed ». In : *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58 (cf. p. 177).

– (2000). « Sorites paradox and vague geographies ». In : *Fuzzy Sets and Systems* 113.1. DOI : 10.1016/S0165-0114(99)00009-3 (cf. p. 40).

– (2003). « Models of uncertainty in spatial data ». In : *Geographical Information system* 1, p. 191-203 (cf. p. 69).

FISHER, Peter, COMBER, Alexis et WADSWORTH, Richard (2006). « Approaches to Uncertainty in Spatial Data ». Anglais. In : *Fundamentals of Spatial Data Quality*. Sous la dir. de Rodolphe DEVILLERS et Robert JEANSOULIN. ISTE Ltd. Chap. 3, p. 43-59 (cf. p. 51, 54, 69).

FISHER, Peter, COMBER, Lex et WADSWORTH, Richard (2005). « Nature de l'incertitude pour les données spatiales ». In : *Qualité de l'information géographique*. Sous la dir. de Rodolphe DEVILLERS et Robert JEANSOULIN. .49-64 (cf. p. 69).

FISHER, Peter et WOOD, Jo (1988). « What is a Mountain ? Or the Englishman who went up a Boolean Geographical Concept but Realised it was Fuzzy ». In : *Geography* 83.3 (cf. p. 55).

FOLLIN, Jean-Michel, GIRRES, Jean-François, OLTEANU-RAIMOND, Ana-Maria et SHEEREN, David (2019). « The Origins of Imperfection in Geographic Data ». Anglais. In : *Geographic Data Imperfection 1 : From Theory to Applications*. Sous la dir. de Mireille BATTON-HUBERT, Éric DESJARDIN et François PINET. Chap. 3. DOI : 10.1002/9781119507284.ch3 (cf. p. 60 sq.).

FONTE, Cidália Costa et LODWICK, Weldon (2005). « Modelling the Fuzzy Spatial Extent of Geographical Entities ». Anglais. In : *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems*. Springer, p. 121-142. DOI : 10.1007/3-540-26886-3_6 (cf. p. 78).

FRANK, Andrew (1992). « Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space ». Anglais. In : *Journal of Visual Languages & Computing* 3.4, p. 343-371. DOI : 10.1016/1045-926x(92)90007-9 (cf. p. 96 sq.).

FREGE, Gottlob (1879). *Begriffsschrift. Eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*. Allemand (cf. p. 40).

Frege, Gottlob (1882). « Über die wissenschaftliche Berechtigung einer Begriffsschrift ». Allemand. In : *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik* 81 (cf. p. 40).
– (1999). *L'idéographie*. Avec des comment. de Corine Besson. Paris : Vrin (cf. p. 40).
– (2019). « On the Scientific Justification of a Concept Script ». Anglais. Avec des comment. d'Andreas Keller et Tina Forsee. In : *Borderless Philosophy* 2 (cf. p. 40).
Freksa, Christian et Barkowsky, Thomas (1996). « On the relations between Spatial Concepts and Geographics Objects ». In : *Geographics Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough. Chap. 8, p. 109-121 (cf. p. 58, 60).
Freksa, Christian, Ven, Jasper van de et Wolter, Diedrich (2018). « Formal representation of qualitative direction ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science*, p. 1-21. doi : 10.1080/13658816.2017.1420794 (cf. p. 38).
Gacôgne, Louis (1997). *Éléments de logique floue*. Hermes (cf. p. 68).
Gaffuri, Julien, Duchêne, Cécile et Ruas, Anne (2008). « Object-field relationships modelling in an agent-based generalisation model ». In : *12th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (cf. p. 82).
Gale, Stephen (1972). « Inexactness, Fuzzy Sets, and the Foundations of Behavioral Geography ». Anglais. In : *Geographical Analysis* 4.4, p. 337-349. doi : 10.1111/j.1538-4632.1972.tb00480.x (cf. p. 55).
– (1976). « A Resolution of the regionalization Problem and Its Implications for Political Geography and Sociale Justice ». Anglais. In : *Geografiska Annaler* 58.1, p. 1-16 (cf. p. 41, 55).
Ganser, Hayez, Geoffroy, Uguen, Carpentier, Rogue et Martin (2012). *Organisation du secours en montagne et de la surveillance des plages*. Rapp. tech. Cours des comptes (cf. p. 13).
Gauchon, Christophe (2014). « Frédérique Novat, Arthur Novat, Laurent Belluard, Plans des pistes, les domaines skiables de France dessinés par Pierre Novat ». In : *Revue de géographie alpine* (cf. p. 21).
Gauer, Louis-Marie et Parant, Max (2019). *Géoréférencement de quadrillages de plans des pistes de stations de ski pour aider les secours en montagne*. Rapport de projet d'intiation à la recherche. ENSG, IGN (cf. p. 21).
GDAL/OGR contributors (2020). *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*. Sous la dir. d'Open Source Geospatial Foundation. Open Source Geospatial Foundation (cf. p. 169, 223).
Gillies, Sean (2020a). *The Fiona User Manual* (cf. p. 223).
– (2020b). *The Shapely User Manual* (cf. p. 223).
Goodchild, Michael (1992). « Geographical Data Modeling ». In : *Computers & Geosciences* 18.4, p. 401-408 (cf. p. 70).
Google (2019). *EENA Emergency Location Information Technology – Google*. url : https://about.google/intl/ALL_fr/stories/location-information-emergency-technology/ (cf. p. 22).
Gottwald, Siegfried (2020). « Many-Valued Logic ». Anglais. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. Zalta. Summer 2020. Metaphysics Research Lab, Stanford University (cf. p. 194).
GRASS Development Team (2020). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 7.8*. Open Source Geospatial Foundation (cf. p. 94, 257).

GRIOT, Chloé (2007). « Vulnérabilité et transport de matières dangereuses :une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile ». In : *Cybergeo*. DOI : 10.4000/cybergeo.5995 (cf. p. 42, 77 sq.).

GRUBER, Thomas (1993). « Translation Approach to Portable Ontology Specifications ». In : *Knowledge Acquisition* (cf. p. 85 sq.).

GÜTING, Ralf Hartmut et SCHNEIDER, Markus (1995). « Realm-based spatial data types : The ROSE algebra ». Anglais. In : *The International Journal on Very Large Data Bases* 4.2, p. 243-286. DOI : 10.1007/BF01237921 (cf. p. 71).

HADZILACOS, Thanasis (1996). « On Layer-based Systems for Undetermined Boundaries ». In : *Geographic objects with indeterminate boundaries*. Sous la dir. de Peter BURROUGH et Andrew FRANK. Chap. 16 (cf. p. 60).

HÁJEK, Alan (2019). « Interpretations of Probability ». Anglais. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. ZALTA. Fall 2019. Metaphysics Research Lab, Stanford University (cf. p. 43).

HALILALI, Meriem, GOUARDERES, Éric, DEVIN, Florent et GAIO, Mauro (2018). « Plateforme logicielle pour l'intégration et la composition de services géospatiaux ». In : *Sageo 2018* (cf. p. 30).

HALL, Mark, JONES, Christopher et SMART, Philip (2015). « Spatial Natural Language Generation for Location Description in Photo Captions ». Anglais. In : *Spatial Information Theory*. International Conference on Spatial Information Theory (COSIT). Santa-Fe, p. 196-223. DOI : 10.1007/978-3-319-23374-1_10 (cf. p. 38).

HALLE, Caroline et ALBASINI, François (2007). « Organisation des secours en montagne ». In : *Médecine d'urgence*. DOI : 10.1016/S0000-0000(07)41572-8 (cf. p. 13 sq., 18).

HART, Peter, NILSSON, Nils et BERTRAM, Raphael (1968). « A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths ». In : *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. T. 4. 2 (cf. p. 91 sq.).

HORN, Laurence (2018). « Contradiction ». In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (cf. p. 194).

HORNSBY, Kathleen Stewart et LI, Naicong (2009). « Conceptual Framework for Modeling Dynamic Paths from Natural Language Expressions ». Anglais. In : *Transactions in GIS* 13, p. 27-45. DOI : 10.1111/j.1467-9671.2009.01153.x (cf. p. 38).

HOUPERT, Sylvain (2003). « Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain : développement et application du logiciel SVR ». Thèse de doct. Université de Nantes (cf. p. 98).

HUDELOT, Céline, ATIF, Jamal et BLOCH, Isabelle (2008a). « FSRO : une ontologie de relations spatiales flous pour l'interprétation d'images ». In : *Revue Nouvelles Technologies de l'Information* 14, p. 53-84 (cf. p. 38, 83, 85 sq.).

– (2008b). « Fuzzy spatial relation ontology for image interpretation ». Anglais. In : *Fuzzy Sets and Systems* 159.15, p. 1929-1951. DOI : 10.1016/j.fss.2008.02.011 (cf. p. 38, 42).

HYDE, Dominic et RAFFMAN, Diana (2018). « Sorites Paradox ». Anglais. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. ZALTA. Summer 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University (cf. p. 40).

IGN (2020a). *BD ALTI 2.0 : Descriptif de contenu* (cf. p. 225).

– (2020b). *BD TOPO 3.0 : Desciptif de contenu* (cf. p. 225, 270).

IMHOF, E. (1950). *Gelände und Karte*. (Cf. p. 95).

IRMISCHER, Ian et CLARKE, Keith (2017). « Measuring and modeling the speed of human navigation ». In : *Cartography and Geographic Information Science* (cf. p. 95 sq.).

Isli, Amar et Cohn, Anthony (2000). « A new approach to cyclic ordering of 2D orientations using ternary relation algebras ». In : *Artificial Intelligence* (cf. p. 98).

Jaara, Kusay, Duchêne, Cécile et Ruas, Anne (2012). « A model for preserving the consistency between topographic and thematic layers throughout data migration. » In : *15th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (cf. p. 82).

Jones, Christopher et Purves, Ross (2007). « Geographical information retrieval ». In : *International Journal of Geographical Information Science*. doi : 10.1080/13658810701626343 (cf. p. 50).

Kanjilal, Virupaksha, Liu, Hechen et Schneider, Markus (2010). « Plateau Regions : An Implementation Concept for Fuzzy Regions in Spatial Databases and GIS ». Anglais. In : *Computational Intelligence for Knowledge-Based Systems Design*. Springer Berlin Heidelberg, p. 624-633. doi : 10.1007/978-3-642-14049-5_64 (cf. p. 72-75, 149).

Kerouanton, Colin (2020). « Analyse spatio-temporelle des mobilités de randonneurs dans le PNR du Massif des Bauges ». Thèse de doct. Université Grenoble-Alpes (cf. p. 95 sq.).

Klir, George et Yuan, Bo (1995). *Fuzzy Sets & Fuzzy Logic. Theory and Applications*. Anglais. Addison-Wesley. 592 p. (cf. p. 63, 193).

Kracht, Marcus (2002). « On the Semantics of Locatives ». Anglais. In : *Linguistics and Philosophy* 25.2, p. 157-232. doi : 10.1023/a:1014646826099 (cf. p. 38).

Kuiper, Benjamin et Levitt, Tod (1988). « Navigation and Mapping in Large Scale Space ». In : *AI Magazine* (cf. p. 85).

Kurtener, Dmitry et Badenko, Vladimir (2000). « A GIS methodological framework based on fuzzy sets theory for land use management ». Anglais. In : *Journal of the Brazilian Computer Society* 6.3, p. 26-32 (cf. p. 77).

La Porte, Xavier de (2017). *De la belle inexactitude des plans de pistes de ski*. url : https://www.nouvelobs.com/rue89/sur-le-radar/20170217.OBS5431/de-la-belle-inexactitude-des-plans-de-pistes-de-ski.html (cf. p. 21).

Lafond, Marc (2011a). *Historique de l'Hélitreuillage (1ère époque)*. url : http://www.sdsm38.fr/page.php?id=40 (visité le 19/05/2020) (cf. p. 14).

– (2011b). *Historique de l'Hélitreuillage (2ème époque)*. url : http://www.sdsm38.fr/page.php?id=64 (visité le 19/05/2020) (cf. p. 13).

– (p. d.). *Quelques dates marquant l'évolution du Groupement Hélicoptère*. url : http://www.sdsm38.fr/page.php?al=histsm (visité le 19/05/2020) (cf. p. 13).

Lagacherie, P., Andrieux, P. et Bouzigues, R. (1996). « Fuzziness and Uncertainty of Soil Boundaries : From Reality to Coding in GIS ». Anglais. In : *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. London. Chap. 18, p. 275-286 (cf. p. 52, 54, 58).

Lagesse, Claire, Bonnin, Philippe, Bordin, Patricia et Douady, Stéphane (2016). « Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris ». In : *Flux* 105.3 (cf. p. 92).

Lamy, Jean-Baptiste (2017). « Owlready : Ontology-oriented programming in Python withautomatic classification and highlevel constructs for biomedical ontologies ». In : *Artificial Intelligence In Medicine* 80 (cf. p. 223).

Lang, Ewald, Carstensen, Kai-Uwe et Simmons, Geoff (1991). *Modeling Spatial Knowledge on a Linguistic Basis. Theory-Prototype-Integration*. Anglais. Lecture Notes in Computer Science (cf. p. 38).

Langmuir, Eric (1984). *Mountaincraft and Leadership. A Handbook for Mountaineers and Hillwalking Leaders in the British Isles*. Anglais. 4e éd. Mountain Training England & Mountain Training Scotland (cf. p. 94, 96).

– (2013). *Mountaincraft and Leadership. Official Handbook of the Mountain Leader Training Boards of Great Britain and Northern Ireland*. Anglais. 1re éd. Scottish Sports Council (cf. p. 94 sqq.).

Le Ber, Florence, Lieber, Jean et Napoli, Amedeo (2006). « Les systèmes à base de connaissances ». In : *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information*. Vuibert (cf. p. 110).

Leopold, Jennifer, Sabharwal, Chaman et Ward, Katrina (2015). « Spatial relations between 3D objects : The association between natural language, topology, and metrics ». Anglais. In : *Journal of Visual Languages & Computing* 27, p. 29-37. doi : 10.1016/j.jvlc.2014.11.008 (cf. p. 88).

Leung, Yee (1979). « Location choice : a fuzzy set approach ». In : *Geography Bulletin* 15 (cf. p. 41, 55).

– (1987). « On the Imprecision of Boundaries ». In : *Geographical Analysis* 19.2 (cf. p. 55).

Lévy, Jacques et Lussault, Michel (2013). *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*. Paris : La Documentation Française (cf. p. 55).

Liu, Yu, Yuan, Yihong et Gao, Song (2019). « Modeling the Vagueness of Areal Geographic Objects : A Categorization System ». In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8.7, p. 306. doi : 10.3390/ijgi8070306 (cf. p. 60 sq., 76).

Lonergan, Chris et Hedley, Nick (2014). « Unpacking isovists : a framework for 3D spatial visibility analysis ». In : *Cartography and Geographic Information Science* (cf. p. 99).

Louwsma, Jildou, Zlatanova, Sisi, Lammeren, Ron van et Oosterom, Peter van (2006). « Specifying and Implementing Constraints in GIS—with Examples from a Geo-Virtual Reality System ». In : *GeoInformatica*. doi : 10.1007/s10707-006-0345-5 (cf. p. 85).

Łukasiewicz, Jan (1910). « Sur le principe de contradiction chez Aristote ». In : *Rue Descartes* 2.1, p. 9-32 (cf. p. 196).

Magne, Bruno (2017). « Où s'applique la gratuité des secours en montagne ? » In : *Magazine sapeurs-pompiers de France* 1101 (cf. p. 14).

Makropoulos, C. K., Butler, D. et Maksimovic, C. (2003). « Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management ». Anglais. In : *Journal of Water Resources Planning and Management* 129.1, p. 69-77. doi : 10.1061/(asce)0733-9496(2003)129:1(69) (cf. p. 42, 77 sq.).

Mapbox (2020). *The Rasterio manual* (cf. p. 223 sq.).

Mark, David et Csillag, Ferenc (1989). « The Nature Of Boundaries On 'Area-Class' Maps ». Anglais. In : *Cartographica : The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 26.1, p. 65-78. doi : 10.3138/d235-3262-062x-4472 (cf. p. 58).

Mark, David, Freksa, Christian, Hirtle, Stephen, Lloyd, Robert et Tversky, Barbara (1999). « Cognitive models of geographical space ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 13.8, p. 747-774. doi : 10.1080/136588199241003 (cf. p. 38).

Mathet, Yann (2000). « Etude de l'expression en langue de l'espace et du deplacement : analyse linguistique, modelisation cognitive, et leur experimentation informatique ». Thèse de doct. Cean : Université de Caen. 328 p. (cf. p. 38, 80).

Matsakis, P., Wawrzyniak, L. et Ni, J. (2010). « Relative positions in words : a system that builds descriptions around Allen relations ». Anglais. In : *International Journal of*

Geographical Information Science 24.1, p. 1-23. DOI : 10.1080/13658810802270587 (cf. p. 38).

MEDAD, Amine, GAIO, Mauro et MUSTIERE, Sébastien (2018). « Appariement automatique de données hétérogènes : textes, traces GPS et ressources géographiques ». In : *Sageo 2018*. Montpellier, France (cf. p. 28).

MÉZIN, Florent (2016). *Saint Bernard au secours de montagnards égarés*. In : *Ordre, sécurité et secours en montagne. Police et territoire (XIXe–XXIe siècles)*. Sous la dir. d'Aurélien LIGNEREUX. Montagne et innovation. Presses universitaires de Grenoble. Chap. 7, p. 123-140 (cf. p. 10 sq., 13).

MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR (2013). *1972 - Les patients anglais se souviennent*. URL : https://www.interieur.gouv.fr/Archives/Archives-des-dossiers/2013-Dossiers/1972-Les-patients-anglais-se-souviennent (visité le 19/05/2020) (cf. p. 14).

MIRON, Alina, GENSEL, Jérôme et MARTIN, Marlène Villanova-Oliver andHervé (2007). « Relations spatiales qualitatives dans les ontologies géographiques avec ONTOAST ». In : *Presented at the Spatial Analysis and Geomatics* (cf. p. 86).

MOLLARET, Raymond (1993). « Secours en montagne hier et aujourd'hui ». In : *La Montagne et Alpinisme : revue du Club alpin français et du Groupe de haute montagne* (cf. p. 11 sq.).

– (2016). *Une grosse opération SDSM et la première intervention des CRS en Montagne !* URL : http://www.sdsm38.fr/page.php?id=257 (visité le 19/05/2020) (cf. p. 13).

MONCLA, Ludovic et GAIO, Mauro (2019). « Services Web pour l'annotation sémantique d'information spatiale à partir de corpus textuels ». In : *Revue Internationale de Géomatique* 28.4, p. 439-459. DOI : 10.3166/rig.2018.00066 (cf. p. 28).

MOREAU, Aurélien, PIVERT, Olivier et SMITS, Grégory (2018). « Fuzzy Query By Example ». Anglais. In : *SAC 2018 - The 33rd ACM/SIGAPP Symposium On Applied Computing*. SAC 2018. Pau. DOI : 10.1145/3167132.3167208 (cf. p. 78).

MOULIN, Bernard, CHAKER, Walid, PERRON, Jimmy, PELLETIER, Patrick, EDOUARD, Gbei et HOGAN, Jimmy (2003). « MAGS Project : Multi-Agent GeoSimulation and Crowd Simulation ». In : *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science. Proceedings of COSIT 2003*. Sous la dir. de Werner KUHN, Michael WORBOYS et Sabine TIMPF. Springer (cf. p. 93).

MUSCAT, Aurélie et FAVRE, Olivier (2015). « GENDLOC : Une géolocalisation simple et rapide ». In : *Gend'info* (381), p. 39 (cf. p. 22 sq.).

NAISMITH, William (1892). « Excursions. Cruach Ardran, Stobinian, and Ben More ». Anglais. In : *Scottish Mountaineering Club Journal* 2.3, p. 136 (cf. p. 93 sq.).

NISKANEN, Vesa (1989). « Introduction to imprecise reasoning, uncertainty, decision making and knowledge engineering ». Anglais. In : *Publications of the Society for Artificial Intelligence in Finland* 1 (cf. p. 41).

ODD AMBROSETTI, Miriam (1987). « L'analisi dei sistemi in geographia ». Italien. In : *Aspetti e problemi della geografia*. Sous la dir. de Giacomo CORNA-PELLEGRINI (cf. p. 54 sq.).

OLTEANU, Ana-Maria (2008). « Fusion de connaissances imparfaites pour l'appariement de données géographiques. Proposition d'une approche s'appuyant sur la théorie des fonctions de croyance ». Thèse de doct. Université Paris-Est. 268 p. (cf. p. 42, 45, 290).

OLTEANU-RAIMOND, Ana-Maria, COURONNÉ, Thomas, FEN-CHONG, Julie et SMOREDA, Zbigniew (2012). « Le Paris des visiteurs étrangers, qu'en disent les téléphones mobiles ? Inférence des pratiques spatiales et fréquentations des sites touristiques en Île-de-France ». In : *Revue Internationale de Géomatique* 22.3, p. 413-437. DOI : 10.3166/rig.22.413-437 (cf. p. 22).

Olteanu-Raimond, Ana-Maria, Duchêne, Cécile, Mustière, Sébastien, Van Damme, Marie-Dominique, Domingués, Catherine, Gaio, Mauro, Villanova-Oliver, Marlène, Davoine, Paule-Anick, Genoud, Philippe et Favre, Olivier (2017). *Livrable 0.4 : Définition fil rouge*. Rapp. scient. Projet Choucas (cf. p. 25 sq.).

Pailhous, Jean (1970). *Représentation de l'espace urbain et cheminements : l'exemple du chaiffeur de taxi*. Paris : Presses universitaires de France (cf. p. 92).

Pawlak, Zdzisław (1982). « Rough sets ». In : *International Journal of Computer and Information Sciences* 11 (cf. p. 41, 68, 148).

– (1991). *Rough Sets : Theoricals Aspects of Reasoning about Data*. Kluwer. 252 p. (cf. p. 41).

Perec, Georges (1974). *Espèces d'espaces*. Galilée. 2000 p. (cf. p. 50, 54).

Peuquet, Donna et Ci-Xiang, Zhan (1987). « An algorithm to determine the directional relationship between arbitrarily-shaped polygons in the plane ». In : *Pattern Recognition* (cf. p. 96).

Pipkin, John (1978). « Fuzzy sets and spatial choice ». In : *Anals of the association of american geographers* 68.2 (cf. p. 55).

Pustejovsky, James (2017). « ISO-Space : Annotating Static and Dynamic Spatial Information ». In : *Handbook of Linguistic Annotation*. Sous la dir. de Nancy Ide et James Pustejovsky. Dordrecht : Springer Netherlands. doi : https://doi.org/10.1007/978-94-024-0881-2_37 (cf. p. 82-85).

Ramos, Fabien (2003). « Universitéde Marne-la-Vallée ». Thèse de doct. Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel (cf. p. 99).

Randell, David, Cui, Zhan et Cohn, Anthony (1992). « A Spatial Logic based on Regions and Connection. » In : *Principles of Knowledge Representation and Reasoning* (cf. p. 87 sq.).

Randell, David, Witkowski, M et Shanahan, M. (2001). « From Images to Bodies : Modelling and Exploiting Spatial Occlusion and Motion Parallax. » In : *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2001)* (cf. p. 99).

Rees, Gareth (2004). « Least-cost paths in mountainous terrain ». Anglais. In : *Computers & Geosciences* 30.3. doi : 10.1016/j.cageo.2003.11.001 (cf. p. 95 sq.).

Renz, Jochen et Mitra, Debasis (2004). « Qualitative Direction Calculi with Arbitrary Granularity ». In : *PRICAI 2004 : PRICAI 2004 : Trends in Artificial Intelligence* (cf. p. 97).

Retz-Schmidt, Gudula (1988). « Various Views on Spatial Prepositions ». Anglais. In : *AI Magazine* 9.2 (cf. p. 79 sq.).

Robbins, Royal (2000). *Standing on the Shoulders : A Tribute to my Heroes*. In : *Voices from the Summit : The World's Great Mountaineers on the Future of Climbing*. Sous la dir. de Bernadette McDonald et John Amatt. Banff Centre for Mountain Culture (cf. p. 12).

Robinson, Vincent (2003). « A Perspective on the Fundamentals of Fuzzy Sets and their Use in Geographic Information Systems ». In : *Transactions in GIS* 7.1, p. 3-30. doi : 10.1111/1467-9671.00127 (cf. p. 55).

Rocourt, France (2014). « Histoire et évolution du secours en montagne ». In : *Urgences 2014*. Urgences 2014. Société Française de Médecine d'Urgence (cf. p. 14).

Rolland-May, Christiane (1984). « Les espaces géographiques flous ». Thèse de doct. Université de Metz (cf. p. 55).

– (1987). « La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie ». In : *L'Espace Géographique* 16.1, p. 42-50. doi : 10.3406/spgeo.1987.4184 (cf. p. 55).

– (1996). « Régionalisation d'espaces géographiques imprécis et incertains définis par des variables qualitatives ». In : *Revue Géographique de l'Est* 36.3, p. 213-241. doi : 10.3406/rgest.1996.2314 (cf. p. 55).

Rolland-May, Christiane (2003). « Limites, discontinuités, continu : le paradoxe du flou ». In : *L'information géographique* 67.1, p. 1-20. doi : 10.3406/ingeo.2003.2872 (cf. p. 55).

Romanaz, Sylvaine (2018). « L'histoire du dimanche... 1948, deux alpinistes piégés, 100 pour les sauver ». In : *Le Dauphiné Libéré* (cf. p. 11).

Ruffray, Sophie de et Hamez, Grégory (2009). « La dimension sociale de la cohésion territoriale ». In : *L'Espace Géographique* 38.4, p. 328. doi : 10.3917/eg.384.0328 (cf. p. 55).

Runz, Cyril de (2008). « Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique ». Thèse de doct. Reins : Université de Reims - Champagne Ardenne (cf. p. 42, 73 sq., 156).

Runz, Cyril de, Blanchard, Frédéric, Desjardin, Éric et Herbin, Michel (2008). « Fouilles archéologiques : à la recherche d'éléments représentatifs ». In : *Atelier Fouille de données complexes*. Conférence Extraction et Gestion des Connaissances 2008 (Sophia-Antipolis, 2008). Sophia Antipolis, p. 95-103 (cf. p. 73).

Russell, Bertrand (1923). « Vagueness ». In : *The Australasian Journal of Psychology and Philosophy*, p. 84-92. doi : 10.1080/00048402308540623 (cf. p. 40, 51 sq., 54).

Sahraoui, Yohan, Vuidel, Gilles, Foltête, Jean-Christophe et Joly, Daniel (2016). « PixScape – un outil logiciel intégré pour l'analyse du paysage visible ». In : *Cybergeo* (cf. p. 98).

Santos, Paulo, Ligozat, Gérad et Safi-Samghabad, Marjan (2015). « An Occlusion Calculus Based on an Interval Algebra ». In : *2015 Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)* (cf. p. 99).

Sarjakoski, Tapani (1996). « How Many Lakes, Islands and Rivers are there in Finland ? » In : *Geographics Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough. Taylor et Francis. Chap. 20, p. 299-312 (cf. p. 52).

Schlieder, Christoph (1995). « Reasoning about ordering ». In : *COSIT 1995 : Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS* (cf. p. 98).

Schneider, Markus (1996). « Modelling spatial objects with undetermined boundaries using the Realm/ROSE approch ». Anglais. In : *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. Sous la dir. de Peter Burrough et Andrew Frank. London, p. 141-152 (cf. p. 42, 71, 75).

– (1999). « Uncertainty Management for Spatial Data in Databases : Fuzzy Spatial Data Types ». Anglais. In : *Advances in Spatial Databases*. SSD. Sous la dir. de Ralf Hartmut Güting, Dimitris Papadias et Fred Lochovsky. Hong Kong : Springer Berlin Heidelberg, p. 330-351 (cf. p. 42, 58, 71, 73).

– (2001). « A Design of Topological Predicates for Complex Crisp and Fuzzy Regions ». Anglais. In : *Conceptual Modeling*. Sous la dir. d'Hideko Kunii, Sushil Jajodia et Arne Sølvberg. Springer Berlin Heidelberg, p. 103-116. doi : 10.1007/3-540-45581-7_10 (cf. p. 54, 69, 71).

– (2003). « Design and implementation of finite resolution crisp and fuzzy spatial objects ». Anglais. In : *Data & Knowledge Engineering* 44.1, p. 81-108. doi : 10.1016/S0169-023X(02)00131-3 (cf. p. 54, 70, 75).

– (2004). « Fuzzy Spatial Data Types and Predicates : Their Definition and Integration into Query Languages ». Anglais. In : *Spatio-Temporal Databases*. Sous la dir. de Rita de Caluwe, Guy de Tré et Gloria Bordogna. Springer Berlin Heidelberg, p. 265-293. doi : 10.1007/978-3-662-09968-1_12 (cf. p. 72).

– (2008). « Fuzzy spatial data types for spatial uncertainty management in databases ». In : *Handbook of research on fuzzy information processing in databases*. Sous la dir. de José Galindo. IGI Global, p. 490-515 (cf. p. 69).

Shafer, Glenn (1976). *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press (cf. p. 41, 45, 201, 290).

Simons, Peter (1999). « Does the Sun Exist ? The Problem of Vague Objects ». Anglais. In : *Proceedings of the XX World Congress of Philosophy*. World Congress of Philosophy. Sous la dir. de Jaakko Hintikka, Robert Neville, Ernest Sosa et Alan Olson. T. 2. Melbourne Beach, Florida, p. 89-97 (cf. p. 54).

Skubic, Marjorie, Perzanowski, Dennis, Blisard, Samuel, Schultz, Alan, Adams, William, Bugajska, Magda et Brock, Derek (2004). « Spatial Language for Human–Robot Dialogs ». Anglais. In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 34.2, p. 154-167. doi : 10.1109/tsmcc.2004.826273 (cf. p. 38).

Smith, Barry (1995). « On Drawing Lines on a Map ». In : *Spatial Information Theory. A Theorical Basis for GIS* (cf. p. 54).

– (1997). « Boundaries : An Essay in Mereotopology ». In : *The Philosophy of Roderick Chisholm* (cf. p. 54).

Smith, Barry et Varzi, Achille (2000). « Fiat and Bona Fide Boundaries ». In : *Philosophy and Phenomenological Research* 60.2, p. 401-420 (cf. p. 42, 54).

Smith, Matthew (2018). *How good is "good"?* Sous la dir. d'YouGov. url : https://yougov.co.uk/topics/lifestyle/articles-reports/2018/10/02/how-good-good (visité le 08/07/2020) (cf. p. 51, 53).

Smithson, Michael et Verkuilen, Jay (2006). *Fuzzy Set Theory. Applications in the Social Sciences*. Anglais. Quantitaative Applications in the Social Sciences 147. SAGE Publications (cf. p. 61).

Societe Dauphinoise de Secours en Montagne (2013). *L'Obiou ? Un seul sommet mais 2 interventions historiques de la S.D.S.M. !* url : http://www.sdsm38.fr/page.php?id=139 (visité le 19/05/2020) (cf. p. 12).

Sorensen, Roy (2018). « Vagueness ». Anglais. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. Zalta. Summer 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University (cf. p. 40 sq.).

Soulé, Bastien et Corneloup, Jean (2002). « Logiques d'action et conflits entre intervenants du secours en montagne ». In : *Cahiers de la Sécurité* 48 (cf. p. 13).

Strobl, Christian (2008). « Dimensionally Extended Ninde-Intersectuin Model (DE-9IM) ». In : *Encyclopedia of GIS*. Sous la dir. de Shashi Shekhar et Hui Xiong. Springer (cf. p. 89).

Takemura, Celina Maki, Cesar, Roberto et Bloch, Isabelle (2012). « Modeling and measuring the spatial relation "along" : Regions, contours and fuzzy sets ». Anglais. In : *Pattern Recognition* 45.2, p. 757-766. doi : 10.1016/j.patcog.2011.06.016 (cf. p. 38, 42, 77 sq., 165).

Talmy, Leonard (1983). « How Language Structures Space ». Anglais. In : *Spatial Orientation : Theory, Research, and Application*. Springer US, p. 225-282. doi : 10.1007/978-1-4615-9325-6_11 (cf. p. 80).

The CGAL Project (2019). *CGAL User and Reference Manual*. 4.14. CGAL Editorial Board (cf. p. 157).

Thomas, Th. (1911). *L'accident de l'Aiguille du Plan. Sauvetage du corps de m. caillet. quelques réflexionssur les méthodes de sauvetage*. In : *La Montagne. revue mensuelle du Club alpin français*. Sous la dir. de Maurice Paillon. Club Alpin Français, p. 571-581 (cf. p. 11).

Tobler, Waldo (1993). *Three Presentations on Geographical Analysis and Modeling. Non-isotropic Geographic Modeling, Speculations on the Geometry of Geography, Global Spatial*

Analysis. Anglais. Rapp. tech. National Center for Geographic Information et Analysis (cf. p. 95 sq., 176, 262, 269).

Tøssebro, Erlend et Nygård, Mads (2002). « An Advanced Discrete Model for Uncertain Spatial Data ». Anglais. In : *Advances in Web-Age Information Management*. Sous la dir. de Xiaofeng Meng et Jianwen Su Yujun Wang. Springer Berlin Heidelberg, p. 37-51. doi : 10.1007/3-540-45703-8_4 (cf. p. 58, 61, 74).

– (2008). *Representing Uncertainty in Spatial Databases*. In : *Proceedings Of The 2008 International Conference On High Performance Computing & Simulation* (cf. p. 58, 61).

Touya, Guillaume, Balley, Sandrine, Duchêne, Cécile, Jaara, Kusay, Regnauld, Nicolas et Gould, Nicholas (2012). « Towards an Ontology of Generalisation Constraints and Spatial Relations ». In : *15th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation* (cf. p. 82).

Trinh, Thanh-Hai (2012). « A constraint-based approach to modelling spatial semantics of vitual environments ». Thèse de doct. Université de Brest (cf. p. 83).

Tye, Michael (1994). « Sorites paradoxes and the semantics of vagueness ». In : *Philosophical perspectives* 8, p. 189-206 (cf. p. 41).

Van Damme, Marie-Dominique, Olteanu-Raimond, Ana-Maria et Méneroux, Yann (2019). « Potential of crowdsourced data for integrating landmarks and routes for rescue in mountain areas ». In : *International Journal of Cartography*. doi : 10.1080/23729333.2019.1615730 (cf. p. 30, 225).

van der Walt, Stefan, Colbert, Chris et Varoquaux, Gael (2011). « The NumPy Array : A Structure for Efficient Numerical Computation ». In : *Computing in Science & Engineering* 13.2, p. 22-30. doi : 10.1109/MCSE.2011.37 (cf. p. 223).

van der Walt, Stéfan, Schönberger, Johannes L., Nunez-Iglesias, Juan, Boulogne, François, Warner, Joshua D., Yager, Neil, Gouillart, Emmanuelle et Yu, Tony and (2014). « scikit-image : image processing in Python ». In : *PeerJ* 2, e453. doi : 10.7717/peerj.453 (cf. p. 224).

Van Rossum, Guido et Fred, Drake (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace. doi : 10.5555/1593511 (cf. p. 222).

Vandeloise, Claude (1984). « Description of Space in French ». Thèse de doct. University of California (cf. p. 80).

– (1986). *L'espace en français : sémantique des prépositions spatiales*. Seuil. 244 p. (cf. p. 38 sq., 77, 79 sqq., 111, 133).

Vanegas, Maria Carolina, Bloch, Isabelle et Inglada, Jordi (2011). « A Fuzzy Definition of the Spatial Relation "Surround". Application to Complex Shapes ». Anglais. In : *EUSFLAT Conference*. EUSFLAT Conference. Aix-Les-Bains : Atlantis Press, p. 844-851 (cf. p. 38, 42, 77 sq., 131, 165).

Varzi, Achille (2001). « Vagueness in geography ». Anglais. In : *Philosophy & Geography* 4.1, p. 49-65. doi : 10.1080/10903770124125 (cf. p. 42, 54).

– (2015). « Boundary ». Anglais. In : *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Sous la dir. d'Edward N. Zalta. Winter 2015. Metaphysics Research Lab, Stanford University (cf. p. 42, 54).

Vasardani, Maria, Timpf, Sabine, Winter, Stephan et Tomko, Martin (2013). « From Descriptions to Depictions : A Conceptual Framework ». In : *COSIT 2013 : Spatial Information Theory* (cf. p. 82).

Virtanen, Pauli, Gommers, Ralf, Oliphant, Travis E., Haberland, Matt, Reddy, Tyler, Cournapeau, David, Burovski, Evgeni, Peterson, Pearu, Weckesser, Warren,

Bright, Jonathan, van der Walt, Stéfan J., Brett, Matthew, Wilson, Joshua, Jarrod Millman, K., Mayorov, Nikolay, Nelson, Andrew R. J., Jones, Eric, Kern, Robert, Larson, Eric, Carey, CJ, Polat, İlhan, Feng, Yu, Moore, Eric W., Vand erPlas, Jake, Laxalde, Denis, Perktold, Josef, Cimrman, Robert, Henriksen, Ian, Quintero, E. A., Harris, Charles R, Archibald, Anne M., Ribeiro, Antônio H., Pedregosa, Fabian, van Mulbregt, Paul et Contributors, SciPy 1. 0 (2020). « SciPy 1.0 : Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python ». Anglais. In : *Nature Methods* 17, p. 261-272. doi : https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2 (cf. p. 224).

Viry, Matthieu et Villanova-Oliver, Marlène (2019a). « L'ontologie d'alerte CHOUCAS : de la modélisation des connaissances à un outil support d'un raisonnement géovisuel. Application à la recherche de victime en haute-montagne ». In : *Sageo*. Clermont-Ferrand, France (cf. p. 34 sq., 109).

Viry, Matthieu, Villanova-Oliver, Marlène, Gautier, Jacques, Sreeves, Matthew et Davoine, Paule-Annick (2019b). « Improving the search for victims in mountain environments with geovisualization and competing hypotheses management ». In : *International Cartographic Association Conference*. doi : 10.5194/ica-proc-2-138-2019 (cf. p. 29, 224).

Wallgrün, Jan Olivier, Kippel, Alexander et Baldwin, Timothy (2014). « Building a corpus of spatial relational expressions extracted from web documents ». In : *Publication : GIR '14 : Proceedings of the 8th Workshop on Geographic Information Retrieval*. doi : https://doi.org/10.1145/2675354.2675702 (cf. p. 93).

Wang, Fangju (1994). « Towards a natural language user interface : an approach of fuzzy query ». Anglais. In : *International journal of geographical information systems* 8.2, p. 143-162. doi : 10.1080/02693799408901991 (cf. p. 78).

Wei, Bo, Qingqing, Xie, Yuanyuan, Meng et Yao, Zou (2017). « Fuzzy GML Modeling Based on Vague Soft Sets ». Anglais. In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6.1, p. 10. doi : 10.3390/ijgi6010010 (cf. p. 79).

Williamson, Timothy (1994). *Vagueness*. Routledge. 325 p. (cf. p. 40 sq., 51 sq.).

Winter, Stephan (2000). « Uncertain topological relations between imprecise regions ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 14.5, p. 411-430. doi : 10.1080/13658810050057579 (cf. p. 54).

Wittgenstein, Ludwig (1953). *Investigations philosophiques* (cf. p. 133).

Wolter, Diedrich et Yousaf, Madiha (2018). « Context and Vagueness in Automated Interpretation of Place Description : A Computational Model ». Anglais. In : *Proceedings of Workshops and Posters at the 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017)*. Sous la dir. de Paolo Fogliaroni, Andrea Ballatore et Eliseo Clementini. Springer International Publishing, p. 137-142. doi : 10.1007/978-3-319-63946-8_27 (cf. p. 38, 50).

Xi, Yulu (2020). *Plugin QGIS pour le géoréférencement de quadrillages de plans de ski dédiés aux secours en montagne,* Rapport de stage PPMD. ENSG, IGN (cf. p. 21).

Xu, Jun (2007). « Formalizing natural-language spatial relations between linear objects with topological and metric properties ». Anglais. In : *International Journal of Geographical Information Science* 21.4, p. 377-395. doi : 10.1080/13658810600894323 (cf. p. 38).

Xu, Jun et Mark, David (2007). « Natural Language Understanding of Spatial Relations Between Linear Geographic Objects ». Anglais. In : *Spatial Cognition & Computation* 7.4, p. 311-347. doi : 10.1080/13875860701590855 (cf. p. 38).

Xu, Jun et Yao, Changqing (2006). « Formalizing natural-language spatial relations descriptions with fuzzy decision tree algorithm ». Anglais. In : *Geoinformatics 2006 : Geospatial*

Information Science. Geoinformatics 2006 : Geospatial Information Science. Sous la dir. de Jianya Gong et Jingxiong Zhang. Wuhan : SPIE. doi : 10.1117/12.712745 (cf. p. 38).

Yang, J. O., Fu, Q. et Liu, D. (2007). « A Model for Representing Topological Relations Between Simple Concave Regions ». In : *ICCS 2007* (cf. p. 88).

Zadeh, Lotfi Aliasker (1965). « Fuzzy sets ». Anglais. In : *Information and Control* 8.3, p. 338-353. doi : 10.1142/9789814261302_0021 (cf. p. 52, 55, 61, 63 sqq., 67 sq., 154, 159, 193, 197-200, 210 sq., 213, 286).

– (1978). « Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility ». Anglais. In : *Fuzzy Sets and Systems* 28.3, p. 3-28 (cf. p. 200, 213, 286).

Zhan, Benjamin (1997). « Topological relations between fuzzy regions ». Anglais. In : *Proceedings of the 1997 ACM symposium on Applied computing*. Symposium on Applied Computing (SAC) (1997). San Jose : ACM Press. doi : 10.1145/331697.331738 (cf. p. 76).

Zoghlami, Asma (2013). « Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision ». Thèse de doct. Paris : Université Paris 8. 231 p. (cf. p. 73 sq.).

Zoghlami, Asma, Runz, Cyril de et Akdag, Herman (2016). « F-perceptory : an approach for handling fuzziness of spatiotemporal data in geographical databases ». Anglais. In : *International Journal of Spatial, Temporal and Multimedia Information Systems* 1.1, p. 30-62 (cf. p. 42, 73 sq., 149, 156).

Acronymes

CAF Club alpin français. 15
CC Chef de caravane. 16, 17
CENAS Centre national d'entrainement à l'alpinisme et au ski. 13
CODIS Centre opérationel départemental d'incendies et de secours. 16, 18, 21, 134
COS Chef des opérations de secours. 16, 17
COZ Centre opération de zone. 18
CRS Montagne Compagnies républicaines de sécurité en montagne. 13, 14, 18, 19

DDSIS Directeur départemental des services d'incendie et de secours. 16, 17
DOS Directeur des opérations de secours. 16, 17

EHM École de haute-montagne (École militaire de haute-montagne à partir de 1964). 11–13, 15

FAG Forces aériennes de la Gendarmerie nationale. 17, 18
FFM Fédération française de montagne. 11, 15

GHSC Groupement d'hélicoptères de la Sécurité civile. 17, 18
GMSP Groupes montagne sapeurs-pompiers. 15, 17, 18
GRIMP Groupes de reconnaissance et d'intervention en milieux périlleux. 13, 17, 19

MNT modèle numérique de terrain. 98, 159, 160, 177, 225

OAC Ontologie d'alerte Choucas. 34, 35
ORL Ontologie des relations de localisation. ix, 138, 140–144, 176, 182, 223, 224, 270, 286, 297, 298, 300, 324, 331
ORLA Ontologie des relations de localisation atomiques. 138, 141, 143, 144, 165, 185, 187, 223, 286, 287, 331
ORSEC Organisation de la réponse de la sécurité civile (jusqu'en 2006).
Organisation des secours. 13–21, 323

PGHM Pelotons de Gendarmerie de haute-montagne. 1, 13–15, 17–19, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 33, 38, 101, 133, 134, 137, 153, 221, 224, 270
PSM Plan de secours en montagne. 18, 19

SAMU Service d'aide médicale urgente. 14, 16, 17, 21
SIG Système d'information géographique. 21, 87, 89, 94, 157, 162, 257
SMUR Service mobile d'urgence et de réanimation. 19

USEM Unités de secours en montagne. 1, 7, 16–23, 33, 101

ZIR Zone initiale de recherche. 109, 117, 120, 157, 160, 164–169, 173, 176, 177, 183, 185, 187, 188, 190, 199, 206–208, 210, 211, 226, 227, 232–239, 241–243, 246–250, 252–254, 257–267, 269, 270, 272, 275, 277–283

ZLC Zone de localisation compatible. 35, 36, 45, 124, 125, 150, 163–168, 177, 179, 180, 183, 184, 187, 188, 190–193, 195, 197–200, 205–211, 213, 222, 226, 228–232, 235, 240, 244, 247–249, 255, 259–267, 270, 272–280, 282, 288, 325–329
ZLP Zone de localisation probable. 35, 36, 112, 122, 124, 158, 190, 192, 199, 200, 207–211, 226, 231, 249, 251, 267, 269, 270, 281, 283, 286, 290, 329

Liste des figures

1.1 Chronologie des principaux événements relatifs à l'histoire française des secours en montagne. 15
1.2 Zone d'application des dispositions spécifiques au secours en montagne du plan ORSEC isèrois. 19
1.3 Carte topographique de la région de Bourg-d'Oisans 24

2.1 Illustration du processus de *spatialisation* d'un *indice de localisation*. 35
2.2 Illustration du processus de construction de la *zone de localisation probable* par la *fusion* des *zones de localisation compatibles*. 36

3.1 *How good is "good" ?* Figure réalisée à l'aide d'un lissage par noyau, à partir d'un sondage effectué au près d'au moins 1005 citoyens britanniques (l'échantillon varie pour chaque adjectif). Extrait de Smith (2018) 53
3.2 Saisie manuelle de la limite du lac du Chambon. Extrait de Bunel (2020). . . 56
3.3 Saisie manuelle d'une limite alternative. Extrait de Bunel (2020). 57
3.4 Mise en évidence de la limite imprécise du lac. Extrait de Bunel (2020). 57
3.5 Mise en évidence de l'incertitude pour la limite des hautes eaux. Extrait de Bunel (2020). 59
3.6 Distinction entre les notions d'imprécision et d'incertitude spatiale (pour des raisons de lisibilité seule la frontière de l'objet spatial est représentée). D'après Bunel (2020). 59
3.7 Illustration de la modélisation du lac du Chambon à l'aide de la théorie des sous-ensembles flous. Extrait de Bunel (2020). 62
3.8 Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs de Zadeh (1965) en fonction des degrés d'appartenance x et y. 63
(a) Opérateur d'intersection de Zadeh (*t-norme*, Équation 3.7) 63
(b) Opérateur d'union de Zadeh (*t-conorme*, Équation 3.8) 63
3.9 Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs de Łukasiewicz en fonction des degrés d'appartenance x et y. 65
(a) *t-norme* de Łukasiewicz (Équation 3.11) 65
(b) *t-conorme* de Łukasiewicz (Équation 3.12) 65
3.10 Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs probabilistes en fonction des degrés d'appartenance x et y. 66
(a) *t-norme* probabiliste (Équation 3.17) 66
(b) *t-conorme* probabiliste (Équation 3.18) 66
3.11 Degré d'appartenance μ calculé par les opérateurs drastiques en fonction des degrés d'appartenance x et y. 67
(a) *t-norme* drastique (Équation 3.19) 67
(b) *t-conorme* drastique (Équation 3.20) 67

3.12 Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle exact tel que proposé par Bejaoui et al. (2009). Comme pour tous les modèles « exacts » la zone d'appartenance totale est incluse dans la zone d'appartenance au moins partielle. Extrait de Bunel (2020). 72
3.13 Les trois types géométriques flous proposés par Schneider (1999). D'après Schneider (1999) et Bunel (2020). 73
3.14 Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle flou discrétisé par un ensemble de polygones. Extrait de Bunel (2020). 74
3.15 Illustration de la modélisation du lac du Chambon avec un modèle flou tel qu'implémenté par Dilo et al. (2007). Extrait de Bunel (2020). 75
3.16 Illustration de la modélisation du lac du Chambon par un modèle flou et une implémentation raster (*i.e.* construction en extension de premier ordre). Extrait de Bunel (2020). 77
3.17 Illustration de la définition du lac du Chambon par sélection floue d'objets géographiques (*i.e. construction en extension d'ordre supérieur*). Extrait de Bunel (2020). 78
3.18 Les modèles RCC-8 et RCC-5 et leurs relations topologiques 87
3.19 Vitesse de marche estimée en fonction de la pente par les différents modèles de marche proposés dans la littérature. 96
3.20 Mosélisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle conique. D'après Renz et al. (2004). 97
3.21 Modélisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle par demi-plans. D'après Frank (1992). 97
3.22 Modèlisation des relations cardinales à l'aide d'un modèle par demi-plans avec une zone neutre, d'après Frank (1992) 97

4.1 Comparaison du processus de construction de la *zone de localisation probable,* pour une alerte à deux *indices de localisation.* 114
(a) Construction suivant une démarche chaînée 114
(b) Construction suivant une démarche autonome 114
4.2 Illustration des hypothèses du *monde clos* (a) et du *monde ouvert* (a) 116
(a) 116
(b) 116
4.3 Illustration de l'étape de *fusion des relations de localisation atomiques* 124
4.4 Illustration de l'étape de *fusion des objets de référence indéfinis* 125
4.5 Illustration de l'étape de fusion des *indices de localisation* 126
4.6 Organisation générale de la méthode de construction de la *zone de localisation probable* à partir d'un ensemble d'indices de localisation 127

5.1 Illustration du processus de décomposition des relations de localisation 131
5.2 Structure générale d'une ontologie de décomposition 132
5.3 Distribution de la durée des alertes 134
5.4 Ontologie des *relations de localisation* ORL 142

6.1 Illustration du passage de différents types de frontières *imprécises* à une modélisation « exacte » 148
6.2 Zone utilisée pour la comparaison des implémentations. 151

6.3 *Métrique* pour la *relation de localisation atomique* orla#PresDe : La distance planaire à la ligne électrique trois brins. 152
6.4 Différence entre l'altitude locale et l'altitude de la ligne électrique la plus proche. 152
6.5 Fonctions d'appartenance pour les *relations de localisation atomiques* orla#PresDe (a) et orla#AltitudeStrictementInferieure (b), utilisées pour construire la *zone de localisation probable* de *l'indice de localisation* « je suis sous une ligne électrique trois brins ». 153
(a) 153
(b) 153
6.6 *Zone de localisation compatible* pour la *relation de localisation atomique* orla#PresDe. 155
6.7 *Zone de localisation compatible* pour la *relation de localisation atomique* orla#AltitudeStrictementInferieure. 155
6.8 *Zone de localisation probable,* construite avec une approche raster, pour *l'indice de localisation* « Je suis sous une ligne électrique trois brins ». 156
6.9 Plans utilisés pour définir une *alpha-cut.* 158
6.10 *Zone de localisation probable* construire avec une modélisation par *alpha-cuts.* . 158

7.1 Illustration du processus de construction d'une ZLC nette. 166
7.2 Méthode de *spatialisation* d'une *relation de localisation atomique* donnée. . . . 167
7.3 Illustration de l'impact de la méthode de sélection des pixels sur le résultat d'une opération de *rasterisation.* 170
7.4 Illustration d'une situation où la *rasterisation* aboutit à un raster vide 170
7.5 illustration du raster résultant des différentes méthodes de *rasterisation* définies. 172
7.6 Exemple d'une *métrique* issue de la *spatialisation* du *fil rouge,* la différence d'altitude par rapport au pixel le plus proche de *l'objet de référence.* 175
7.7 Exemple du calcul de la *métrique* EcartAngulaire pour un point et une direction donnée. 175
7.8 Exemple du calcul de la *métrique* DirectionDe 176
7.9 Exemple d'une *métrique* issue de la *spatialisation* du *fil rouge :* la part de la surface visible d'un lac donné. 178
7.10 Illustration de la construction de *zones de localisation compatibles* à partir d'une même *métrique* et de *fuzzyficateurs* différents. 179
7.11 *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* EqVal et de ses dérivés EqVal0 et EqAngle. 181
(a) *Fonction d'appartenance* pour EqVal 181
(b) *Fonction d'appartenance* pour EqAngle 181
(c) *Fonction d'appartenance* pour EqVal0 181
7.12 *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* SupVal et de son dérivé SupVal0. . . 181
(a) *Fonction d'appartenance* pour SupVal 181
(b) *Fonction d'appartenance* pour SupVal0 181
7.13 *Fonctions d'appartenance* du *fuzzyficateur* InfVal et de son dérivé InfVal0. . . 182
(a) *Fonction d'appartenance* pour InfVal 182
(b) *Fonction d'appartenance* pour InfVal0 182
7.14 Fonctions d'appartenance des *fuzzyficateurs* EqVal, SupVal, et InfVal après application du *modifieur* Not. 183
(a) *Fonction d'appartenance* pour EqVal avec le *modifieur* Not 183

(b) *Fonction d'appartenance* pour `SupVal` avec le *modifieur* `Not` 183
(c) *Fonction d'appartenance* pour `InfVal` avec le *modifieur* `Not` 183
7.15 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#`SousAltitude`. 186
7.16 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#`DansPlanimétrique`. 186
7.17 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#`NotALaFrontiereDe`. 187

8.1 Méthode de *fusion* d'un ensemble *d'indices de localisation* 191
8.2 Illustration du principe du *tiers-exclu* 195
8.3 Illustration du principe de la *non-contradiction* 196
8.4 Comparaison de l'intersection de deux ZLC en fonction de la *t-norme* utilisée. . 198
8.5 Comparaison de l'union de deux ZLC en fonction de la *t-conorme* utilisée. . . . 199
8.6 Exemple d'une distribution de possibilité par paliers : la possibilité qu'un colis arrive chaque jour de la semaine. 203
8.7 Illustration de la combinaison d'une distribution de possibilité constante et d'une fonction d'appartenance. 206
8.8 Représentation des *fonctions d'appartenance* de différents *fuzzyfieurs* avec une *incertitude* 207
(a) 207
(b) 207
(c) 207
(d) 207
8.9 Modélisation d'un même *relation de localisation atomique* (orla#`PresDe`), à partir du même *objet de référence* avec deux certitudes différentes, absolue et partielle (0,4). 208
(a) 208
(b) 208
8.10 Résultat de l'intersection de deux ZLC avec la *t-norme* de Zadeh sans (a) et avec (b) incertitude. 209
(a) 209
(b) 209
8.11 Illustration de la phase fusion. 212

9.1 Zone initiale de recherche pour l'alerte « Grand Veymont » 227
9.2 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#`HorsDePlanimetrique`. 232
9.3 Distance euclidienne au sommet du « Grand Veymont » 233
9.4 Fonction d'appartenance pour le fuzzyficateur orla#`SupVal0`, paramétrée. . . . 233
9.5 Zone de localisation compatible du premier indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#`HorsDePlanimetrique` du sommet du Grand Veymont » (1) 234
9.6 Métrique orla#`DeltaNearestVal` calculée à partir du sommet du *Grand Veymont.* 236
9.7 Fonction d'appartenance pour le fuzzyficateur orla#`SupVal0`, paramétrée. . . . 236

9.8 Zone de localisation compatible pour le second indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est ora#SousAltitude du sommet du *Grand Veymont,* avec une certitude normale » (2). 237
9.9 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#AuNordDe. 237
9.10 Métrique orla#EcartAngulaire, calculée pour la spatialisation de la relation de localisation orl#AuNordDe. La résolution du raster a été réduite de 5 à 50 mètres pour la représentation. 238
9.11 Métrique orla#Distance, calculée pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#HorsDePlanimétrique. 239
9.12 Fonction d'appartenance pour l'indice de localisation : « Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3). 240
(a) 240
(b) 240
9.13 Zone de localisation compatible pour la première relation de localisation (orl#AuNordDe) du troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3). 241
9.14 Zone de localisation compatible pour la seconde relation de localisation (orla#HorsDePlanimétrique) du troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3). 242
9.15 Zone de localisation compatible pour le troisième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#AuNordDeExterne du *Pas de la Ville,* avec une certitude normale » (3). 243
9.16 Métriques calculées pour l'indice de localisation : « La victime est entre le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* ». 244
(a) 244
(b) 244
9.17 Zones de localisation compatibles intermédiaires pour l'indice de localisation : « La victime est entre le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* ». 245
(a) 245
(b) 245
9.18 Zone de localisation compatible pour le cinquième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#EntreXetY le *Pas de la Ville* et *Pierre Blanche* avec une certitude normale » (4). 246
9.19 Exemples de métriques pour la spatialisation de l'indice de localisation « La victime n'est pas dans une forêt. » 247
(a) 247
(b) 247
9.20 ZLC pour l'indice de localisation : « La victime n'est pas dans une forêt. » . . . 248
9.21 *Rasteriser, métrique* et *fuzzyficateur* utilisés pour la *spatialisation* de la *relation de localisation atomique* orla#DistanceQuantitativePlanimetrique 249
9.22 Fuzzyficateur orla#EqVal paramétré pour le huitième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#DistanceQuantitative de 800 m du *Pas de la Ville,* avec une certitude moyenne » (8). 249

9.23 Zone de localisation compatible pour le huitième indice de localisation de l'alerte *Grand Veymont :* « Le requérant est orl#DistanceQuantitative de 800 m du *Pas de la Ville,* avec une certitude moyenne » (8). 250
9.24 Zone de localisation probable pour l'alerte *Grand Veymont.* 252
9.25 Zone initiale de recherche pour le *fil rouge* 254
9.26 Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#DansLaDirectionDeXDepuisY 258
9.27 Métrique (a) et ZLC (b) de la relation de localisation orla#DansLaDirection-DeXDepuisY pour la station des Deux-Alpes. 260
(a) 260
(b) 260
9.28 ZLC pour l'indice de localisation : « La victime est partie de *Bourg-d'Oisans,* en direction d'une station de ski » (1). 261
9.29 Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#ATempsDeMarcheDe 262
9.30 Métrique orla#TempsMarche calculée à partir de *Bourg-d'Oisans.* 263
9.31 ZLC spatialisant la zone atteignable en moins de 12h de marche (a) et ZLC spatialisant la zone atteignable en plus d'une demi-heure de marche (b). 264
(a) 264
(b) 264
9.32 ZLC pour l'indice de localisation :« La victime a marché plusieurs heures depuis *Bourg-d'Oisans* » (2). 272
9.33 Rasteriser, métrique et fuzzyficateur utilisés pour la spatialisation de la relation de localisation atomique orla#Proximal 272
9.34 Métrique (a) et ZLC (b) pour la relation de localisation orla#SousAltitude appliquée à une instance de chemin. 273
(a) 273
(b) 273
9.35 Métrique (a) et ZLC (b) pour la relation de localisation orla#Proximal appliquée à une instance de chemin. 273
(a) 273
(b) 273
9.36 Fonctions d'appartenance pour la spatialisation des relations de localisation atomiques orla#SousAltitude (a) et proximal#Proximal (b). 273
(a) 273
(b) 273
9.37 ZLC de la relation de localisation orl#SousProche pour une instance de chemin. 274
9.38 ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous un chemin » (3). 275
(a) 275
(b) 275
9.39 Métrique (a) et zones de localisations compatibles pour la relation de localisation orla#CibleVoitSite appliquée à une instance de lac. La première ZLC (b) représente la zone où l'on voit au moins une partie d'un lac, la seconde ZLC (c) la zone ou l'on ne voit pas l'intégralité du lac. La troisième ZLC (d) est l'intersection des précédentes. 276
(a) 276
(b) 276

(c) 276
(d) 276
9.40 ZLC pour l'indice de localisation : « La victime voit une partie de plan d'eau » (4). 277
9.41 ZLC pour l'indice de localisation :« La victime est sous une route » (5). 278
9.42 ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous une ligne électrique trois brins » (6) 279
9.43 ZLC pour l'indice de localisation « La victime est à l'est de l'antenne GSM de la chapelle *St-Philomene* » (7) 280
9.44 ZLP de l'alerte *fil rouge* 281
(a) 281
(b) 281
(c) 281
(d) 281
9.45 ZLC pour l'indice de localisation « La victime est sous une ligne électrique trois brins » (6), après ajout des lignes basses et moyenne tension. 282
9.46 ZLP de l'alerte *fil rouge* après mise à jour de l'indice de localisation 6. 283
(a) 283
(b) 283
(c) 283
(d) 283

Liste des tableaux

1.1 Synthèse des acteurs participant aux opérations de secours. 17
1.2 Corps mobilisés pour le secours en montagne dans les départements alpins. . . 18
1.3 Synthèse des verrous et des apports attendus pour chaque objectif scientifique du projet Choucas 31

2.1 Synthèse des verrous et des apports attendus pour chaque objectif scientifique de la thèse 47

3.1 Termes utilisés dans la littérature comme synonymes de précis et d'imprécis . . 52
3.2 Comparaison du degré d'appartenance résultant de l'intersection ou de l'union, de deux ensembles, en fonction de la *t-norme* ou de la *t-conorme* utilisée. Avec $a = 0,8$ et $b = 0,5$. 67
(a) Degré d'appartenance résultant en fonction de la *t-norme* utilisé 67
(b) Degré d'appartenance résultant en fonction de la *t-conorme* utilisé 67
3.3 Comparaison entre la nature de construction et la nature de définition 70
3.4 Extrait des nouvelles relations topologiques proposées par le modèle RCC-23, d'après Cohn et al. (1997). 88
(a) Exemple de décomposition de la relation topologique EC 88
(b) Exemple de décomposition de la relation topologique DC 88
3.5 Exemple des raffinements de *relations topologiques* permis par le modèle 9IM, d'après Egenhofer et al. (2011). 90
(a) Exemple de décomposition de la relation topologique *overlap* 90
(b) Exemple de décomposition de la relation topologique *meet* 90
3.6 Exemple des raffinements de *relations topologiques* permis par le modèle DE-9IM. 91

5.1 Structure de l'onglet « *expressions* » du template de retranscription. 135
5.2 Éléments de comparaison des ontologies ORL et ORLA. 138
5.3 *Relations de localisation atomiques* de verticalité et leurs variantes. 143

6.1 Synthèse de la comparaison des implémentations par *alpha-cuts* et raster. . . . 161

7.1 Types de métriques 173

8.1 Synthèse des étapes de la *phase de fusion* 192
8.2 Synthèse des caractéristiques des opérateurs 200

9.1 Synthèse des paramètres des fonctions d'appartenance utilisés pour la spatialisation des indices de localisation de l'alerte *Grand Veymont*. 251
9.2 Synthèse des paramètres des fonctions d'appartenance utilisés pour la spatialisation des indices de localisation de l'alerte *Fil rouge*. 268