Modélisation et génération de bases de données géographiques imprécises pour les systèmes relationnels

Extension de F-Perceptory et dérivation automatique de modèles

Besma Khalfi [1,2], Cyril de Runz [1,3,4], Sami Faiz [2], Herman Akdag [1]

1. *Laboratoire LIASD, Université Paris 8*
   2 rue de la liberté 93526 Saint -Denis cedex, France
   \{khalfi,derunz,akdag\}@ai.univ-paris8.fr
2. *Laboratoire LTSIRS, Université de Tunis el Manar*
   BP 37, LE BELVEDERE 1002 TUNIS
   khalfi.besma@hotmail.com;sami.faiz@insat.rnu.tn
3. *Laboratoire CReSTIC, Université de Reims Champagne-Ardenne*
   IUT de Reims, Chemin des Rouliers, CS30012 51687 REIMS CEDEX 2
   cyril.de-runz@univ-reims.fr
4. *CNRS, LIP6, UMR7606,*
   4 place Jussieu, 75005 Paris, France
   cyril.de-runz@lip6.fr

RÉSUMÉ. *Les données géospatiales sont imprécises par nature : leur qualification et leur quantification sont soit liées à des approximations, soit à des évaluations subjectives. Il est intéressant de développer des méthodes de conception dédiées. Cela a conduit récemment à la proposition de l'approche F-Perceptory. L'approche n'est cependant appropriée que pour modéliser des espaces homogènes de formes simples ne permettant pas de modéliser des espaces complexes avec des structures composites. Notre proposition étend F-Perceptory et définit un processus de dérivation automatique de modèles permettant de générer la base de données relationnelles.*

ABSTRACT. *Geospatial data are imprecise by nature : their qualification and quantification are either linked to approximations or to subjective assessments. It is important to develop design methods that are dedicated to imprecise spatiotemporal data. This leads to the recent proposal of the F-Perceptory approach. F-Perceptory is appropriate to represent homogeneous spaces*

based on simple shapes and does not model complex spaces having composite structures. The proposal extends F-Perceptory and defines an automatic models mapping process in order to generate the relational database.

MOTS-CLÉS : *F-Perceptory, données floues, modélisation, géométries composites floues.*

KEYWORDS: *F-Perceptory, fuzzy data, modeling, fuzzy composite geometries.*

1. Introduction

Les recherches autour du stockage et de l'intégration des données spatiales constituent un volet qui contribue à la structuration, l'intégrité et la qualité des données recueillies. Par ailleurs, de nombreux projets, menés dans différents contextes allant de l'agronomie (e.g. le projet Observox (Zayrit, Desjardin, 2012), à la géographie (notamment pour l'étude des phénomènes de marge et de frontières (De Ruffray, 2007)) en passant par l'archéologie (e.g. les projets SIGRem/ArcheoChamps (Desjardin *et al.*, 2012)), ont montré l'importance de l'utilisation de représentations gérant l'imperfection des données géographiques.

Cependant, la prise en compte de l'imperfection des données géographiques, particulièrement de l'imprécision, ajoute une réelle complexification. Plusieurs méthodes et outils ont été développés pour répondre aux défis des besoins réels de la géomatique afin de considérer la nature imparfaite (i.e. imprécision, incertitude, incomplétude) des données géographiques et de l'intégrer dans le processus de modélisation, de stockage et d'analyse. Ainsi, des extensions aux modèles conceptuels classiques ont été proposées à l'instar de celles basées sur le modèle Entité-Relation (Zvieli, Chen, 1986 ; Chen, Kerre, 1998), celles sur le modèle objet (Ma, 2005 ; Sicilia, Garcia-Barriocanal, 2006) ou encore sur les modèles spatiotemporels (Pantazis, Donnay, 1998 ; Shu *et al.*, 2003 ; Zoghlami, 2016).

L'approche F-Perceptory dont les principes et les concepts formels ont été définis dans (Zoghlami, 2016), définit un profil UML pour la modélisation conceptuelle de données spatiotemporelles imprécises. Elle modélise les géométries primitives imprécises (point flou, ligne floue et polygone flou) qui présentent des espaces homogènes. L'approche F-Perceptory ne considère pas initialement les formes composites des objets géographiques. Cependant, le concepteur peut avoir besoin de modéliser des formes spatiales plus complexes, basées sur des structures composites.

Dans cet article, nous présentons les géométries composites floues et étudions leur modélisation conceptuelle. Afin de fournir un modèle de bases de données géographiques floues cohérentes, nous proposons un certain nombre de règles de transformation afin de dériver le modèle conceptuel de données en schéma physique de base de données. Les règles de transformation sont intégrées dans un processus automatique de dérivation de modèles. La version améliorée de F-Perceptory a été implémentée

sous forme de prototype de modélisation, intégré dans l'atelier de génie logiciel libre Modelio [1].

L'article est organisé comme suit : la section 2 présente le positionnement, les fondements et les limites de l'approche F-Perceptory. La section 3 présente la solution proposée pour modéliser les objets géographiques flous à géométries composites et discute de leur dérivation en UML. La section 4 présente un exemple d'application à travers le prototype développé. Enfin, nous concluons et proposons de futures recherches.

2. F-Perceptory

2.1. Positionnement

Depuis son introduction en 1965, la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965) a été intégrée dans de nombreuses approches afin de traiter des informations imparfaites, essentiellement pour la quantification de l'imprécision. En appliquant la théorie des ensembles flous, de nombreuses propositions ont étendu le modèle entité-relation (ER) en introduisant le flou pour les entités, les relations, les attributs et les instances (Zvieli, Chen, 1986 ; Chen, Kerre, 1998 ; Ma *et al.*, 2001). D'autres travaux ont porté sur l'extension du modèle orienté objet (Yazici, Akkaya, 2000 ; Shu *et al.*, 2003 ; Ma, 2005 ; Sicilia, Garcia-Barriocanal, 2006) en proposant diverses extensions concernant les classes floues, les règles floues, la fonction d'appartenance, les associations floues entre les classes, etc.

En ce qui concerne les données géographiques, de nombreuses méthodes ont étendu les modèles conceptuels usuels pour modéliser les données spatiotemporelles telles que CONGOO (Pantazis, Donnay, 1996), MADS (Parent *et al.*, 1997) et PERCEPTORY (Bedard, 1999). Cependant, ces méthodes ne prennent pas en compte la modélisation des données géographiques floues.

En considérant les problèmes d'imperfection, certains chercheurs ont essayé de proposer des solutions pour la modélisation des données géographiques floues (Parent *et al.*, 1997 ; Miralles, 2006). L'approche F-Perceptory (Zoghlami, 2016) a été récemment proposée pour la modélisation de données spatiotemporelles floues.

2.2. Fondements théoriques

Les observations de l'espace révèlent la complexité et la variabilité de la réalité géographique. Contrairement aux espaces géographiques bien définis ayant des limites précises, nettes et linéaires, beaucoup d'autres situations mettent en lumière des objets

1. Modelio est un outil de modélisation complet. Il supporte la norme UML 2.4.1, s'appuie intégralement sur le langage Java et dispose d'un système d'extensions permettant d'étendre ses fonctionnalités (www.modeliosoft.com).

géographiques avec des limites plus ou moins nettes et continues. L'hypothèse fondamentale de la modélisation floue porte sur le fait que chaque objet présente un noyau et des bordures. Le noyau est la partie où tous les éléments en son sein appartiennent pleinement au dit objet alors que les bordures forment la partie où l'appartenance à l'objet est partielle et possiblement graduée.

Par conséquent, la question « Comment caractériser un territoire imprécis ? » est liée aux outils de représentation en termes de modèles mathématiques et de modèles informatiques. La théorie des ensembles flous est l'une des solutions mathématiques définies pour représenter l'imprécision. Grâce à elle, il est possible d'exprimer une appartenance partielle d'une valeur à un ensemble. En effet, si E est un ensemble flou et e est un élément de E, la proposition « e est un membre de E » n'est pas nécessairement soit vraie soit fausse. Elle peut être vraie dans une certaine mesure. L'ensemble E est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_E prenant ses valeurs dans [0, 1].

Pour stocker un ensemble flou, une solution possible est de le discrétiser de sorte qu'un nombre fini de α-coupes soit pris en considération afin de le représenter. Une α-coupe est l'ensemble des valeurs du domaine (l'ensemble des e) ayant un degré d'appartenance supérieur ou égal à α ($\mu_E(e) \geq \alpha$). La Figure 1 illustre un exemple de discrétisation de l'ensemble E en trois α-coupes.

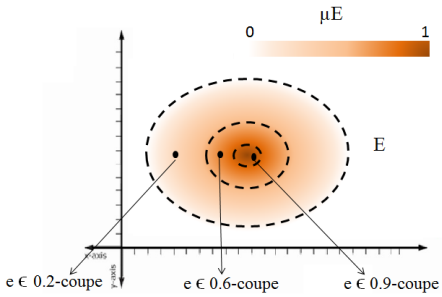


Figure 1. Un ensemble flou E avec trois α-coupes

Une α-coupe de l'ensemble flou E est notée E_α. E_1 est appelée noyau ou cœur de E. E_0, appelée support de E, est l'ensemble des éléments ayant un degré d'appartenance strictement supérieur à 0.

2.3. Langage pictogrammique

L'approche F-Perceptory est basée sur le langage PictograF (Bedard, 1999) et sur les concepts de Fuzzy UML (Ma, 2005) pour définir son langage pictogrammique propre à la modélisation de données spatiotemporelles imprécises. Cette approche considère, en effet, deux types de données imprécises : flou et possibiliste. Pour le cas flou, chaque objet a une définition restrictive avec un degré d'appartenance plus élevé et un certain nombre de définitions moins restrictives avec un degré d'appartenance

inférieur. Pour le cas possibiliste, chaque objet possède un ensemble de définitions possibles avec des valeurs de confiance. Dans le reste de l'article, nous considérons le cas des données floues.

F-Perceptory met en œuvre les principaux concepts du diagramme de classes UML (classes, attributs, associations, généralisation, contraintes et notes). L'approche est utilisée pour définir un diagramme de classes floues. F-Perceptory permet de modéliser l'imprécision liée à la spatialité, la temporalité et celle des attributs quantitatifs non géométriques des objets spatiotemporels à l'aide de représentations floues dédiées :

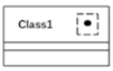
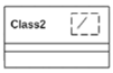
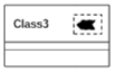
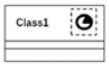
– Pour modéliser la spatialité imprécise, F-Perceptory distingue trois formes spatiales simples : le *point flou*, le *polygone flou* et la *ligne floue*.

– Chaque espace géographique ou phénomène géo-localisé peut avoir une information approximative sur son existence temporelle. F-Perceptory considère l'existence floue instantanée ("*Date floue*") et l'existence floue durable sur un intervalle de temps ("*Période floue*").

– F-Perceptory couvre également l'imprécision sur les valeurs quantitatives (i.e. les attributs dont la valeur appartient à un ensemble flou). Pour ce faire, le nom de l'attribut est précédé par le mot clé "*fuzzy*".

Le tableau 1 présente les pictogrammes F-Perceptory associés à l'imprécision des données géographiques.

Tableau 1. Modélisation pictogrammique de F-Perceptory

Modèle F-Perceptory	**Description**	**Exemple**
	Classe d'objets avec une forme point flou	Centre ville (0 dimension)
	Classe d'objets avec une forme ligne floue	Segment de route ou une rivière (1 dimension)
	Classe d'objets avec une forme polygone flou	Villes, parcs, bâtiments (2 dimension)
	Classe d'objets avec une date floue	Date d'accident (0 dimension)
	Classe d'objets avec une période floue	Période d'existence du patrimoine (1 dimension)

2.4. Dérivation en UML

Pour construire une base de données objet-relationnelles et la remplir avec des données géographiques imprécises, la modélisation conceptuelle doit arriver à une

définition UML correcte du modèle flou. La Figure 2 illustre un exemple de dérivation d'un modèle F-Perceptory en UML. Le modèle F-Perceptory présente une classe d'objets flous à géométrie simple de type polygone flou.

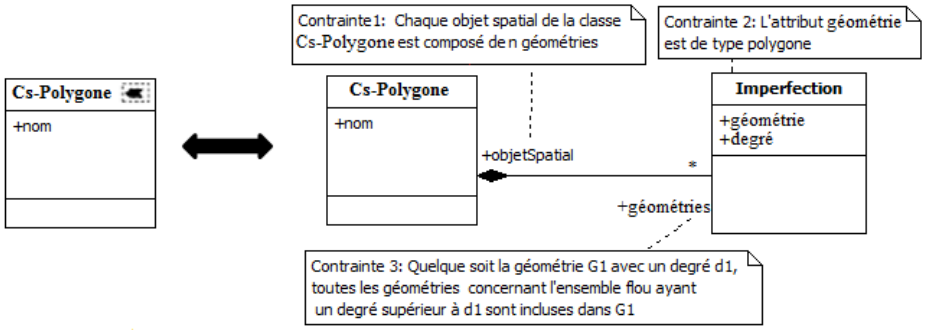


Figure 2. Dérivation UML d'une classe d'objets flous à géometrie polygone flou

Selon (Zoghlami, 2016), chaque objet flou peut être représenté par un ensemble de n α-coupes. La modélisation UML d'une classe d'objets flous génère une nouvelle classe pour la modélisation de l'ensemble des α-coupes appartenant à chaque objet flou. Par conséquent, la classe d'objets flous *Cs-Polygone* est transformée en UML en une classe non stéréotypée ayant une relation de composition avec une nouvelle classe appelée *Imperfection*. La classe *Imperfection* permet de représenter des α-coupes sur un ensemble flou de géométries polygonales. C'est une classe spatiale possédant un attribut *géométrie* renseignant sur la géométrie de chaque α-coupe et un attribut *degré* présentant le degré d'appartenance de l'α-coupe à l'objet *Cs-Polygone*. Dans la relation de composition, le rôle *géométries* référence l'ensemble des α-coupes de chaque objet spatial flou qui lui est le rôle référençant chaque instance de *Cs-Polygone* .

La dérivation en UML engendre la définition de trois contraintes essentielles :

– La première contrainte est liée à la structure de chaque objet spatial flou. Chaque objet *Cs-polygone* doit être composé de n géométries (avec n = nombre des α-coupes).

– La deuxième contrainte se réfère à l'ensemble des α-coupes qui représentent l'objet spatial flou. Les α-coupes doivent former un ensemble flou connexe et normalisé, ce qui signifie que : 1) indépendamment de la géométrie $G1$ de degré $d1$, toutes les géométries autour de l'ensemble flou ayant un degré supérieur à $d1$ sont incluses dans $G1$; 2) les formes sont des formes géométriques connexes ; et 3) le degré d'appartenance maximum est égal à 1.

– La troisième contrainte est liée à la géométrie de chaque α-coupe. Dans le cas d'un objet de type polygone flou, la géométrie de chaque α-coupe doit être de type *polygone*. Dans le cas d'un objet de type point flou, la géométrie de l'α-coupe est de type *point* si le degré d'appartenance est égal à 1, sinon la géométrie de l'α-coupe est de type *polygone*. Dans le cas d'un objet de type ligne floue, la géométrie de l'α-coupe est de type *ligne* si le degré d'appartenance est égal à 1, sinon la géométrie de l'α-coupe est de type *polygone*.

2.5. Limites

L'approche F-Perceptory gère la modélisation des objets géographiques flous à géométries simples. Cependant, selon les contraintes définies sur les propriétés géométriques des objets spatiaux (forme, composition, taille) ou sur l'échelle utilisée (grande ou limitée), nous distinguons divers types de géométries composites dont la modélisation manque dans la définition initiale de F-Perceptory (cf. Figure 3). Ces types décrivent, par exemple, des objets géographiques avec une géométrie facultative (i.e. la géométrie peut-être définie ou pas) ou des objets géographiques dont la géométrie est composée d'une collection de formes de même dimension (e.g. multipoint).

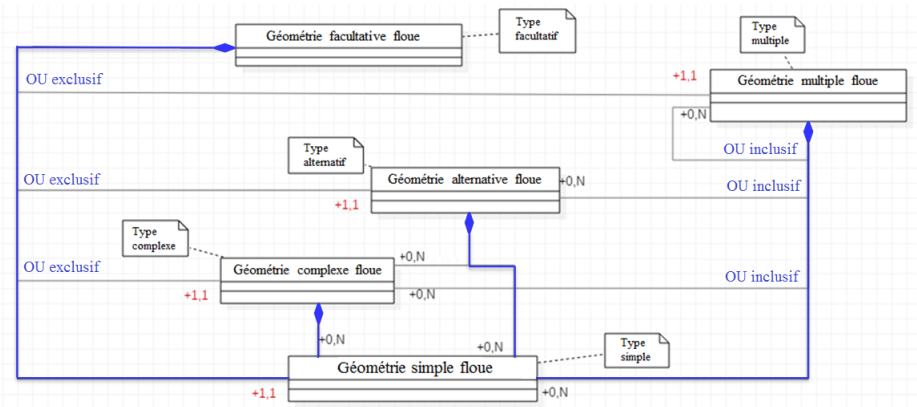


Figure 3. Les types de géométries floues composites pour les objets géographiques : Figure adaptée de (Bedard et al.*, 2002)*

Comme illustré par la Figure 3, les géométries composites floues peuvent être basées sur une composition de formes simples (les relations de composition en bleu) ou composées de formes elles-même composites (les relations de compositions en gris). Dans ce travail, nous considérons le cas des géométries composites basées sur des formes simples.

3. Patrons de conception de géométries composites floues

Nous donnons, à travers des exemples, la présentation pictogrammique des classes d'objets à géométries composites floues et présentons leur transformation en UML. La transformation introduit de nouvelles classes et un certain nombre de contraintes d'intégrité qui sont, dans cette section, exprimées textuellement.

3.1. Patron de conception de géométrie facultative

Implicitement, la multiplicité par défaut des pictogrammes dans les classes est (1, 1). Elle n'est pas exprimée visuellement. Il est supposé que toutes les instances d'une

classe d'objets géographiques ont des propriétés géométriques (forme et cordonnées). Le modèle « *facultatif* » est utilisé lorsque la forme de certaines instances selon certains critères est facultative (Bedard, 1999), comme par exemple, lorsqu'il n'est pas possible d'obtenir la forme géométrique de toutes les instances. Par conséquent, nous mettons la multiplicité (0, 1) à côté du pictogramme pour indiquer que certaines instances peuvent être stockées sans propriétés géométriques.

Considérons, par exemple, la classe d'objets flous *Ville* (cf. Figure 4). En fonction des données disponibles, certaines villes seront stockées dans la base de données sans propriétés géométriques tandis que d'autres le seront par l'intermédiaire d'un polygone flou.

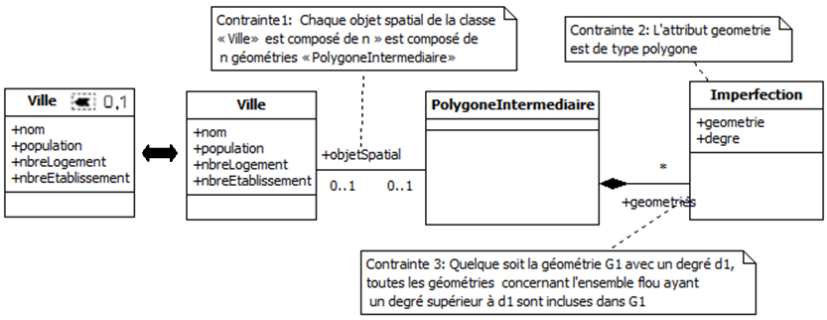


Figure 4. Dérivation en UML d'une classe d'objets flous à géométrie facultative

La transformation en UML d'une classe d'objets à géométrie facultative de type polygone flou introduit trois classes et un certain nombre de contraintes d'intégrité (cf. Figure 4). La classe *Ville* introduit toutes les villes qui seront stockées dans la base de données. La classe *PolygoneIntermediaire* ne présente que les villes floues qui satisfont les restrictions de l'utilisateur/fournisseur (objets dont on a l'information sur leur forme). La classe *Imperfection* définit les α-coupes représentant les villes floues (objets *PolygoneIntermédiaire*). La relation d'association entre la classe *Ville* et la classe *PolygoneIntermédiaire* présente la multiplicité (0, 1) : si une instance *Ville* satisfait la condition, elle est considérée comme un objet spatial flou et une forme de type polygone flou lui sera attribuée. Ainsi, un certain nombre d'α-coupes présentées par la classe *Imperfection* définit cette instance ; sinon, l'instance n'est pas considérée comme un objet spatial et n'a que les propriétés de la classe *Ville* (les attributs *nom*, *population*, *nbreLogement* et *nbreEtablissement*).

3.2. Patron de conception de géométrie alternative

Le modèle « *alternatif* » présente des géométries mutuellement exclusives. La géométrie d'une entité géographique peut être représentée par une dimension ou une autre. Plus précisément, une seule forme est numérisée pour chaque instance d'une classe d'objets géographiques. Dans ce cas, nous utilisons le pictogramme alternatif : c'est la concaténation des pictogrammes possibles ; il n'y a pas d'espace entre les

pictogrammes et leur ordre n'a aucun sens (Bedard, 1999). Le modèle « *alternatif* » présente un « OU EXCLUSIF » entre les pictogrammes.

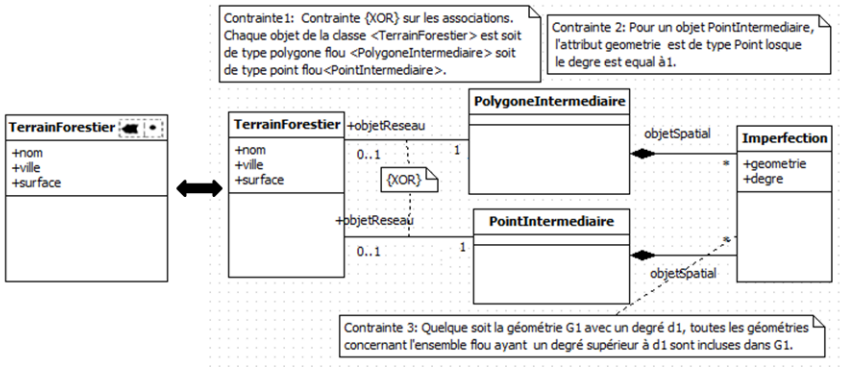


Figure 5. Dérivation en UML d'une classe d'objets flous à géométrie alternative

Prenant l'exemple d'un terrain forestier ; il peut être un parc urbain et il est numérisé ainsi par une géométrie de type point ou il peut être un parc régional et il est numérisé par géométrie de type polygone. En modélisation floue, la classe d'objets flous *TerrainForestier* est modélisée par deux pictogrammes : un polygone flou et un point flou (cf. Figure 5).

Dans la modélisation UML, nous définissons les classes *PolygoneIntermediaire* et *PointIntermediaire* respectivement pour les terrains forestiers de géométrie polygone flou et les terrains forestiers de géométrie point flou. Chaque instance *TerrainForestier* a deux formes possibles mais dont une seule forme est assignée. Cela veut dire que les deux associations s'excluent mutuellement. Cela est traduit par l'ajout de la contrainte $\{XOR\}$ entre les deux associations. La classe *Imperfection* présente les α-coupes de chaque objet flou (objet de type *PolygoneIntermédiaire* ou de type *PointIntermédiaire*).

3.3. Patron de conception de géométrie multiple

Le modèle « *multiple* » indique une situation où plusieurs formes sont numérisées pour chaque instance d'une classe d'objets géographiques (Bedard, 1999). Il peut être utilisé lorsqu'une seconde forme des instances d'objets peut être dérivée de leur première forme. Par exemple, une municipalité peut être modélisée par son centroïde et encore un polygone représentant ses frontières. Le centroïde peut être dérivé du polygone. Le modèle « *multiple* » est potentiellement utile lorsque les formes souhaitées ne peuvent être déduites l'une de l'autre, de sorte que la deuxième forme est dérivée à partir de la première forme de la même instance d'objet. Par exemple, une municipalité peut être modélisée par un centre-ville et un polygone : le centre-ville n'est pas dérivé du polygone (son centroïde).

Considérons l'exemple ci-après d'une classe d'objets flous *segment de route* dont la géométrie peut être modélisée avec une forme de type polygone si l'utilisateur veut montrer les frontières (à grande échelle) et une forme linéaire si l'utilisateur veut les représenter par leur lignes médianes (petite échelle).

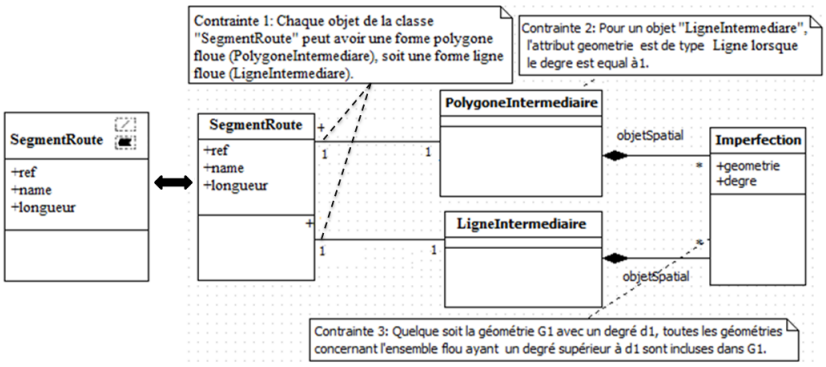


Figure 6. Dérivation en UML d'une classe d'objets flous à géométrie multiple

Pour chaque instance de segment de route floue, la géométrie est stockée dans la base de données à la fois par une forme de type polygone flou et une forme de type ligne floue.

La dérivation en UML de la classe *SegmentRoute* (cf. Figure 6) introduit des associations (un à un) entre la classe *SegmentRoute* et les classes { *LigneIntermediaire*, *PolygoneIntermediaire* }. Chaque objet *SegmentRoute* a une instance de type ligne floue et une instance de type polygone flou. Chaque objet *LigneIntermediaire* et *PolygoneIntermediaire* est composé de n α-coupes modélisées par la classe *Imperfection*. En ce qui concerne les contraintes d'intégrité, le modèle résultant définit toutes les contraintes discutées dans la section 2.4. En particulier, pour un segment de route représenté par une géométrie de type ligne floue (objet *LigneIntermediaire*), l'α-coupe a une géométrie de type ligne si le degré d'appartenance est égal à 1, sinon l'α-coupe a une géométrie de type polygone.

3.4. Patron de conception de géométrie agrégée

Le modèle « *agrégé* » présente des agrégations de géométries. La géométrie de la classe d'objets géographiques peut être une agrégation (1) de formes de même dimension (i.e. de formes similaires) ou (2) de formes de dimensions différentes (i.e. de formes hétérogènes).

Pour une agrégation de formes similaires (une agrégation simple selon (Bédard *et al.*, 2004)), au lieu d'utiliser des pictogrammes multiples de même forme, nous ajoutons la multiplicité (1, N) à côté du pictogramme choisi. Par exemple, un réseau routier flou est composé de plusieurs segments linéaires flous (cf. Figure 7). La classe

ReseauRoutier a un pictogramme 1-dimension (ligne floue) suivi d'une multiplicité (1, N).

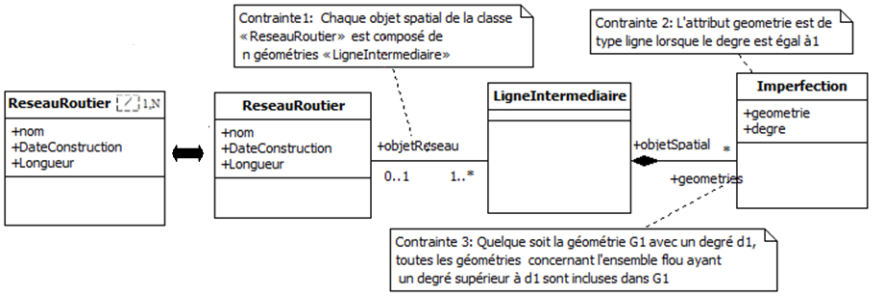


Figure 7. Dérivation en UML d'une classe d'objets flous à géométrie agrégée (cas d'agrégation monopictogrammique)

Pour une agrégation de formes hétérogènes (une agrégation complexe selon (Bédard *et al.*, 2004)), chaque instance est simultanément représentée par plusieurs formes. Par exemple, un réseau hydrographique flou est composé de rivières floues et de lacs flous. Le réseau hydrographique flou est modélisé par un pictogramme composé de polygone flou (pour modéliser les lacs) et de ligne floue (pour modéliser les rivières).

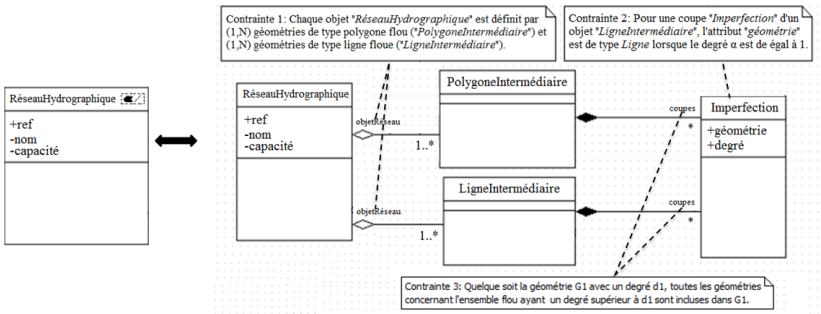


Figure 8. Dérivation en UML d'une classe d'objets flous à géométrie agrégée (cas d'agrégation multipictogrammique)

4. Exemple d'application

Nous avons mis en place un prototype de modélisation de bases de données géographiques floues baptisé F-Perceptory. Il est proposé sous l'outil logiciel Modelio dans lequel les utilisateurs peuvent créer, éditer et visualiser des diagrammes à travers un ensemble d'interfaces conceptuelles. Afin d'assurer la cohérence structurelle et sémantique de données floues dans la base de données, le prototype F-Perceptory est doté d'un processus de dérivation automatique de modèles, à partir du modèle conceptuel flou jusqu'à le script SQL. Basé sur un ensemble de règles de transformation, le

processus assure la transformation de toutes les spécifications de données structurelles et sémantiques des données géographiques floues et toutes les contraintes d'intégrité classiques sur les classes et les attributs.

4.1. Diagramme de classes floues

Pour créer un diagramme de classes floues, des menus contextuels et des boîtes de dialogue s'affichent à l'utilisateur lui permettant d'accéder à un ensemble d'actions possibles sur l'élément en cours (classe ou attribut), comme l'ajout de stéréotypes aux classes (à travers des pictogrammes renseignant sur le type de la géométrie ou la multiplicité), la modification et la suppression de stéréotypes, etc. Pour des contraintes d'implémentation, les pictogrammes se situent à droite du nom de la classe et les multiplicités s'ajoutent à gauche des pictogrammes.

La Figure 9 illustre un exemple de modélisation des réseaux hydrographiques à travers les villes. Les villes sont divisées en certaines régions hydrographiques dont chaque région contient un nombre de bassins versants. Chaque bassin versant peut avoir un réseau hydrographique. Le réseau hydrographique peut-être composé d'un certain nombre de cours d'eau (e.g. rivières, lignes de crète) et de zones exutoires (lacs).

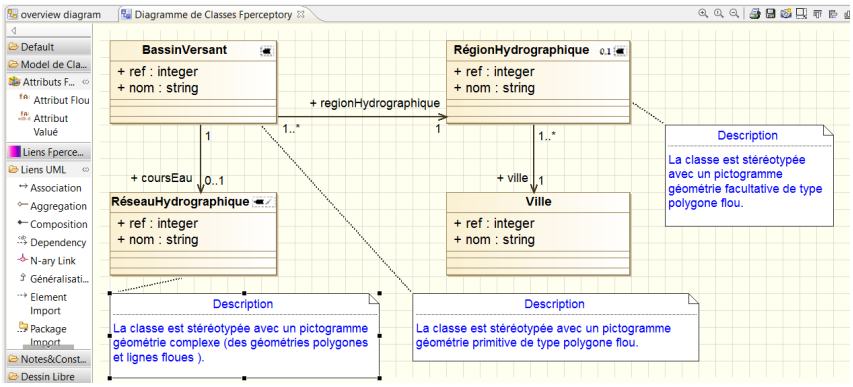


Figure 9. Diagramme de classes floues avec le prototype F-Perceptory

Le diagramme de classes floues F-Perceptory montre les régions hydrographiques ayant une géométrie facultative de type polygone flou (classe stéréotypée avec le pictogramme polygone flou et la multiplicité (0,1)), les bassins versants comme des espaces de type polygone flou (classe stéréotypée avec le pictogramme polygone flou), les réseaux hydrographiques comme des objets flous complexes (la classe est stéréotypée avec un pictogramme flou composé de polygone et de ligne) et enfin, les villes qui sont présentées en tant qu'entités non floues. Le diagramme dispose de deux classes avec des géométries composites floues, une classe avec une géométrie simple floue et une classe UML non stéréotypée.

4.2. Dérivation du diagramme de classes UML

Pour pouvoir gérer les données imprécises dans une base de données spatiales (objet-relationnelles), le modèle flou est transformé en un modèle UML (cf. Figure 10). En appliquant les règles de transformation discutées dans la section 2.4, cela implique la génération automatique de nouvelles classes et relations (en magenta) et d'un ensemble de contraintes d'intégrité exprimées dans le langage de contraintes orienté-objet OCL (*Object Constraint Language*)(en rouge). Notre objectif étant la transformation en UML standard, nous n'avons ni travailler avec l'OCL spatial, ni avec l'OCL spatial flou (Bejaoui *et al.*, 2010).

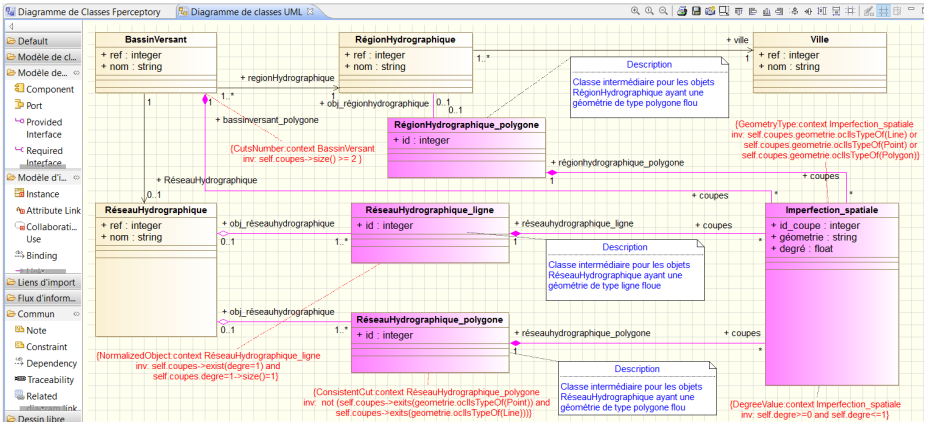


Figure 10. Diagramme de classes UML résultat de la transformation du diagramme de classes floues

Le diagramme UML ainsi généré comporte les éléments suivants :

– La classe *RéseauHydrographique* est une classe à géométrie complexe floue. En UML, elle agrège une classe intermédiaire à géométrie polygone flou (*RéseauHydrographique_polygone*) pour représenter les zones exutoires et une classe intermédiaire à géométrie ligne floue (*RéseauHydrographique_ligne*) pour représenter les cours d'eau.

– Les classes *RéseauHydrographique_polygone* et *RéseauHydrographique_ligne* sont floues. Elles ont chacune une relation de composition avec la classe *Imperfection_spatiale*. Cette relation permet de représenter les α-coupes de chaque objet flou définit dans les classes *RéseauHydrographique_polygone* et *RéseauHydrographique_ligne*.

– La classe *BassinVersant* est un polygone flou. Par conséquent, chaque objet bassin versant est composé de n α-coupes de type polygone ; elles sont représentées par la classe *Imperfection_spatiale*.

– La classe *RégionHydrographique* est un polygone flou facultatif. La classe *RégionHydrographique_polygone* présente les régions hydrographiques auxquelles est affectée une forme de type polygone flou.

– Les contraintes d'intégrité liées aux classes floues sont intégrées dans la vue "*notes and constraints*" de l'AGL. Certaines d'entre elles sont affichées dans le diagramme. Nous donnons un exemple illustré par la Figure 11 qui vérifie la contrainte de normalisation pour les objets cours d'eau représentés par la classe *RéseauHydrographique_ligne*. Chaque objet *RéseauHydrographique_ligne* doit avoir une seule α-coupe dont le degré α est égal à 1.

```
{NormalizedObject:context RéseauHydrographique_ligne
inv: self.coupes->exist(degre=1) and
self.coupes.degre=1->size()=1}
```

Figure 11. Contrainte OCL de la normalisation des instances de la classe RéseauHydrographique_ligne

À ce stade, il convient de noter que Modelio n'est pas basé sur un modèle de données spatiales, donc il ne gère pas les types de données spatiales comme *Geometry*, *Point*, *Polygon* et *Line*. L'attribut géométrique de la classe *Imperfection_spatiale* est, alors, mis par défaut avec le type de données chaîne de caractère (*String*). Nous proposons de le transformer en un type géométrique (*geography*) lors de la dérivation du schéma logique en script SQL pour le SGBD PostgreSQL/PostGIS.

4.3. Dérivation du schéma relationnel

Le prototype donne également la possibilité de générer le modèle relationnel de la base de données. Modelio fournit un module appelé « *PersistantProfile* » qui permet de dériver un modèle UML vers un schéma relationnel. A partir du schéma relationnel généré, nous pouvons ajouter d'autres contraintes classiques, comme par exemple, la contrainte d'unicité (*PrimaryKey*) pour chaque classe.

4.4. Dérivation du script SQL

Le prototype permet de dériver, à partir du schéma relationnel, le modèle de base de données physique sous forme d'un script SQL. C'est un script écrit en PL/pgSQL pour le SGBD spatial PostgreSQL/PostGIS. Cette dérivation permet de traduire automatiquement le type de données « *String* » de l'attribut *géometrie* de la classe *Imperfection_spatiale* en type de données « *Geography* ».

La dérivation automatique du schéma relationnel permet de générer un ensemble de tables et des contraintes d'intégrité qui peuvent être classiques (clés primaires, clés étrangères) ou des déclencheurs exprimés en langage procédural PL/SQL.

Nous donnons, ci-après, le résultat de la transformation de la contrainte de normalisation de chaque objet flou cours d'eau, appliquée sur la classe *RéseauHydrographique_ligne* (cf. Figure 12). Il s'agit d'un déclencheur qui vérifie que l'ensemble des α-coupes présentant chaque objet *RéseauHydrographique_ligne* contient une seule α-

coupe restrictive dont le degré d'appartenance = 1 et d'autres α-coupes ayant le degré d'appartenance $\neq$ 1, sinon, le déclencheur renvoie une exception.

```
--Liste des triggers concernant la classe réseauhydrographique_ligne: nombre=4
--Trigger pour la contrainte NormalizedObject:
CREATE or replace FUNCTION verify_normalization()
RETURNS trigger AS $verify_normalization$
DECLARE
coupe Imperfection_spatiale%rowtype;
BEGIN
  SELECT into coupe
  FROM Imperfection_spatiale
  where (
    Imperfection_spatiale.réseauhydrographique_ligne = new.réseauhydrographique_ligne
    AND Imperfection_spatiale.degré = 1
  );
  IF NOT FOUND THEN
      RAISE EXCEPTION 'L''objet % n''est pas normalisé', new.réseauhydrographique_ligne;
  END IF;
RETURN NEW;
END;
$verify_normalization$ LANGUAGE plpgsql;
CREATE Trigger trigger_NormalizedObject AFTER INSERT ON Imperfection_spatiale
                FOR EACH ROW  EXECUTE PROCEDURE verify_normalization();
...
```

Figure 12. Déclencheur PL/SQL pour la vérification de la normalisation des instances de la classe RéseauHydrographique_ligne

5. Conclusion

Nous avons présenté une extension de F-Perceptory pour la modélisation des géométries composites. La version étendue est mise en œuvre à travers un prototype afin de supporter les utilisateurs dans la modélisation conceptuelle de données floues. Un processus de dérivation automatique de modèles est également implémenté afin de générer le modèle de la base de données spatiales pour le système PostgreSQL/PostGIS.

Nous avons accordé, dans ce papier, une attention particulière à la spatialité floue. Nous envisageons de compléter notre démarche par l'ajout de la modélisation de la temporalité floue et par une étude pour la considération dans les modèles des relations topologiques entre objets flous.

Bibliographie

Bedard Y. (1999). Visual modelling of spatial databases : towards spatial PVL and UML. *Geomatica*, vol. 53, n° 2, p. 169–186.

Bédard Y., Larrivée S., Proulx M.-J., Nadeau M. (2004). Modeling geospatial databases with plug-ins for visual languages: A pragmatic approach and the impacts of 16 years of research and experimentations on Perceptory. In *Proceedings of international conference on conceptual modeling*, p. 17–30.

Bedard Y., Proulx M.-J., Larrivée S., Bernier E. (2002). Modeling multiple representations into spatial data warehouses : a UML-based approach. In *Symposium sur la Théorie, les Traitements et les Applications des Données Géospatiales.*

Bejaoui L., Pinet F., Schneider M., Bédard Y. (2010). Ocl for formal modelling of topological constraints involving regions with broad boundaries. *GeoInformatica*, vol. 14, n° 3, p. 353–378.

Chen G., Kerre E. (1998). Extending ER/EER concepts towards fuzzy conceptual data modeling. In *Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 2, p. 1320–1325.

De Ruffray S. (2007). *L'imprécision et l'incertitude en géographie. l'apport de la logique floue aux problématiques de régionalisation*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université Paris Diderot-Paris 7.

Desjardin É., Runz C. de, Pargny D., Nocent O. (2012). Modélisation d'un SIG archéologique et développement d'outils d'analyse prenant en compte l'imperfection de l'information. *Revue Internationale de Géomatique/International Journal of Geomatics and Spatial Analysis*, vol. 22, nº 3, p. 367–387.

Ma Z. (2005). Fuzzy information modeling with the UML. In *Advances in fuzzy object oriented databases : Modeling and applications*, p. 153-176. Elsevier.

Ma Z., Zhang W.-J., Ma W., Chen G. (2001). Conceptual design of fuzzy object-oriented databases using extended entity-relationship model. *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 16, nº 6, p. 697–711.

Miralles A. (2006). *Ingénierie des modèles pour les applications environnementales*. Thèse de doctorat non publiée, Université Montpellier, France.

Pantazis D., Donnay J. (1996). *Conception des SIG: Méthode et formalisme*. Paris : Hermès et Lavoisier.

Pantazis D., Donnay J.-P. (1998). Objets géographiques à limites indéterminées. modélisation et intégration dans un modèle conceptuel de données. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 7, nº 2, p. 159–186.

Parent C., Spaccapietra S., Zimányi E., Donini P., Plazanet C., *et al.* (1997). MADS : un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 7, nº 3, p. 317–352.

Shu H., Spaccapietra S., Sedas D. Q. (2003). Uncertainty of Geographic Information and its Support in MADS. In *Proceedings of International Symposium on Spatial Data Quality (ISSDQ)*, vol. 2.

Sicilia M.-A., Garcia-Barriocanal E. (2006). Extending object database interfaces with fuzziness through aspect-oriented design. *ACM Special Interest Group on Management of Data Record (SIGMOD Record)*, vol. 35, nº 2, p. 4–9.

Yazici A., Akkaya K. (2000). Conceptual modeling of geographic information system applications. In *Recent Issues on Fuzzy Databases*, p. 129–151. Springer.

Zadeh L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, nº 3, p. 338–353.

Zayrit K., Desjardin É. (2012). Formalisation des imperfections dans les données dans d'un système d'information agro-environnemental : Observox. In *Spatial analysis and geomatics.* Liège, Belgique.

Zoghlami A. (2016). F-Perceptory : an approach for handling fuzziness of spatiotemporal data in geographical databases. *International Journal of Spatial, Temporal and Multimedia Information Systems (IJSTMIS)*, vol. 1, nº 1, p. 30–62.

Zvieli A., Chen P. P. (1986). Entity-relationship modeling and fuzzy databases. In *Proceedings of IEEE International Conference on Data Engineering*, vol. 2, p. 320–327.