
Référencement spatial indirect : modélisation à base de relations et d'objets spatiaux vagues

Mattia Bunel¹, Ana-Maria Olteanu-Raimond¹, Cécile Duchêne¹

¹Univ. Paris-Est, LASTIG COGIT, IGN, ENSG, F-94160 Saint-Mandé, France
prenom.nom@ign.fr

RÉSUMÉ. Cet article propose une méthodologie destinée à transformer une description de position exprimée dans un référentiel indirect en une position absolue dans un référentiel direct. Cette problématique nécessite une formalisation des éléments de localisation relatifs, ici sous la forme d'un modèle en triplets, utilisés comme base de référencement et un questionnement sur la prise en compte de l'imperfection du langage naturel dans le processus de modélisation. Nous proposons de faire appel aux objets spatiaux flous et nous comparerons leurs implémentations afin d'identifier l'approche la plus adaptée au contexte du secours en montagne.

ABSTRACT. This paper proposes a methodology for transforming a relative position description expressed in an indirect repository into an absolute position in a direct repository. This problem requires the formalization of relative location elements, here in the form of a triplet model, which is used as a basis for the transformation from relative to absolute position and the questioning on how the imperfection of the natural language in the modeling process can be taken into account. We propose to use fuzzy spatial objects and we will compare their implementations to identify the most appropriate approach to our context.

MOTS-CLÉS : Référentiel spatial indirect, logique floue, objets spatiaux vagues, relation spatiale étendue, secours en montagne

KEYWORDS: Indirect spatial referential, fuzzy logic, vague spatial objects, extended spatial relation, mountain rescue

1. Introduction

Lors de leurs interventions, les Pelotons de Gendarmerie de Haute Montagne (PGHM) peuvent être contraints à identifier manuellement la position d'une victime en recoupant des informations obtenues par téléphone (*e.g.* itinéraire emprunté, description verbale de position) avec des données métier, d'origines et de formats multiples (*e.g.* cartes numériques, guides papier). La complexité de cet exercice en fait le principal goulot d'étranglement de la phase de préparation des secours, conduisant généralement à la perte d'un temps précieux. L'ANR CHOUCAS¹ vise à répondre à un besoin exprimé par le PGHM de Grenoble, en proposant des méthodes facilitant le processus d'identification de la position des victimes. Cela passe notamment par des travaux sur la constitution et l'enrichissement de données provenant de sources hétérogènes, ainsi que sur le raisonnement spatial et la visualisation interactive pour l'aide à la décision (Olteanu-Raimond *et al.*, 2017).

Au sein de ce projet, notre travail part du constat que la victime décrit systématiquement sa position au moyen de relations spatiales et d'objets géographiques servant de référence, *i.e.* à l'aide d'un *référentiel spatial indirect*. Nous traiterons ici de leur transformation en des positions exprimées dans un *référentiel direct* (Clementini, 2011) compte tenu des spécificités de notre contexte. Au-delà de l'application au secours en montagne, cette problématique a pour enjeu un accès facilité à l'information géographique, plus proche de la cognition humaine que ce que permettent les outils et méthodes classiques disponibles sur SIG, comme prôné par Egenhofer et Mark (1995) avec la *naive geography*.

Cet article présentera la question de la modélisation d'une position à partir d'un référentiel indirect (Section 2), ainsi que les principes de modélisation des *relations spatiales*, retenus (Section 3). La Section 4 abordera la nécessité d'utiliser des *objets spatiaux vagues* et présentera un état de l'art des modèles et implémentations existantes, avant d'en confronter deux d'entre-elles à un cas réel (Section 5).

2. Modélisation d'un élément de localisation dans un référentiel indirect

Dans cette partie, nous aborderons la question de la modélisation formelle d'un *objet spatial* à partir d'un *référentiel indirect*.

2.1 Hypothèses de travail

Le modèle que nous présentons est basé sur l'hypothèse que le requérant (personne contactant les secours) décrit une position à l'aide d'une ou plusieurs phrases telles que « *Je suis à côté d'un arbre et en face d'un chalet* » ou « *Le blessé est à côté de moi* ».

¹ ANR CHOUCAS : *Intégration de données hétérogènes et raisonnement spatial pour l'aide à la localisation des victimes en montagne*. ANR-16-CE23-0018

Notons que nous ne travaillons pas directement à partir de phrases mais avec une liste d'*éléments de localisation*, (e.g. « *Je suis à côté d'un arbre* » et « *Je suis en face d'un chalet* ») extraits du discours du requérant par le secouriste et saisis au travers d'une interface également développée au sein de l'ANR CHOUCAS (dont il ne sera pas question ici).

La méthodologie que nous travaillons à définir s'articule en deux phases complémentaires, la première visant à identifier l'ensemble des positions correspondant à chaque élément de localisation donné par le requérant et la seconde constituant en l'agrégation de ces positions en vue d'identifier les positions correspondant à l'ensemble des éléments de localisation. L'imprécision est prise en compte durant tout le processus, ce n'est cependant pas le cas l'incertitude, qui n'est modélisée qu'à partir de la seconde étape, la même incertitude caractérisant alors toutes les positions décrites par un même *élément de localisation*. Dans ce papier, nous nous concentrons sur la première phase et ne nous intéresserons donc qu'à la modélisation de l'imprécision des éléments de localisation.

2.2 Formalisation des éléments de localisation

Les éléments de localisation présentent une structure commune, composée d'un *sujet* dont on décrit la localisation (« *je* », « *le blessé* »), d'un point de repère défini comme l'*objet de référence* (« *un arbre* », « *un chalet* », « *moi* ») et une relation indiquant la position du sujet par rapport à l'objet de référence, que nous nommerons la *relation spatiale* (« *à côté* », « *en face* »). De manière analogue au modèle de Vasardini *et al.* (2013), nous proposons de modéliser ces éléments de localisation par un triplet composé de ces trois éléments. Ainsi les exemples précédents peuvent être modélisés par les triplets suivants : (je, à côté, arbre), (je, en face, rivière) ; (le blessé, à côté, moi).

Cependant une phrase telle que : « *je suis presque en dessous d'un télésiège* » n'est pas efficacement modélisée à l'aide d'une relation spatiale, la nuance apportée par l'adverbe *presque* étant ignorée. De manière analogue au modèle des *entités nommées étendues* (« *expanded named entity* ») de Moncla *et al.* (2015), nous proposons de définir une *relation spatiale étendue* englobant la relation spatiale, ses modificateurs (e.g. *presque*, *complètement*, [à] *50 m*) mais également le verbe, ce dernier nuancant le propos (e.g. *aller vs passer* ou *traverser*). La composition de la relation spatiale étendue peut varier en fonction du contexte, mais elle est toujours composée d'au moins *un verbe* et d'une relation spatiale, les modificateurs étant facultatifs et illimités. Un élément de localisation peut alors être modélisé avec un triplet *E* de la forme :

$$E = (S, RSE, O) \text{ avec } RSE = (V, \text{mod}, R) \quad (1)$$

Avec *S* le sujet, *RSE* une relation spatiale étendue, *O* l'objet de référence, *V* le verbe, *R* une relation spatiale et *mod*, le ou les modificateurs.

3. Principes de modélisation des relations spatiales étendues

Un des principaux verrous à la construction d'objets spatiaux à partir d'un référentiel indirect est l'interprétation des éléments de localisation. Bien que notre travail soit facilité par l'action du secouriste, nous restons confrontés à l'implicite et à la polysémie du langage humain. Cela pose deux principaux problèmes que nous proposons de résoudre à l'aide de deux principes de modélisation des *relations spatiales étendues*, la sécabilité et la non-bivalence.

3.1 Décomposition des relations spatiales étendues

Une même relation spatiale (et par extension une relation spatiale étendue), peut avoir des significations différentes en fonction de la nature de l'objet de référence (Borillio, 1998, pp. 16-17). Prenons l'exemple de la relation spatiale *sous*. Bien que partageant une sémantique proche, son sens dans les phrases « *je suis sous un arbre* » et « *je suis sous une route* », diffère. La notion de recouvrement présente dans la première phrase est absente de la seconde. Pustejovsky (2017) parle de « *projective relations* » dans le second cas. Cette différence sémantique entre deux occurrences d'une même relation spatiale s'explique par la nature des objets de référence. Une personne peut être recouverte par un arbre et non par une route (à l'inverse d'un pont). Cela impose de prendre en compte les différentes sémantiques d'une même relation spatiale et ce en fonction des types d'objets de référence et des sujets utilisables dans ce contexte. Ces deux relations spatiales partagent toutefois une base sémantique commune : leur sujet est situé à une altitude inférieure à celle de l'objet de référence. Ce sont ces régularités sémantiques que nous proposons d'exploiter.

Notons Pa_o l'ensemble des positions situées à une altitude inférieure à un objet de référence de type o :

$$Pa_o = \cup(Pa_i | i \in o) \quad (2)$$

Avec o l'ensemble des objets spatiaux d'un même type, i une instance de o et Pa_i l'ensemble des positions situés à une altitude inférieure à celle de i .

On peut alors construire les ensembles Pa_r et Pa_{ab} contenant les positions situées respectivement à une altitude inférieure à au moins une instance d'une route ou d'un arbre. Cependant, toutes les positions appartenant à Pa_r ou Pa_{ab} ne valident pas nécessairement les éléments de localisation « *je suis sous une route* » ou « *je suis sous un arbre* ». Ces ensembles contiennent des positions situées à une grande distance de l'objet de référence qu'il serait absurde de considérer comme situées *sous* l'un de ces objets de référence.

Dès lors, il apparaît nécessaire de circonscrire la distance à l'objet de référence. Cependant (contrairement aux ensembles Pa_r et Pa_{ab}) il n'est pas pertinent de fixer un même seuil de distance pour des objets de nature différente. La distance à partir de laquelle on ne se situe plus sous un arbre étant intuitivement plus faible que celle

à partir de laquelle on ne se situe plus sous une route. Notons Pb_o l'ensemble des positions proches d'un objet de référence de type o . Nous pouvons alors construire une approximation des zones Pc_r et Pc_{ab} , respectivement définies comme l'intersection des ensembles Pa_r et Pb_r ou Pa_{ab} et Pb_{ab} .

Nous proposons donc de prendre en compte la polysémie des relations spatiales en les modélisant comme une composition de relations spatiales à la sémantique invariable et pondérées contextuellement, que nous nommons les *relations spatiales atomiques*. Nous supposons que ce travail de décomposition peut s'appliquer à toute relation spatiale non atomique. À titre d'exemple, la relation « entouré de » peut-être modélisée comme la conjonction des relations « à gauche », « à droite », « devant » et « derrière » (Vanegas *et al.*, 2011). La principale difficulté de cette approche est qu'elle nécessite au préalable d'identifier les relations spatiales atomiques, ce qui impose une analyse manuelle des relations spatiales utilisées dans notre contexte.

3.2 Non-bivalence des relations spatiales étendues

Le principe de la non-bivalence découle de la nature imprécise du langage et de la difficulté de construire des objets spatiaux à partir de relations spatiales telles que « à côté » ou « sous ». La construction des ensembles Pc_r et Pc_{ab} (Section 3.1) nécessite la définition de seuils : un premier seuil représentant la différence d'altitude à partir de laquelle une personne n'est plus située sous un objet de référence, et deux seuils de distance : le premier représentant la distance à partir de laquelle on considère qu'une *personne n'est plus sous un arbre*, le second la distance à partir de laquelle on considère qu'une *personne n'est plus sous une route*.

Fixer précisément ces seuils est une opération délicate, car il est nécessaire de prendre en compte la nature de l'objet de référence (route vs arbre), mais aussi de son type (route vs chemin) et l'inconstance des locuteurs, liée à une expression « naïve » des localisations (Egenhofer et Mark, 1995). Le choix d'un seuil trop restrictif ou trop lâche sera nécessairement source d'un grand nombre de faux, positifs ou négatifs.

Pour pallier ce problème, la solution la plus répandue dans la littérature consiste à construire des objets *spatiaux vagues*, *i.e.* des objets aux limites non nettes, capables de prendre en compte l'imprécision. Ce type d'objet, présenté ci-dessous, permet de délimiter des zones de façon non bivalente.

4. Modélisation des objets spatiaux vagues

Cette partie présentera un aperçu des différents modèles et implémentations proposés dans la littérature pour modéliser des *objets spatiaux vagues* (Dilo, 2006). Nous en présenterons ensuite une sélection, au regard de notre problématique.

4.1 État de l'art

Le recours à la modélisation d'objets vagues naît de la nécessité de modéliser des objets spatiaux dont les caractéristiques rendent caduque la modélisation à l'aide d'objets spatiaux aux frontières nettes. C'est notamment le cas lorsque l'on cherche à modéliser des objets dont la frontière ne peut pas être définie de manière précise. Citons l'exemple de la rivière polluée proposé par Dilo (2006). Dans ce cas, il est difficile de définir la zone de la rivière polluée puisque le degré de pollution décroît graduellement à partir de la source. Fixer la frontière d'un tel objet conduira à un choix discutable, puisque dépendant d'un seuil fixé empiriquement.

De nombreuses approches et implémentations des objets spatiaux vagues ont été proposées dans la littérature. Clementini (2008) distingue trois catégories : les modèles définissant des objets aux frontières étendues (« *objects with broad boundaries*»), les modèles basés sur la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965) et ceux basés sur la théorie des probabilités.

La catégorie des modèles aux frontières étendues regroupe les modélisations d'objets spatiaux remplaçant les traditionnelles frontières nettes par des frontières non nettes. Le modèle *egg-yolk* proposé par Cohn et Gotts (1996) est probablement le plus connu dans cette catégorie. On peut également citer le modèle min-max (Bejahoui *et al.*, 2009) qui est une amélioration du modèle *egg-yolk* ou le modèle de Clementini (2008). Selon la définition proposée par Clementini (2008) un objet aux frontières vagues est composé de deux régions ra et rb avec $ra \subseteq rb$. ∂ra correspond à la frontière intérieure et ∂rb à la frontière extérieure de l'objet spatial. La frontière de l'objet spatial est alors définie comme la zone comprise entre la frontière intérieure et la frontière extérieure.

Les modèles basés sur la théorie des ensembles flous (voir la Figure 1), tel que celui proposé par Schneider (1999), proposent de faire une analogie entre un objet spatial et un ensemble flou. Zadeh (1969) définit un ensemble flou A comme un couple composé d'un ensemble X et d'une fonction f_A nommée fonction d'appartenance. La fonction f_A , associée à chaque élément de X une valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$, nommée degré d'appartenance :

$$A = (X, f_A), \text{ avec } f_A: X \rightarrow [0,1] \quad (3)$$

L'ensemble des éléments ayant un degré d'appartenance non nul permet de définir le support S de l'ensemble (cf. eq. 5). Le noyau N de l'ensemble correspond, quant à lui, à l'ensemble des éléments ayant un degré d'appartenance égal à 1. Le noyau, N , et le support, S , de l'ensemble flou A sont des ensembles nets.

$$N(A) = \{x \in X | f_A(x) = 1\} \quad (4)$$

$$S(A) = \{x \in X | f_A(x) > 0\} \quad (5)$$

Le noyau et le support de l'ensemble A sont des cas particuliers de coupes-alpha (*alpha-cuts*) définies comme :

$$A^{>\alpha} = \{x \in X | f_A(x) > \alpha\} \quad (6)$$

Schneider (1999) définit un équivalent flou à tous les objets spatiaux habituels. Ainsi, les points, les lignes et les polygones sont respectivement déclinés en points, lignes et polygones flous. Un point flou *pf* est défini comme un point ayant un degré d'appartenance non nul. Par extension une ligne et une région floue *lf* et *rf* sont définies comme des ensembles particuliers de points flous avec des contraintes spécifiques. Dilo *et al.* (2007) ont proposé une implémentation de ce modèle. Un point flou est implémenté comme un triplet contenant les coordonnées du point et son degré d'appartenance. De manière analogue au modèle théorique, une ligne floue est une liste ordonnée de points flous. Les auteurs proposent de reconstruire une approximation de la ligne floue à l'aide d'une interpolation linéaire entre chaque couple de points. La même démarche est proposée pour l'implémentation des régions floues. Ainsi, les limites du noyau et du support de la région floue sont stockées sous la forme de polygones nets et pour chaque point de la région floue une approximation du degré d'appartenance est calculée par interpolation.

Vanegas *et al.* (2011) proposent également de modéliser des objets spatiaux flous, mais avec une implémentation raster. L'espace traité est divisé en cellules de même taille pour lesquelles est calculé un degré d'appartenance. Cette approche permet de construire en extension l'ensemble des positions validant les règles de construction définies. Cette approche présente l'avantage de faciliter les opérations inter-objets, mais sa précision est fortement dépendante de la résolution choisie.

Une autre proposition, basée sur la théorie des ensembles flous, est d'enregistrer une approximation des objets spatiaux flous à l'aide de coupes-alpha (de Runz, 2008 ; Zoghalmi *et al.*, 2016). Cette implémentation offre la possibilité de stocker des objets spatiaux flous sans recourir à des développements spécifiques, contrairement à l'approche de Dilo *et al.* (2007), mais les opérations inter-ensembles (union, intersection, etc.), demandent toutefois des développements *ad hoc*, contrairement à l'approche raster, en contrepartie plus volumineuse.

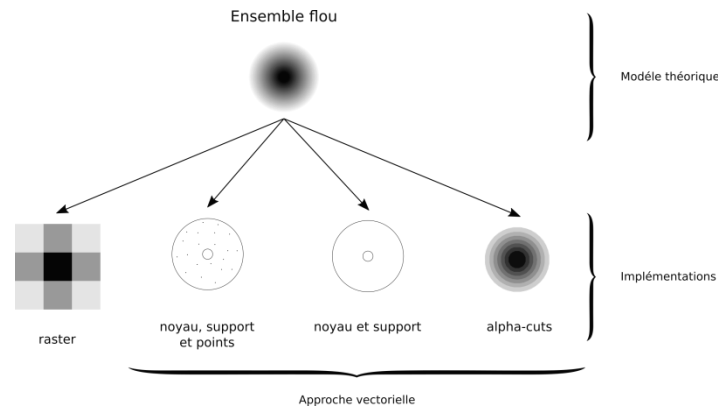


Figure 1. Implémentations d'objets spatiaux flous

Enfin, Tøssebro et Nygård (2002) proposent une troisième catégorie de modèle, basée sur la théorie des probabilités. De manière analogue au travail de Schneider (1999), ils proposent d'étendre les concepts de points, lignes et régions en leurs équivalents incertains. Dans ce cas, les points, lignes et régions sont inclus au sein d'une région nette, définissant l'ensemble des positions possibles. L'incertitude est modélisée à l'aide d'une fonction de masse, attribuant à chaque point de la région nette une probabilité d'accueillir l'objet spatial incertain.

4.2 Comparaison et choix d'un modèle et de son implémentation

Le choix de notre approche est contraint par le besoin d'agréger l'information issue de la modélisation de plusieurs éléments de localisation, mais aussi de plusieurs relations spatiales atomiques. Tous les modèles présentés permettent ce type de manipulation, mais tous n'offrent pas la même simplicité.

Les modèles discrets, tels que *min-max* ou *egg-yölk*, ont pour principal défaut leur première qualité, à savoir la simplicité. Ils ne permettent pas de prendre en compte la variation d'appartenance entre leurs deux frontières. Le calcul du degré d'appartenance d'une position à une région floue n'est donc envisageable qu'au prix d'une hypothèse sur la variation du degré d'appartenance entre les frontières. Les modèles proposés par Schneider (1999), Tøssebro et Nygård (2002) permettent, quant à eux, de modéliser une variation quelconque du degré d'appartenance. Bien entendu, les implémentations de ces modèles échantillonnent cette valeur, mais la précision de cette dernière, notamment dans les cas de variation non linéaire du degré d'appartenance, reste plus importante que celle des modèles *min-max* ou *egg-yölk*.

Parmi les modèles permettant de modéliser des variations non linéaires, nous avons choisi de travailler avec un modèle basé sur la théorie des ensembles flous, ces modèles étant les plus adaptés à nos contraintes. Toutefois, il est nécessaire de choisir une implémentation parmi celles présentées précédemment. Nous avons décidé de ne pas travailler à partir du modèle présenté par Dilo (2007), bien qu'il s'agisse d'une approche intéressante, puisque combinant à la fois les qualités d'une approche vectorielle (définition des frontières) et matricielle (meilleure précision de l'échantillonnage du degré d'appartenance). Cependant, cette implémentation est peu efficace pour manipuler des opérations inter-ensembles, fortement utilisées dans notre cas. Pour trancher entre une implémentation sous la forme d'*alpha-cuts* (de Runz, 2008), solution la plus économe en mémoire et une implémentation raster (Vanegas, 2011), plus précise, nous avons choisi de confronter ces deux approches sur un cas particulier, celui de l'élément de localisation : « *je suis sous une ligne électrique* ».

5. Cas d'application

En vue d'une sélection nous allons présenter une comparaison de deux implémentations des objets spatiaux flous présentés ci-dessus, à savoir les *alpha-cuts* (de Runz, 2008) et l'approche raster (Vanegas, 2011). Ces deux

implémentations seront appliquées au même cas, issu d'une situation réelle. La victime a indiqué qu'elle était située sous une ligne à haute-tension, élément de localisation correspondant au triplet (*je, (suis, sous), une ligne à haute tension*).

5.1 Identification des relations spatiales atomiques et définition des fonctions d'appartenance

Comme illustré dans la Section 3.1, être *sous* un objet, quelle que soit sa nature, implique que le sujet soit proche et situé à une altitude inférieure à l'objet auquel il se réfère. Dans notre contexte, caractérisé par des dénivelés pouvant être importants, ces deux contraintes sont fortement indépendantes. Nous définissons donc deux règles : 1) le sujet doit être proche de l'objet de référence et 2) le sujet doit avoir une altitude inférieure à l'objet de référence. Il est nécessaire de fixer des seuils pour transformer ces descriptions qualitatives en règles exploitables, ici nous nous contenterons de fixer des seuils génériques, laissant le traitement de leurs variabilités locales à une exploration ultérieure. Le recours aux objets spatiaux flous permet de prendre en compte l'imprécision inhérente à ce type de transformations, il est toutefois nécessaire de fixer manuellement deux seuils : d_S représentant la distance à partir de laquelle une position n'est plus *proche* d'une ligne à haute-tension (limite du support) et d_N , la distance en-deca de laquelle une position est *proche* d'une ligne à haute-tension (limite du noyau). La Figure 2 présente ces seuils et la forme de la fonction d'appartenance qui en découle. L'ensemble des positions proches d'une ligne à haute tension est défini par la fonction d'appartenance suivante :

$$f_1(d) = \begin{cases} 1 & \text{si } d < d_N \\ 0 & \text{si } d > d_S \\ 1 - \frac{d-d_N}{d_S-d_N} & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

Où d représente la distance à l'axe médian de la ligne à haute tension. Pour cette application, en collaboration avec le PGHM de Grenoble, les seuils retenus sont de 50 m pour d_N , et de 100 m pour d_S .

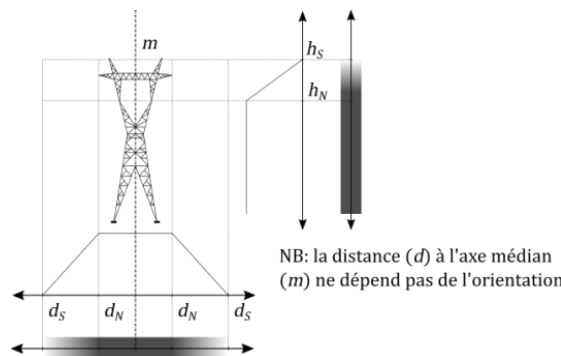


Figure 2. Définition de l'ensemble flou « je suis sous une ligne électrique »

De la même manière, l'ensemble contenant toutes les positions situées à une altitude inférieure à celle d'une ligne à haute tension est défini à travers la fonction d'appartenance suivante :

$$f_2(H, h) = \begin{cases} 1 & \text{si } H - h > h_N \\ 0 & \text{si } H - h < h_S \\ \frac{(H-h)-h_N}{h_S-h_N} & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

Avec H la hauteur de la ligne à haute-tension la plus proche et h l'altitude de la position, h_N et h_S la différence entre H et la hauteur, respectivement, du noyau et du support. Les seuils ont été fixés empiriquement à 5 m pour h_N et à 0 m pour h_S (soit le sommet du pylône).

Enfin, l'ensemble contenant toutes les positions situées sous une ligne à haute tension est défini à partir des fonctions d'appartenances décrites par les équations 7 et 8 de la manière suivante :

$$f_3(d, H, h) = \min(f_1(d), f_2(H, h)) \quad (9)$$

Où \min représente l'opérateur d'intersection proposé par Zadeh (1965), est défini comme le minimum des deux valeurs d'appartenance.

5.2 Application

Les deux implémentations présentées, portent sur la région de Bourg d'Oisans, au sud-est de Grenoble. Deux sources de données ont été utilisées. Les lignes à haute tension, ainsi que leurs pylônes proviennent de la BD TOPO produite par l'IGN. Le MNT, d'une résolution de cinq mètres, est quant à lui extrait de la BD ALTI de 2017.

La première implémentation testée repose sur la méthodologie proposée par Vanegas *et al.* (2011). L'ensemble des positions étudiées, délimité par une aire d'étude précédemment définie, est échantillonné par une grille à la résolution calquée sur le MNT. Nous calculons alors la valeur du degré d'appartenance pour chacune de ces cellules, permettant ainsi de définir un ensemble flou en extension. Dans notre cas, nous construisons trois rasters (Figure 3), représentant autant d'ensembles flous, comme défini dans les équations 7, 8 et 9. Nous avons choisi de rasteriser la couche *ligne électrique* de la BD TOPO, contenant l'ensemble des portions aériennes de lignes à haute et très haute tension. À l'aide de cette couche intermédiaire nous mesurons la distance planimétrique séparant chaque cellule du raster de la cellule la plus proche occupée par une ligne électrique. Cette mesure de distance est utilisée comme paramètre de la fonction d'appartenance présentée en Eq. 7 et dont le résultat est présenté par la Figure 3(a).

Le calcul du degré d'appartenance à l'ensemble des positions situées à une altitude inférieure à celle d'une ligne à haute-tension nécessite, quant à lui, de calculer la différence entre l'altitude de la position et celle des lignes à haute tension. Il s'est avéré nécessaire de calculer une estimation de la hauteur de la ligne

à haute tension en toute cellule traversée par une ligne à haute tension. Nous avons estimé cette valeur à l'aide d'une interpolation linéaire limitée à deux points (les deux pylônes les plus proches de la cellule), avant de rogner ce résultat à l'aide de l'empreinte au sol des lignes à haute tension précédemment calculées. Cette nouvelle donnée, enrichissant la rasterisation des lignes à haute-tension a été utilisée comme paramètre de la fonction d'appartenance présentée en Eq. 8. La Figure 3(b) représente le degré d'appartenance ainsi calculé.

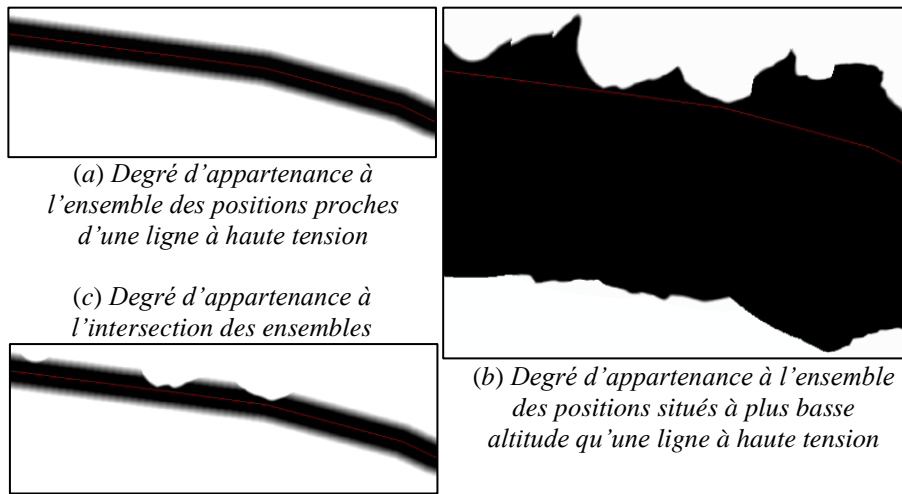


Figure 3. Modélisation d'objets spatiaux flous : approche raster

Les deux ensembles flous (Figures. 3(a) et 3(b) permettent de construire l'ensemble représentant les positions situées *sous une ligne électrique*. La fonction d'appartenance de ce dernier prend trois paramètres (cf. Eq. 9). Nous remarquons que la zone construite est sensiblement différente de celle que nous aurions obtenue si nous n'avions pris en compte la seule distance (Figure 3(a)). Certaines positions, très proches d'une ligne à haute-tension peuvent, en effet, être situées à des altitudes dépassant fortement le sommet des pylônes avoisinants, démontrant l'intérêt de prendre en compte la différence d'altitude.

La seconde implémentation testée est basée sur l'approche utilisée par de Runz (2008) et Zoghلامي et al. (2016). Nous effectuons ici tous nos calculs à l'aide d'une approche vectorielle. Cependant, aucun système d'information géographique ou plus généralement logiciel permettant la manipulation de données spatiales vectorielles ne permet, du moins à notre connaissance, de manipuler des géométries

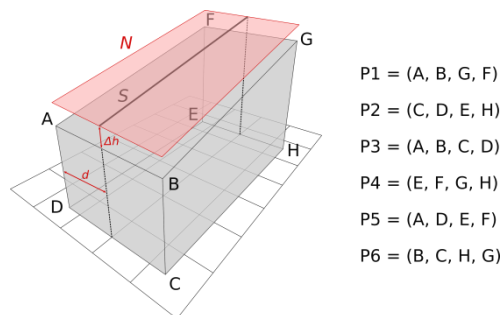


Figure 4. Plans utilisés pour définir une alpha-cut

tridimensionnelles telles que celles que nous souhaitons construire. Nous nous sommes donc orientés vers les outils proposés par la bibliothèque CGAL, spécialisée dans la géométrie algorithmique.

La démarche suivie a consisté à créer des polyèdres, représentant les alpha-cuts tridimensionnelles de l'ensemble flou contenant les positions sous une ligne électrique. Comme illustré par la Figure 4, pour chaque segment S d'une ligne à haute tension, nous définissons six plans, délimitant autant de demi-espaces et dont l'intersection permet de définir un volume fini. Le premier plan (P1) est parallèle au plan N incluant le segment S et une droite horizontale perpendiculaire à S . La différence d'altitude (Δh) entre les plans P1 et N varie en fonction de l'alpha-cut modélisée. Le second plan (P2) représente la limite inférieure du polyèdre, son z est nul et constant. Les plans P3 et P4 représentent l'avant et l'arrière du polyèdre (par rapport à la direction de la ligne électrique). Ils sont perpendiculaires au plan P2 et passent respectivement par le premier et dernier point du segment S . Enfin, les plans P5 et P6 représentent la gauche et la droite du polyèdre. Ils sont verticaux et parallèles au segment S . Comme pour le plan P1, leur distance (d) au segment S varie en fonction de l'isovolume modélisé.

Pour modéliser les alpha-cuts, nous faisons varier la hauteur du plan P2 et l'éloignement des plans P5 et P6 par rapport au segment S . En identifiant les valeurs de hauteur et d'éloignement correspondant au degré d'appartenance défini on peut construire les *alpha-cuts* désirées. La Figure 5(a) montre (sans prise en compte du MNT) trois *alpha-cuts* (0 ; 0,5 et 1) construites à partir d'un segment de ligne à haute-tension. En intersectant ces géométries avec le MNT (Figure 5(b) nous

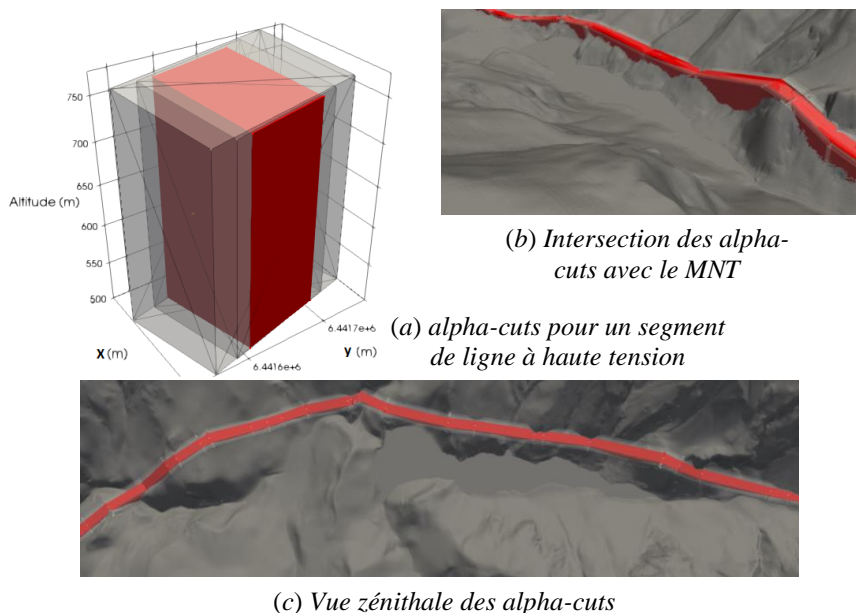


Figure 5. Modélisation d'objets spatiaux flous : approche vectorielle

pouvons projeter les *alpha-cuts* au sol et ainsi construire une carte en deux dimensions (Figure 5(c) représentant les *alpha-cuts* de l'ensemble flou des positions situées sous une ligne haute-tension dans notre aire d'étude.

5.3 Comparaison

Cette double implémentation d'un même élément de localisation a fait apparaître les avantages et limites des deux approches. Notre besoin de travailler en trois dimensions est source de nombreuses complications liées à la difficulté de manipulation de géométries 3D. L'implémentation en *alpha-cuts* a nécessité l'utilisation de la bibliothèque CGAL (aucun SIG n'étant envisageable) et un travail de développement non négligeable (cf. tableau 1), pour un résultat comparable à celui de l'approche raster (cf. figure 6). L'approche par *alpha-cuts* a été totalement automatisée, alors que notre implémentation de l'approche raster nécessite encore plusieurs opérations manuelles pour enchaîner les étapes (cf. tableau 1, la durée des opérations manuelles n'est pas comptabilisée dans le temps d'exécution de l'approche raster).

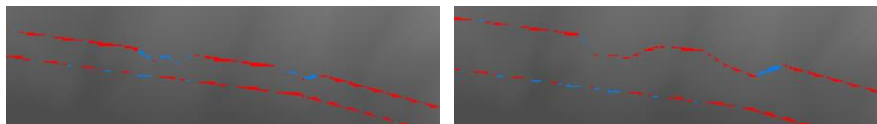


Figure 6 Comparaison des zones construites à l'aide des approches raster et alpha-cuts. En rouge figurent les pixels uniquement présents dans l'estimation par raster et en bleu les zones uniquement présentes dans l'estimation par alpha-cuts. L'image de gauche représente la comparaison des deux noyaux et celle de droite la comparaison des deux supports

La figure 6 illustre les différences d'estimation de la zone « sous une ligne électrique » entre l'approche raster et l'approche par *alpha-cuts*. Ici les différences, représentées sous la forme d'un raster, dont la maille correspond à celle du MNT, sont de l'ordre du pixel. Les deux méthodes aboutissent à des résultats similaires. On peut cependant remarquer que l'approche par raster tend, comparativement à l'approche par *alpha-cuts*, à surévaluer légèrement la zone correspondant à l'élément de localisation modélisé. Mais cette comparaison illustre avant tout les artéfacts nés d'une implémentation imparfaite. L'approche raster offre de meilleurs résultats à proximité de la jointure des segments de ligne, notre implémentation de l'approche par *alpha-cuts* n'opérant pas de traitement particulier en vue de modéliser ces jointures. Inversement l'approche par *alpha-cuts* est plus efficace lorsque l'estimation de la hauteur de la ligne à haute-tension utilisée par l'approche raster est trop grossière, ce qui est notamment le cas lorsque plusieurs lignes sont à proximité. Il s'agit toutefois de problèmes d'implémentation pouvant être corrigés dans les deux cas, même si la quantité de travail supposée nécessaire est plus importante dans le cas de l'approche par *alpha-cuts*.

Dans le cas où les deux approches ne produisent pas d'artéfacts (comme c'est le cas pour la zone représentée par la figure 6), les deux estimations sont extrêmement

proches, ce qui nous pousse naturellement à privilégier l'approche présentant le meilleur ratio qualité de l'estimation / difficulté de mise en place. Il nous semble donc plus pertinent de travailler, comme le propose Vanegas *et al.* (2011), à l'aide de rasters. Les règles utilisées pour définir l'ensemble flou à l'aide de l'approche raster présentent l'avantage d'être simples et peu nombreuses, ce qui laisse également supposer une meilleure capacité de généralisation de la méthodologie.

Tableau 1 Comparaison des temps de développement, d'exécution et estimation des temps d'amélioration des deux approches présentées.

	Raster	Alpha-cuts
Temps de développement	~ 5 h	~ 60 h
Temps d'exécution	~ 2 min	~ 5 min
Estimation de l'importance des développements à venir	+	+++

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté notre démarche visant à construire les zones de présence possible d'un objet dont la position est décrite à partir d'un référentiel spatial indirect à l'aide d'éléments de localisation. Ces derniers ont été modélisés sous la forme de triplets, de manière analogue aux modèles présentés dans la littérature. Nous avons cependant étendu ce modèle en y ajoutant le concept de *relations spatiales étendues*, apportant plus de précision. À partir de ce modèle, nous avons présenté le concept de décomposition des relations spatiales, visant à exploiter les redondances sémantiques des relations spatiales. Nous avons également présenté, les problématiques liées à l'incertitude et l'intérêt d'adopter une démarche de modélisation des relations spatiales non-bivalentes, à l'aide de la théorie des ensembles flous. Pour finir, nous avons proposé une application comparative de deux implémentations de la théorie des ensembles flous, démontrant l'adéquation de l'approche raster à notre problématique.

Nous souhaitons désormais travailler à l'extension du modèle en triplets pour y adjoindre la gestion des descriptions de mouvement (« *j'ai longé la route* »), la prise en compte de la dimension temporelle (« *j'étais* » vs « *je suis* ») ou les référencements chaînés (« *Je suis près d'un pont qui enjambe la rivière* »).

La décomposition des relations spatiales nécessite, quant à elle, un important travail d'analyse, visant à développer une méthodologie d'identification des redondances sémantiques, sur la base d'un recensement des relations spatiales les plus présentes dans notre contexte.

Une autre tâche importante est d'automatiser la définition des seuils. Dans l'exemple présenté ces derniers sont définis empiriquement. Cependant, cette approche pose deux problèmes, le premier étant que les seuils sélectionnés ne sont pertinents que pour un type d'objet de référence donné, le second est qu'il serait

intéressant de faire varier ces seuils localement pour prendre en compte certaines spécificités du terrain. A titre d'exemple, l'élément de localisation « *je suis sous une ligne électrique* » nécessite de prendre en compte tout type de ligne et non plus seulement les lignes à haute-tension, par conséquent il sera nécessaire de faire varier les seuils précédemment présentés en fonction du type de la ligne électrique (dont dépendent sa hauteur et sa largeur). Le second aspect est que dans un contexte montagneux, la hauteur d'une ligne à haute tension par rapport au sol peut varier fortement, au gré des ruptures de pente. On peut postuler qu'il en découle une forte variabilité dans la perception du recouvrement, modélisable par une variation locale des seuils d_S et d_N (cf. eq. 7). Une des pistes envisagée est de recourir à des méthodes d'apprentissage, dont l'application à l'identification de relations spatiales floues a déjà été expérimentée Xu et al. (2006). Bien que cette approche soit séduisante, la nécessaire constitution d'une base d'apprentissage est un défi de taille compte-tenu de l'importance des spécificités locales.

Nous souhaitons également aborder la question de l'insertion de la méthodologie présentée au sein du processus de localisation de la victime. Ici nous avons choisi de calculer directement la zone, mais il serait envisageable d'opter pour une approche itérative, fondée sur des raffinements successifs de la zone estimée. Cette solution, qui peut apporter un gain de performances non négligeable, pose toutefois de nouvelles questions méthodologiques et nous expose au risque de voir apparaître des faux négatifs liés au MAUP (Openshaw, 1984).

A plus long terme, nous souhaitons intégrer la prise en compte de l'incertitude à la méthodologie développée. Comme nous l'avons précédemment expliqué, nous envisageons de traiter l'incertitude (e.g. « *je crois que je suis sous une ligne électrique* ») lors de l'agrégation des zones correspondant aux éléments de localisation, en vue de construire la zone de présence finale de la victime. La prise en compte de l'incertitude nécessite de coupler la théorie des sous-ensembles flou à une théorie permettant de modéliser l'incertitude telle que la théorie des possibilités ou celle des fonctions de croyances.

Bibliographie

- Bejaoui L., Pinet Fr., Bedard Y., Schneider M. (2009). Qualified Topological Relation Between Spatial Objects with Possible Vague Shape. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 23, n° 7, p. 877-921.
- Borillo A. (2009). *L'espace et son expression en français*, Ophrys, Paris.
- Clementini E. (2008). Objects with Broad Boundaries. *Encyclopedia of GIS*. New-York, Springer, p. 793-798.
- Cohn A.G., Gotts N.M. (1996). The "egg-yolk" representation of regions with intermediate boundary. *Geographics Objects With Intermediate Boundary*. London, Taylor & Francis, p. 171-187.
- De Runz C. (2008). Fouilles archéologiques : à la recherche d'éléments représentatifs. *Atelier Fouille de données complexes*, Sofia Antipolis.

- Dilo A. (2006). *Representation of and reasoning with vagueness in spatial information. A system for handling vague objects*. Wageningen University.
- Dilo A., de By R., Stein A. (2007). A System of Types and Operators for Handling Vague Spatial Objects. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 21, n° 4, p. 397-426.
- Egenhofer M., Mark D. (1995). Naive Geography. *International Conference on Spatial Information Theory*, Springer, Berlin.
- Moncla L., Gaio M. (2015). A Multi-Layer Markup Language for Geospatial Semantic. *9th Workshop on Geographic Information Retrieval 2015*, ACM, Paris.
- Olteanu-Raimond A.-M., Davoine P.-A., Gaio M., Gouardères E., Van Damme M.-D., Villanova-Olivier M., Brasebin M., Dominguez C., Duchêne C., Favre O., Mustière S., Devin Fl., le Nir Y., Moncla L., Bouveret S., Genoud Ph., Gensel J., Ziebelin D. (2017). Projet CHOUCAS : Intégration de données hétérogènes et raisonnement spatial pour l'aide à la localisation des victimes en montagne. *Spatial Analysis and GEomatics 2017*, SAGEO 2017, Rouen.
- Openshaw, S., 1984. The Modifiable Areal Unit Problem. Pustjovsky J. (2017). ISO-Space: Annotating Static and Dynamic Spatial Information. *Handbook of Linguistic Annotation*. Netherlands, Springer, p. 989-1024.
- Schneider M. (2008). Fuzzy Spatial Data Types for Spatial Uncertainty Management in Databases. *Handbook for Research on Fuzzy Information Processing in Databases*. Hershey, Information Science Reference, p. 490-515.
- Schneider M. (1999). Uncertainty Management for spatial data in databases: fuzzy spatial data types. *Advances in Spatial Databases*. Springer, Berlin, p. 330-351.
- Tøssebro E., Nygård M. (2002). An advanced discrete model for uncertain spatial data. *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, p. 37-51.
- Vanegas M.-C., Bloch I., Inglada J. (2011). A Fuzzy Definition of the Spatial Relation "Surround". *EUSFLAT Conference 2011*, Atlantis Press, Aix-les-Bains.
- Vasardani M., Timpf S., Winter S., Tomko M. (2011). From Descriptions to Depictions: A Conceptual Framework. *Spatial information theory*, Springer, Berlin.
- Xu J., Yao C. (2006). Formalizing natural-language spatial relations descriptions with fuzzy decision tree algorithm. *Geoinformatics 2006*. SPIE. Wuhan.
- Zadeh L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, n° 3, p. 338-353.
- Zoghalmi A., de Runz C., Herman A. (2016). F-perceptory : an Approach for Handling Fuzziness of Spatiotemporal data in Geographical Databases. *International Journal of Spatial, Temporal and Multimedia Information Systems*, vol. 1, n° 1, p. 30-62.