
Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D

Suzie Larrivée, Yvan Bédard, Jacynthe Pouliot

Département des Sciences géomatiques, et Centre de recherche en géomatique,
Université Laval, Ville de Québec, Québec, Canada

{suzie.larrivee; yvan.bedard; jacynthe.pouliot}@scg.ulaval.ca

RÉSUMÉ. La conception des bases de données 2D est réalisée depuis une quinzaine d'années à l'aide de formalismes étendus pour la référence spatiale. Par contre, les bases de données géospatiales 3D étant plutôt récentes, il existe encore beaucoup de confusion quant aux notions fondamentales et il n'y a pas à notre connaissance de solution facilitant la modélisation conceptuelle. Aussi bizarre que cela puisse paraître, la première difficulté rencontrée lors d'un tel exercice de modélisation provient des divergences liées à la définition même de « 3 » et de « D » ! Cet article aborde donc cet état de fait en proposant une vue homogène des notions fondamentales et en présentant une solution pour modéliser conceptuellement une base de données géospatiales pour des fins d'application 3D: concepts théoriques, extension 3D à UML, intégration avec les PVL spatial et spatio-temporel de Perceptory, cas simples et complexes.

ABSTRACT: For the last 15 years, designing 2D databases has benefited from new or extended formalisms proposed by the GIS research community. However, three-dimensional representations have been significantly more frequent in the recent years, especially in 3D computer graphics and in 3D GIS. In spite of this fact, there exist a lot of confusion in fundamental notions and there has been insofar no proposal for solutions aimed at facilitating the conceptual modeling of 3D geospatial databases as required for GIS applications. The first difficulty met when someone wants to design a database model for 3D applications may seem bizarre but is in fact very fundamental: the very definitions of « 3 » and of « D » ! This paper proposes fundamental notions and a solution to create conceptual models of geospatial databases for 3D applications: theoretical concepts, 3D extensions for UML, integration with Perceptory spatial and spatio-temporal PVL, simple and complex cases.

MOTS CLÉS: définitions 3D, SIG 3D, base de données géospatiales, modélisation conceptuelle, UML 3D, PVL 3D, Perceptory.

KEYWORDS: 3D definitions, 3D GIS, spatial database, conceptual modeling, 3D UML, 3D PVL, Perceptory.

1 Introduction

La représentation 3D a pris une expansion considérable ces dernières années. Il n'y a qu'à faire une recherche sur le Web avec le mot clé « 3D » pour se rendre compte du nombre impressionnant de sites, articles et compagnies traitant de la collecte de données 3D, de design de scènes virtuelles et de représentation d'objets en 3D. La représentation d'objets 3D appartient principalement au domaine de l'infographie tridimensionnelle (*three-dimensional computer graphics*) et celui de la conception assistée par ordinateur 3D (CAO 3D) même si on la retrouve de plus en plus dans le domaine des systèmes d'information géospatiales (SIG) 3D. Plusieurs projets de recherche sont actuellement en cours dans le but de marier les deux disciplines et d'obtenir des outils SIG 3D performants et offrant plus de fonctionnalités d'analyse tridimensionnelle (Lachance, 2005 ; Lee *et al.*, 2000 ; Pilouk, 2003 ; Zlatanova *et al.* 2004). Une des principales distinctions entre les deux types d'application (i.e. CAO vs SIG) est la gestion de base de données (Kofler, 1998). En effet, les applications SIG modernes enregistrent leurs données dans une base de données géospatiales rattachée à un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR), relationnelle-objet (SGBDRO) ou orienté-objet (SGBDOO) tandis que les applications en infographie et CAO utilisent des systèmes de fichiers graphiques traditionnels (Li *et al.*, 2001). L'utilisation d'un système de gestion de base de données offre de nombreux avantages pour les applications SIG tels la sécurité, l'accès multiutilisateur, le langage d'interrogation, les contraintes d'intégrité, la gestion des domaines de valeurs, etc. Pour concevoir adéquatement ces bases de données géospatiales pour les systèmes 2D, on utilise des formalismes étendus pour la référence spatiale tels Geo-Frame, OMT-G, MADS, Modul-R et le Spatial Plug-in for visual Languages (PVL Spatial de Perceptory) (Filho *et al.*, 2004 ; Borges *et al.*, 1999 ; Parent *et al.*, 1997 ; Caron *et al.*, 1993 ; Bédard, 1999b). Les bases de données n'étant pas présentes en infographie et les applications actuelles du SIG 3D étant très rudimentaires, il n'existe pas à notre connaissance d'extension spatiale 3D pour les formalismes de modélisation de base de données puisque l'expression des besoins en ce sens est vraiment récente.

Cet article propose les notions fondamentales 3D jugées utiles à la modélisation conceptuelle des applications SIG 3D, incluant les dimensions de l'univers et les dimensions des objets qu'on y représente. Quoiqu'ils apparaissent évidents à prime abord, nous verrons que ces notions possèdent des significations très variées dans la littérature et une position doit être adoptée avant même de parler de modélisation conceptuelle. Ensuite, nous ferons un rappel du PVL spatial 2D utilisé dans Perceptory afin de mieux introduire un nouveau PVL spatial conçu pour la modélisation de base de données 3D (compatible au PVL spatial 2D et au PVL spatio-temporel). Enfin, nous aborderons l'utilisation de ce PVL 3D pour la modélisation des bases de données 3D et à représentations multiples 3D. Nous terminerons en montrant des exemples de son implantation dans un SIG. Ce PVL a été développé dans le cadre d'un projet avec la Défense Nationale du Canada pour

qui le développement de modèles 3D urbains réalistes reliés à une base de données riche en information descriptive est important.

2 Les notions fondamentales 3D

Afin de bien comprendre la problématique du 3D, il est essentiel au préalable de définir certains concepts de base liés à la 3^e dimension des données géospatiales. Il est surprenant de constater à quel point les notions même de « dimension » et de « forme 3D » ne sont pas définies de façon élaborée dans la littérature, que ce soit dans les volumes de géomatique, de graphisme numérique, de mathématique Euclidienne ou dans les normes ISO et OGC. Par exemple, ESRI définit les formes 3D de la façon suivante: "*three-dimensional shape: A point, line, or polygon that stores x-, y-, and z-coordinates as part of its geometry. A point has one set of z-coordinates; lines and polygons have z-coordinates for each vertex.*" (Karman *et al*, 2001). Cette définition est sémantiquement inexacte car elle ne fait que dire que l'objet est localisé dans un espace 3D sans même définir ce qu'est un objet 3D. En effet, elle dit qu'une forme 3D est une forme 0D, 1D ou 2D (sic !) localisée dans un espace 3D (possédant trois coordonnées). Il y a donc confusion entre le nombre de dimensions d'une forme et le nombre de dimensions de l'espace dans lequel elle est située. Selon cette définition plutôt fréquemment rencontrée, tout objet ayant un « z » est un objet à trois dimensions, ce que nous considérons mal défini car il y a confusion entre la chose et l'environnement d'une chose (ex. un bateau est-il liquide parce qu'il est sur la mer ?). Une définition que nous jugeons plus exacte est donnée dans le site web Euclid's Elements: "*A solid is that which has length, breadth, and depth*". Nous la jugeons plus exacte car dans ce cas-ci, il s'agit vraiment de la dimension de l'objet (il parle d'ailleurs de solide) et non du nombre de dimensions du système de référence dans lequel est localisé cet objet. Similairement, le monde du graphisme 3D utilise 4 systèmes de coordonnées: l'univers de référence absolue, l'univers relatif de l'objet (lequel univers est positionné dans l'univers absolu), l'univers du point de vue de l'observateur (également positionné dans l'univers absolu) et l'univers « écran » (de l'ordinateur). Dans le domaine de la vision numérique, on définit aussi cet univers dans lequel les objets sont positionnés et orientés les uns par rapport aux autres. «*Dans le cas des images 3D, la fonction de formation de l'image dépend des objets présents dans la scène (leur forme), de leurs position et orientation dans un repère global ("world coordinate system"), ainsi que de leurs relations d'occlusion résultant de leur position relative par rapport au capteur qui est lui-même placé à une position donnée et qui a une orientation donnée dans le repère global.* » (Bergevin, 2000).

Ce type d'information enrichit notre compréhension du phénomène « 3D » que nous devons modéliser. Nous pourrions maintenant nous en servir pour définir explicitement les caractéristiques des objets qu'il faut modéliser pour une base de données 3D ainsi que pour définir les caractéristiques des référentiels spatiaux 3D utilisés. Les prochaines parties de cette section décrivent donc les résultats de nos

réflexions relativement aux notions fondamentales de « dimension de l'univers » et de « dimension de l'objet ».

2.1 Dimension de l'univers

Il est important de distinguer au départ les dimensions de l'univers dans lequel est positionné l'objet, des dimensions liées à sa forme. On entend par nombre de dimensions de l'univers, le nombre d'axes (ou de coordonnées) spatiaux nécessaires pour positionner les objets de la réalité les uns par rapport aux autres. On parlera par exemple, d'un univers 2D si le système est composé des axes X, Y et d'un univers 3D si les axes sont X, Y et Z. De même, nous parlerons d'un univers 1D lorsqu'un seul axe droit ou curviligne est utilisé, comme cela se rencontre fréquemment pour les réseaux routiers (cf. systèmes de référence linéaire utilisés par les SIG pour la segmentation dynamique). Nous nous limiterons, dans le présent article, aux dimensions spatiales, ce qui exclut le temps et toutes autres dimensions. Nous avons ainsi distingué quatre types d'univers:

– « L'univers global »: système de référence universel terrestre (ex. GRS-80 qui utilise la latitude, la longitude et l'altitude géodésique).

– « Les univers de l'entrepôt de données »: lorsqu'une organisation sauvegarde ses jeux de données hétérogènes dans un seul et même entrepôt de données (ex. dans Oracle Spatial) pour ensuite les visualiser de façon intégrée dans un SIG grâce à des transformations effectuées à la volée (ex. avec les GDO de GeoMedia), alors il est possible d'y stocker plusieurs univers. Ces univers sont les référentiels spatiaux utilisés par les différentes classes d'objets stockées dans l'entrepôt. Un entrepôt de données pouvant également être à représentation multiple, il est tout aussi possible que les différentes représentations qui y sont stockées soient elles aussi dans différents systèmes de référence (Bernier *et al.*, 2004). Par exemple, il est possible que les données acquises pour l'échelle 1 :20 000 soient 2D et stockées dans la projection UTM6° alors que celles acquises au 1 :1000 soient 3D et stockées selon la projection UTM3°. Les SIG et les serveurs universels les plus avancés permettent alors de stocker dans la même base de données (l'entrepôt) ces données et leurs deux univers. Un entrepôt de données peut donc ici aussi contenir plusieurs référentiels spatiaux. Il faut noter ici que dans les cas les plus fréquents d'applications SIG, il n'y a pas d'entrepôt de données à proprement parler, mais simplement une base de données homogène, appuyée sur un seul système de référence spatiale. Conséquemment, dans ces cas, il n'existe alors qu'un seul et même univers pour l'ensemble des données. On appelle alors ce dernier « l'univers de système ». Les univers d'entrepôt ou l'univers système sont habituellement localisés dans l'univers global.

– « L'univers d'une vue »: il s'agit ici du référentiel spatial utilisé par le SIG pour représenter et traiter les objets de l'entrepôt d'une manière homogène et cohérente (ex. en utilisant les GDO de GeoMedia pour transformer à la volée les données hétérogènes de l'entrepôt et les amener dans un même datum, une même projection cartographique et un même système de coordonnées). Pour un même entrepôt de

données ou pour une même base de données homogènes, il est possible de produire plusieurs vues dont certaines avec des référentiels différents, chacune permettant d'afficher de façon homogène un ensemble d'objets. Plus souvent qu'autrement, l'univers d'une vue correspond à l'univers du système (cas sans entrepôt). Dans tous les cas, sa position dans un des univers d'entrepôt ou dans l'univers système est clairement définie.

– « Les univers spécifiques »: ce sont des référentiels locaux propres à une ou plusieurs occurrences d'objets et qui sont positionnées dans un des univers d'entrepôt ou dans l'univers système. Ils peuvent être nombreux et possèdent chacun leur propre référentiel permettant de positionner la ou les occurrences d'objets (sous-ensemble de la base de données). Par exemple, le système de référence linéaire fréquemment utilisé en gestion des réseaux routiers est constitué d'autant d'univers 1D spécifiques qu'il y a de routes numérotées car chaque route (ex. route 138) est un système en lui-même permettant d'y localiser des événements par une mesure de distance à partir d'un point de départ (ex. au kilomètre 142). Cet univers spécifique 1D est transposable dans un univers d'entrepôt ou dans l'univers du système (ex. 2D UTM) grâce à la position dans ce système de chaque vertex de la ligne constituant la route. Les adresses civiques définies pour chacune des rues représentent un deuxième exemple fréquent où, à partir de traitement de géocodage (interpolation), on peut positionner une adresse sur une rue (univers spécifique) à partir des adresses minima et maxima de chaque côté des segments de rue positionnés dans l'univers du système.

2.2 Dimensions de l'objet

On entend par « objet », un élément de la réalité qui est cartographié et par le « nombre de dimensions » de cet objet, le nombre d'axes (ou de coordonnées) nécessaires pour localiser des points les uns par rapport aux autres à l'intérieur de cet objet (cet objet étant alors considéré comme un univers spécifique). Il s'agit de l'espace occupé par l'objet lui-même (ex. largeur, longueur, épaisseur) et non l'espace occupé par son rectangle englobant 2D ou 3D. Ainsi, indépendamment des axes de l'univers du système, un *objet ponctuel* n'aura aucune dimension (0D), un *objet linéaire* aura une seule dimension soit sa longueur (1D), un *objet surfacique* aura deux dimensions telles une largeur et une longueur et conséquemment une surface calculable (2D) et un *objet volumétrique* aura trois dimensions occupant un espace ayant des valeurs de longueur, largeur et hauteur (3D) et conséquemment un volume calculable. En d'autres termes, un objet linéaire orienté 45° Sud-Est dans un univers 2D (comme une route courbe représentée sur une carte par exemple), ne sera pas considéré bidimensionnel même si on a besoin de 2 mesures pour décrire la portion de l'espace occupée par son rectangle englobant (idem pour un plan incliné ou une surface de relief qui ne sont pas considérés comme des objets 3D dans un univers 3D même si leurs cubes englobant occupent un « volume d'air » tridimensionnel). Les dimensions spatiales de l'objet reflètent donc l'espace physiquement occupé par l'objet selon chaque direction de mesure possible (ex.

longueur, largeur, hauteur) et non l'espace d'air occupé par son rectangle englobant ni sa projection sur les axes de l'univers système.

2.3 Discussion sur la dimension de l'univers versus la dimension de l'objet

Tel que spécifié au début de cette section, on désigne une forme 3D dans le domaine des SIG comme étant un point, une ligne ou un polygone pour lesquels on stocke les coordonnées x , y et z (Clementini *et al.*, 1994; Karman *et al.*, 2001; Intergraph, 2002). Le nombre de dimensions correspond alors au nombre de dimensions de l'univers servant à positionner l'objet et non au nombre de dimensions de l'objet. Le domaine des CAO définit la dimension d'un objet en fonction de la dimension de l'espace qui l'englobe (AutoCAD, 2002; Bentley, 2002). Ainsi, une ligne droite serait un objet 1D et une ligne courbe un objet 2D puisque l'espace occupé par son rectangle englobant possède une largeur et une longueur.

Pour modéliser une base de données 3D, il est nécessaire de distinguer la dimension de l'univers dans lequel est positionné l'objet et la dimension de l'objet lui-même afin de savoir « quelle géométrie » donner à un objet et « comment » le localiser. Le tableau suivant résume différentes façons de percevoir les dimensions et présente la façon que nous avons retenue (colonnes « dimension univers » et « dimension géométrie ») pour développer notre PVL 3D présenté dans la section 3. Le vocabulaire proposé correspond davantage aux préoccupations de la modélisation conceptuelle et en ce sens, a le mérite d'être totalement indépendant des technologies (tout en y étant traduisible pour les besoins d'implantation).












	Géométries	SIG	CAO	Notions 3D proposées
C A R T E			Objet 0D	Objet 0D dans un univers 2D
			Objet 1D	
		Objet 2D		Objet 1D dans un univers 2D
			Objet 2D	Objet 2D dans un univers 2D
M O D È L E 3 D			Objet 0D	Objet 0D dans un univers 3D
			Objet 1D	
			Objet 2D	Objet 1D dans un univers 3D
		Objet 3D	Objet 3D	
			Objet 2D	
				Objet 2D dans un univers 3D
			Objet 3D	Objet 3D dans un univers 3D

Tableau 1. Géométries possibles pour une carte et un modèle 3D avec le nombre de dimensions des objets associés à ces géométries tel qu'utilisé dans le domaine des SIG, dans le domaine des CAO et proposé dans cet article (adapté de Brisebois, 2003)

Selon (Thurston, 2001), la façon la plus commune de faire du 3D avec un outil SIG est en fait du 2½D. La plupart des SIG sont limités, au niveau de la représentation 3D, à générer et à afficher un modèle numérique de terrain (MNT) ou à donner une élévation moyenne à chaque objet ponctuel, linéaire ou surfacique. Cette notion de 2½D implique, selon plusieurs auteurs dont (Cambray, 1993 ; Kraus, 1997 ; Ruiz *et al.*, 2004), qu'il y a une seule coordonnée z ou élévation en attribut pour chaque paire de coordonnées x,y. Le « 2½ » représente donc le nombre de dimensions de l'univers qui correspond à une « surface non planaire » contrairement à un univers 2D qui est une « surface planaire » et un univers 3D qui est un « volume ». Cette surface non planaire (2½D) qui constitue l'univers 3D des SIG est en fait le modèle numérique d'élévation (MNE).

Le MNE permet de localiser des objets provenant d'univers 2D (x,y) en interpolant une valeur de z pour chaque paire de x,y constituant la géométrie de l'objet. Les objets se trouvent ainsi à être localisés dans un système 2½D sans pour autant avoir de coordonnées z explicites. Certains auteurs dont (Kraus, 2000) nomment cette dernière opération de dérivation du z « 2D+1D ». Il est important de noter ici que la dimension de l'objet demeure toutefois la même (point, ligne, surface). Ainsi, le passage d'une maison (objet 2D) de l'univers planimétrique initial à l'univers 2½D ne fait pas de cette maison un volume (i.e. objet 3D); elle demeure une surface mais elle possède dorénavant une altitude permettant de la situer sur la surface du MNT. Certains parlent même de 2¾D où deux valeurs de z par paire de coordonnées x,y sont stockées (Larue *et al.*, 1992).

Lorsque l'on extrude une géométrie afin de lui donner une élévation, c'est comme placer cette géométrie en offset de l'univers 2D ou 2½D, tout comme si on positionnait un objet en offset d'une route dans un système de référence linéaire. Cet offset est en fait à l'extérieur de l'univers mais peut être positionné puisque l'univers est 1½D ou 2½D, i.e. un univers 1D positionné dans un univers 2D ou bien un univers 2D positionné dans un univers 3D. La figure suivante illustre ces concepts de 2½D et d'extrusion de la géométrie à partir d'une valeur d'attribut, en plus de différentes possibilités de systèmes sources pour produire un système cible, qui est dans ce cas-ci, un entrepôt de données possédant plusieurs univers, duquel on peut générer des vues.

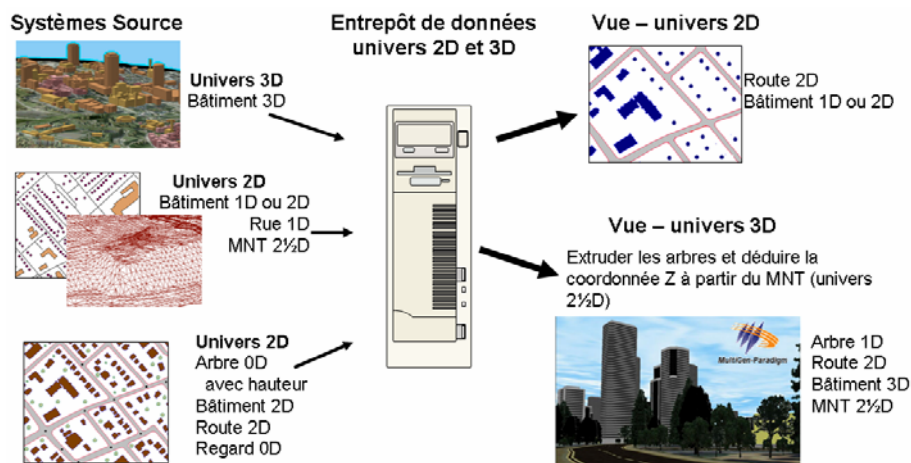


Figure 1. Exemple montrant les possibilités d'intégrer des univers et des objets de différentes dimensions pour produire un entrepôt et différentes vues.




Il faut noter que ce ne sont pas les MNE que nous modélisons dans les diagrammes de classes UML (Unified Modeling Language), mais bien les objets sémantiques ou cartographiques avec leurs attributs et leurs interrelations. Du point de vue conceptuel, nous ne devrions pas retrouver de classe d'objets appelée « MNE » tout comme nous ne devrions pas retrouver de classe d'objets appelée « Point », « Ligne » ou « Surface » dans un modèle 2D. Ces primitives géométriques ne font tout simplement pas partie du discours de l'utilisateur et reflètent des considérations d'implantation lorsque traitées ainsi. Une simple désignation du type de géométrie des objets par les pictogrammes d'un PVL suffit à décrire le discours de l'utilisateur (Bédard et al 2004). Par contre, lors de la conception de structures de « données géométriques » (comme dans Pouliot *et al* 2005 ou lors de la conception du logiciel ArcGIS ou des normes ISO-TC211 et OGC), le MNE pourrait être perçu comme une classe d'objets du modèle de classes UML qui aurait ses propres attributs ainsi qu'une relation d'agrégation avec la classe d'objets « points ».



3 La modélisation de base de données géospatiales pour applications 3D

Depuis plus de 25 ans, on utilise des techniques de modélisation (Chen, 1976 ; Tardieu *et al*, 1983) afin de concevoir adéquatement des bases de données. Cette étape de *conception* vise à faire le design du système à l'aide de modèle *conceptuel* et ceci indépendamment de la technologie prévue pour son développement. Vers la fin des années 80, des extensions à ces techniques ont émergé afin d'exprimer plus efficacement la géométrie que prendront les objets dans une base de données







géospatiales 2D (Filho *et al.*, 1999 ; Bédard *et al.*, 2004). On retrouve de telles extensions pour la plupart des formalismes de modélisation tels Entité/Relation et UML. Quelques-uns de ces formalismes étendus sont supportés par des outils AGL (ateliers de génie logiciel) tels MADS (Parent *et al.*, 1997), OMT-G (Borges, 1999), GeoFrame (Filho *et al.*, 1999 ; Filho *et al.*, 2004) et Perceptory (Bédard, 1999b ; Bédard *et al.*, 2004). Ce dernier utilise le formalisme UML enrichi du Plug-ins for Visual Language (PVL). Le PVL est un langage pictogrammique qui permet la description de la géométrie ou de la temporalité des classes d'objets, des associations et des attributs d'un modèle de base de données. C'est un concept générique qui peut être intégré à tout formalisme de modélisation, à tout outil AGL du marché et même à d'autres moyens (ex. rapports, outil de contraintes d'intégrité spatiale). Puisque ce concept de PVL a fait ses preuves dans de nombreux projets de modélisation de base de données géospatiales 2D depuis la fin des années 80 (Bédard *et al.*, 2004), il apparaissait approprié de développer de nouveaux pictogrammes afin d'enrichir le PVL pour la conception de bases de données 3D. Le défi pour développer un langage demeure toujours de balancer adéquatement sa convivialité avec sa capacité d'expression et sa rigueur dans un contexte symbiotique impliquant un environnement humain, technologique et de gestion de projet. La prochaine section résume la solution 2D déjà décrite par Bédard *et al.* (2004) afin de mieux introduire la section 3.2 qui présente en détail les pictogrammes 3D.

3.1 Le PVL Spatial 2D et le PVL spatio-temporel

Les pictogrammes spatiaux 2D du PVL ont été conçus afin de décrire visuellement, dans un modèle conceptuel de base de données géospatiales, la dimension (0D - point, 1D - ligne, 2D - polygone) désirée pour l'objet pour la future base de données géospatiales. Cette description visuelle utilisée dans un schéma est accompagnée d'un dictionnaire (repository) permettant de compléter certains détails au besoin, que ce soit pour la numérisation initiale de l'objet ou pour définir des traitements spatiaux conduisant à la géométrie utilisée. Les pictogrammes de base pour les univers 2D sont , ,  et désignent respectivement un objet ponctuel (0D), un objet linéaire (1D) et un objet surfacique (2D) tels que décrits dans le tableau 1. Ces pictogrammes peuvent être combinés, accompagnés d'une cardinalité et positionnés à différents endroits dans un schéma conceptuel de données afin de signifier différentes choses. Nous utilisons et raffinons depuis plusieurs années ce PVL pour décrire la géométrie d'objets pour un univers système à 2 dimensions et il a été décrit dans plusieurs articles (Bédard 1999a; Bédard 1999b; Brodeur *et al.*, 2000 ; Proulx *et al.*, 2002; Bédard *et al.*, 2004). Dans l'AGL Perceptory, qui utilise UML, le pictogramme spatial est positionné à gauche du nom de la classe d'objets (et des classes associatives), à droite du nom de chaque attribut auquel il s'applique ou bien dans le nom de l'opération dans le cas de traitement relatif à la géométrie. Son utilisation pour le 3D suit exactement les mêmes principes et fait l'objet de la prochaine section.

Quant au PVL temporel (constitué d'instants  et d'intervalles ) , il suit également les mêmes règles mais appliquées à l'existence et l'évolution d'une classe d'objets (tant géométrique que descriptive). Dans l'AGL Perceptory, le pictogramme temporel est positionné à la droite du nom de la classe (ou de la classe associative), de l'attribut ou du pictogramme spatial. Les détails de ce PVL temporel pour un univers système 2D se retrouvent dans les références ci-haut. Ils peuvent être transposés tels quels pour un univers 3D et les pictogrammes proposés dans les prochaines sections.

3.2 Description du PVL Spatial 3D

La méthode que nous avons créée pour distinguer les dimensions des différents univers consiste en deux parties. Premièrement, l'univers du système est décrit grâce aux métadonnées relatives au projet et l'information se retrouve dans le référentiel de l'AGL Perceptory (Figure 2). S'il s'agit d'un entrepôt constitué de plusieurs sources et plusieurs vues et donc possiblement de plusieurs univers différents, nous pourrions alors saisir un formulaire tel celui présenté à la Figure 2 pour chaque vue (prochaine version de Perceptory). Deuxièmement, comme il peut y avoir plusieurs univers dans un entrepôt et de manière à pouvoir bien visualiser les dimensions de la vue à laquelle appartient une classe d'objets, nous avons décidé de représenter explicitement cette notion d'univers dans nos pictogrammes. Pour les PVL 2D, la dimension de cet univers 2D est représenté par le carré (une géométrie 2D) qui inclut la géométrie des objets point, ligne ou polygone (, , ). Pour le PVL 3D, donc s'appliquant dans un univers 3D, on positionnera la géométrie des objets dans un cube (, , ). On peut remarquer que, tout comme pour les pictogrammes 2D, les axes x et y de la boîte sont en avant plan tandis que l'axe des z est la profondeur de la boîte. Le symbole de géométrie est noir et représente la trace au sol de l'objet ou la projection de sa géométrie au sol. Ces trois pictogrammes illustrent la géométrie d'objet plat ou drapé sur le MNT, i.e. n'ayant pas d'élévation propre ou d'épaisseur, comme peuvent l'être un regard d'égout, un sentier ou un parc. Ils illustrent la géométrie d'objets pouvant être localisés dans un univers 2½D et ont donc une seule coordonnée z par paire x,y. Ces objets ont la même géométrie dans un univers 2D.

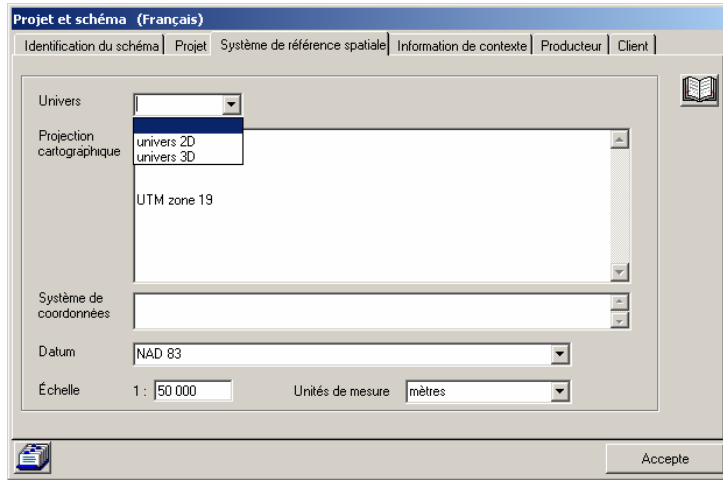





Figure 2. Description de l'univers du système dans l'outil AGL Perceptory.

Pour décrire la géométrie d'objets ayant plus d'une valeur de z par coordonnées x,y ou une épaisseur, nous utilisons les pictogrammes ,  et  pour désigner respectivement les objets linéaires et surfaciques qui ne sont pas plats ou drapés sur le MNT ainsi que les objets volumiques. Ces objets auraient une géométrie de point, ligne et surface dans un univers 2D. La figure suivante résume la correspondance entre les trois pictogrammes de base 2D et les six pictogrammes à univers 3D.































Objets de la réalité						
Univers 2D						
Univers 3D						

Figure 3 : Correspondance entre les pictogrammes 2D et 3D (Adapté de Bédard et al., 2004).

Les pictogrammes  et  illustrent tout type de lignes, de droites ou de courbes (drapées ou non). De même en est-il pour les surfaces avec les pictogrammes  et . La distinction entre l'objet linéaire plat ou drapé  et l'objet linéaire vertical ou dressé , tout comme la distinction entre l'objet surfacique plat ou drapé  et l'objet surfacique vertical ou dressé  s'est révélée la solution la plus intuitive. De plus, elle facilite la transposition avec le PVL 2D en permettant de savoir rapidement s'il s'agit d'un objet ayant une seule valeur de z par coordonnées x,y ou

bien plusieurs. Ainsi, un arbre représenté par  dans le PVL 2D est représenté par  dans le PVL 3D. Il semble aussi important de conserver une indication relative à l'orientation de l'objet par rapport aux axes x et y qui sont utilisés comme base des cartes. Le pictogramme  laisse clairement voir par exemple qu'un arbre est un objet linéaire avec une hauteur et peut donc avoir soit deux paires de coordonnées x,y et z, soit une seule paire de coordonnées x,y,z,z' ou soit une paire de coordonnées x,y et un attribut « hauteur ». Le pictogramme  ne pourrait nous en dire autant. Il indique que l'objet est composé au minimum de deux coordonnées x,y,z et n'a pas d'épaisseur ou n'est pas redressé. De tels détails, sur le plan conceptuel, sont de première importance pour faciliter la discussion avec les utilisateurs. Particulièrement la distinction entre le « quoi » (i.e. un arbre avec une hauteur) et le « comment » (i.e. une ou deux paires de coordonnées, avec ou sans attribut hauteur).

Pour utiliser les pictogrammes 3D ayant une hauteur ou épaisseur, il faut soit que :

- les coordonnées z de chaque sommet composant la géométrie de l'objet soient stockées;
- l'on ait une valeur en attribut nous informant sur la dimension verticale de l'objet telle la hauteur moyenne, le nombre d'étages, etc.
- l'on connaisse la hauteur standard des objets de même type que l'on fournira comme paramètre à une opération qui permettra de générer la géométrie 3D de chaque objet. On dira dans ce cas que la géométrie de l'objet est dérivée de l'opération qui permet de la générer.

La façon d'obtenir la partie verticale ou épaisseur de la géométrie de l'objet est inscrite dans le dictionnaire (référentiel de Perceptory) accompagnant le modèle, au niveau de la définition spatiale de la classe d'objets. Les opérations ou les attributs dérivés pourront être utilisés pour illustrer les traitements géométriques qui permettraient de donner une élévation à un objet à partir d'un attribut ou bien de faire du 2D+1D, i.e. d'interpoler les valeurs z des objets d'un MNT. Tout comme pour les pictogrammes 2D, les pictogrammes 3D peuvent être utilisés pour décrire la géométrie d'une classe d'objets (et classe associative) ou d'un attribut ou bien pour décrire une opération géométrique effectuée sur l'objet.

Nous discutons dans les sections suivantes de la proposition des pictogrammes 3D liés à la géométrie, ceux liés aux traitements géométriques et finalement des pictogrammes utilisés lorsque la géométrie est inconnue, compliquée ou que toute géométrie soit possible.







3.3 Utilisation des pictogrammes du PVL 3D

Les six pictogrammes de base peuvent ainsi être utilisés seuls pour montrer la géométrie relative à la classe d'objets, l'attribut ou l'opération d'un diagramme de classes ou bien être combinés suivant des règles que nous avons définies. Les

mêmes variations utilisées dans le PVL 2D ont été transposées pour le PVL 3D. Ces différentes variations sont: simples, complexes, alternatives, multiples telles que présentées par Bédard *et al.*, (2004) et peuvent être facultatives (pictogramme accompagné d'une cardinalité minimum = 0) ou dérivées (pictogramme en italique). Lorsque la géométrie est inconnue ou qu'il devient trop compliqué de l'exprimer avec les pictogrammes car trop de combinaisons sont possibles ou bien que toute forme et variante soient possibles, on utilise des pictogrammes spéciaux tels que présentés au dernier point de cette section.

3.3.1 Géométrie simple



Une géométrie est dite simple lorsque chaque occurrence d'une classe d'objets est représentée par une seule occurrence géométrique dont la dimensionnalité (0D, 1D, 2D ou 3D) est la même pour l'ensemble des objets de la classe. On ajoute alors un pictogramme spatial à la classe d'objets à cartographier, ce qui indique que l'on désire conserver (i.e. stocker) cette géométrie dans la base de données. Par exemple, on utilisera les pictogrammes suivants pour désigner un objet ayant une géométrie simple dans un univers 3D:

-  lorsque l'objet est plat et représenté par un seul point localisé au sol, tel un regard d'égout drapé sur un MNE, ou lorsque surélevé (non-drapé) tel un émetteur à l'extrémité d'une antenne.
-  lorsque l'objet est plat ou drapé sur le MNE et représenté par une seule ligne, tel un sentier, ou lorsque non-drapé (ex. surélevé) tel un pont.
-  lorsque l'objet est plat ou drapé sur le MNE et représenté par un seul polygone localisé au sol, tel un parc, ou lorsqu'il est non-drapé tel que localisé sur un autre objet comme l'est un hélicoptère sur le dessus d'un bâtiment.
-  lorsque l'objet est représenté par une ligne verticale tel un arbre ou par une ligne inclinée non-drapée au sol tel un téléphérique, ou localisé sur un autre objet telle une antenne sur le toit d'un bâtiment. L'objet est représenté par un point en 2D.
-  lorsque l'objet est représenté par un plan non-drapé au sol ayant une épaisseur, tel un mur, ou lorsque surélevé tel un panneau publicitaire. L'objet est représenté par une ligne en 2D.
-  lorsque l'objet est représenté par un solide tel un bâtiment localisé au sol, un stationnement souterrain, une mine, un poste d'observation localisé sur un autre bâtiment.







La multiplicité rattachée à la géométrie simple est de 1,1 et est la multiplicité par défaut (donc non-écrite à côté du pictogramme). Par contre, une géométrie peut être facultative (i.e. ce ne sont pas toutes les occurrences qui sont cartographiées). On ajoutera alors une multiplicité 0,1 à droite du pictogramme. La figure 4 (à gauche)

illustre une classe d'objets « stationnement » représentée par une géométrie 2D simple et obligatoire dans un univers 3D.



3.3.2 Géométrie complexe

Une géométrie est dite complexe lorsque chaque occurrence est composée d'un agrégat de géométries de même dimension ou de dimensions différentes. Dans le premier cas, on compose la géométrie de la classe d'objets en ajoutant une cardinalité 0,N ou 1,N à un pictogramme simple. Dans le deuxième cas, on combine les différentes dimensions nécessaires dans un même pictogramme. Par exemple, un réseau hydrique est composé de lignes et de surfaces et, dans un univers 3D, est représenté par  s'il est drapé au MNE ou par  si l'on désire avoir aussi le fond des lacs (mais pas la profondeur des rivières).

3.3.3 Géométrie alternative

Une géométrie est dite alternative lorsque chaque occurrence d'objet d'une même classe possède une OU l'autre des géométries proposées mais pas les deux (i.e. « ou » exclusif). On compose alors le PVL avec des pictogrammes côte à côte. Par exemple, une classe d'objets « Végétation » ayant dans un univers 2D les pictogrammes  (arbre et boisé) pourrait avoir les pictogrammes  dans un univers 3D. De plus, si « Végétation » incluait en plus les espaces verts dénudés, on aurait  pour indiquer que l'occurrence de la classe d'objets peut soit être un arbre isolé () , un espace vert dénudé () ou bien un boisé () .

3.3.4 Géométrie multiple

Une géométrie est dite multiple lorsque chaque occurrence possède autant de géométries qu'il y a de pictogrammes (i.e. 2 géométries ou plus) mais dont une seule est habituellement utilisée à la fois dans une représentation cartographique ou une requête spatiale (ce qui est différent d'une géométrie complexe, laquelle est un agrégat). On affiche alors les géométries les unes sous les autres, chacune pouvant être simple, complexe ou alternative, et avoir une cardinalité. Par exemple, le bâtiment dans un univers 2D pourrait être  et dans l'univers 3D, être  (Figure 4).

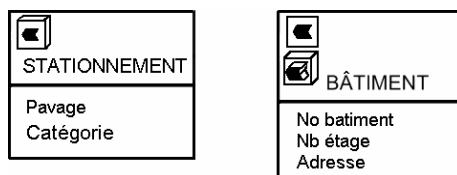


Figure 4. *À gauche* : Stationnements représentés par une géométrie 2D dans un univers 3D. *À droite* : Représentation multiple d'un bâtiment où l'on veut conserver la géométrie surfacique dans un système 2D et sa géométrie volumique dans un système 3D.

3.3.5 Géométries dérivées et opérations utilisant la géométrie

Le PVL 3D peut également contribuer à décrire les opérations faisant appel à des formes géométriques ou la forme géométrique du résultat. On représente le résultat par une « géométrie dérivée », i.e. un pictogramme mis en *italique* pour rappeler le symbole « / » utilisé dans UML devant les attributs, classes et associations dérivés. Lorsque l'on veut conserver cette géométrie dérivée, on l'ajoute comme géométrie au bon endroit (classe, classe associative ou attribut). Quant aux opérations, elles peuvent être très variées et servir à la généralisation cartographique (voir Figure 5), l'extrusion, le géocodage d'adresses civiques, le positionnement d'objets sur le MNT, etc.

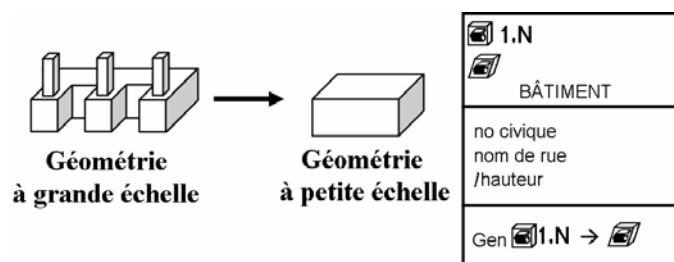


Figure 5. Exemple montrant une opération permettant de généraliser une géométrie volumique complexe en une géométrie volumique simple et de conserver le résultat (en plus de la géométrie initiale saisie).

La géométrie de l'objet peut aussi gagner une dimension à partir d'une valeur d'attribut telle la hauteur, le nombre d'étages, l'âge d'un peuplement forestier, etc. Son univers peut aussi gagner une dimension. Le pictogramme de la classe d'objets représente la géométrie de l'objet dans le système alors que le pictogramme appliqué en opération représente la géométrie 3D de l'objet résultante d'un traitement.

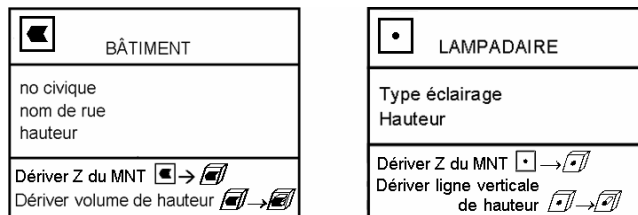





Figure 6. À gauche : Opération permettant de passer : 1° d'une géométrie à univers 2D à une géométrie à univers 3D (spécifiquement 2½D) et 2° d'une géométrie 2D drapée à une géométrie de volume 3D. Seule la géométrie surfacique 2D est conservée dans la base de données. À droite : Opération permettant premièrement de générer une géométrie à univers 3D et deuxièmement de générer une géométrie linéaire verticale pour les lampadaires. Seule la géométrie ponctuelle 2D est conservée.

Dans le cas où le domaine de valeurs pour la hauteur des objets est standardisée pour l'ensemble des occurrences d'une classe d'objets, on modélise celle-ci en attribut. Dans la figure 6 à droite, la géométrie saisie pour les lampadaires est ponctuelle mais sa catégorie de hauteur (ex. 5, 8, 10, 15) permet de générer automatiquement sa géométrie linéaire verticale.

L'exemple de la figure 5 représente une classe d'objets d'un schéma conceptuel conçu pour des usagers dont la gestion du vrai 3D est nécessaire à la rencontre de leurs besoins. La géométrie volumique complexe est donc saisie en 3D et aucune opération n'est nécessaire pour la générer. Dans le cas de l'exemple de la figure 6, le modèle de données démontre que le 2½D supporté par les SIG serait suffisant pour répondre aux besoins des usagers (peu importe le SIG choisi et comment la dimension Z est implantée). C'est pourquoi les classes d'objets ont une géométrie à univers 2D stockée et des géométries à univers 3D dérivées à la volée en opération. Donc le choix de l'univers du système (2D, 2½D ou 3D) fait en fonction de ce que les usagers veulent, aura un impact dans le choix des pictogrammes au niveau de la modélisation conceptuelle.

3.3.6 Géométrie compliquée, toute géométrie et géométrie inconnue

Comme pour le PVL 2D, nous croyons que toute géométrie 3D peut être exprimée avec le PVL 3D. Cependant, lorsqu'il devient trop complexe de l'exprimer à l'aide des pictogrammes (ex. au-delà de 5 formes géométriques), alors il est possible de suppléer dans le dictionnaire (référentiel de Perceptory) par le langage naturel (même si cela demeure complexe) et d'utiliser ces pictogrammes spéciaux suivants :  (géométrie compliquée),  (toute géométrie possible, sans restriction). Enfin, lorsque l'utilisateur sait qu'une telle classe d'objets ou un tel attribut aura une géométrie mais que celle-ci n'est pas encore définie, il est possible d'utiliser le pictogramme spécial  (géométrie inconnue) pour indiquer que cette géométrie sera définie plus tard dans le processus de modélisation.

4 Discussion et conclusion

L'intérêt d'avoir un modèle conceptuel 3D est de pouvoir exprimer les besoins de l'utilisateur indépendamment de l'implantation de la base de données. Évidemment, il faut connaître les capacités des technologies sur le marché (SIG, CAO, serveurs universels, etc.) et faire un modèle pouvant être implanté dans une technologie existante, ce qui revient dans le cas présent à choisir pratiquement entre des capacités 3D complètes ou 2½D. Il est de notre avis que ceci demeure de niveau conceptuel puisque l'on spécifie davantage "quoi" implanter que "comment" l'implanter, ce qui varie d'une technologie à l'autre et même entre modules d'une même technologie. Évidemment, il faut choisir une technologie 3D pouvant rencontrer les attentes de l'utilisateur faute de quoi, certaines géométries 3D devront être modifiées, voire abandonnées au profit de géométries 2D ou 2½D. Considérant

les différences marquées entre les technologies 3D et 2½D, l'analyste devra exprimer dans le modèle conceptuel les besoins des usagers en ce sens afin d'en faciliter le choix. Outre leurs besoins, il devra aussi considérer ce qu'ils veulent supporter et mettre à jour, ce qu'ils sont prêts à payer, les analyses qu'il veulent effectuer, la complexité de l'acquisition des données, etc. Les pictogrammes utilisés permettront donc d'exprimer pour chaque classe d'objets la géométrie appropriée, soit une géométrie 3D saisie pour du vrai 3D (figure 5) ou une géométrie 3D dérivée pour du 2½D (figure 6). L'utilisation d'expressions PVL appropriées mettra donc en évidence les besoins en 3D et les manipulations nécessaires, ce qui facilitera le choix du logiciel 3D le plus approprié.

Cet article a donc présenté une vue homogène des notions fondamentales en SIG 3D ainsi qu'une nouvelle extension aux formalismes de modélisation pour la conception de base de données géospatiales 3D. Comme il existe plusieurs divergences dans les notions fondamentales entre autres dans la signification du « 3 » et du « D », une revue de celles-ci était nécessaire pour bien comprendre la problématique de la modélisation des bases de données géospatiales 3D. Il est maintenant reconnu que la description de la géométrie et du suivi de son évolution géométrique et temporelle correspond à une étape essentielle en conception d'une base de données géospatiales. Dans l'objectif de créer des SIG 3D, il nous est apparu nécessaire d'étendre le formalisme utilisé en 2D pour décrire la géométrie des objets positionnés dans un univers 3D afin de décrire formellement les dimensions de ces objets et de leurs univers. L'émergence des SIG 3D étant récente, ce PVL adapté pour la référence spatiale 3D représente une première solution visant à faciliter la modélisation conceptuelle des bases de données tridimensionnelles. Appuyée sur les extensions spatiales ayant fait leurs preuves lors de la conception de base de données géospatiales 2D (temporelles et atemporelles), nous croyons qu'une extension pour les bases de données 3D basée sur les mêmes principes peut être tout aussi utile et efficace. Ces premiers résultats reposent uniquement sur des explorations théoriques et méritent d'être testés pour mesurer la justesse des choix effectués et améliorer le tout grâce à la pratique avec des humains, des contraintes budgétaires (ex. obligation de livrer dans de courts délais) et des AGL. Tout comme le PVL 2D, nous croyons que le PVL 3D facilitera la communication entre l'analyste et l'utilisateur en étant assez intuitif et en simplifiant grandement le modèle.

Remerciements

Nous tenons à remercier RDDC (Recherche et Développement, Défense Canada) et plus particulièrement M. François Létourneau ainsi que le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour avoir financé ce projet. Nous remercions également Alexandre Brisebois, étudiant à la

maîtrise et Patrick Frenette, technicien informatique, qui ont participé à cette recherche.

5 Bibliographie

- Bédard Y., Paquette F., «Extending entity/relationship formalism for spatial information systems», *AUTO-CARTO 9*, Baltimore, 2-7 avril 1989, p. 818-827.
- Bédard Y., Pageau J., Caron C., «Spatial Data Modeling: The Modul-R Formalism and CASE Technology». *Proceedings of XVII congress of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS*, Washington, août 1992.
- Bédard Y. 1999a, «Principles of spatial database analysis and design», Chapitre 29 du livre: *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Application and Managements*, second edition, Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, and David W. Rhind, New York: Wiley, 1999, p. 413-424.
- Bédard Y. 1999b, «Visual Modeling of Spatial Databases Towards Spatial Extensions and UML», *Geomatica*, Vol 53, n° 2, 1999, p. 169-186.
- Bédard Y., Pouliot J., Larrivée S., Frenette P., Brisebois A., Normand P., Création d'un modèle 3D urbain de la recherche de données à l'exploitation du modèle 3D, Rapport de recherche, Université Laval, juin 2002.
- Bédard Y., Larrivée S., Proulx M.-J., Nadeau M., «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: S. Wang et al. (Eds.): *Conceptual Modeling for Advanced Application Domains*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3289, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, novembre 2004, p. 17–30.
- Bergevin R., Vision numérique: aspects cognitifs, Notes du cours GEL-64793 du Département de génie électrique et de génie informatique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, 2000.
- Bernier E., Bédard Y., «Using a data warehousing architecture to combine automatic generalization and multiple representation for web-based on-demand mapping», chapitre du livre : *Challenges in the Portrayal of Geographic Information: Issues of Generalisation and Multi Scale Representation*, Ruas A, W Mackaness, T. Kilpelainen, D Richardson (eds), 2004.
- Borges K., Laender A., Davis C., «Spatial Data Integrity Constraints in Object Oriented Geographic Data Modeling», *Proceedings of 7th ACM international symposium on Advances in Geographic Information Systems ACM GIS'99*, Kansas City, USA, 2-6 novembre 1999, p. 1-6.
- Brisebois A., Analyse du potentiel d'extension du concept SOLAP pour l'exploration des données spatiales tridimensionnelles, Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2003.
- Brodeur J., Bédard Y., Proulx, M.-J., «Modelling Geospatial Application Database using UML-based Repositories» Aligned with International Standards in Geomatics, *Proceedings of 8th ACM international symposium on Information and Knowledge Management (CIKM) ACM GIS'00*, Washington DC, USA, 10-11 novembre 2000.

- Cambray, B., « Three-dimensional (3D) modelling in a geographical database », Proceedings of the Auto-Carto'11, *Eleventh International Conference on Computer Assisted Cartography*, Minneapolis, USA, Oct. 30 to Nov. 1, 1993, p. 338-347.
- Caron C., Bédard Y., Gagnon P., « MODUL-R : un formalisme individuel adapté pour les SIRS », *Revue internationale de géomatique*, vol. 3, n° 3 1993, p. 283-306.
- Chen P. P., « The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data », *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, vol 1, n° 1, 1976, p. 9-36.
- Clementini E., Di Felice P., «A comparison of methods for topological relationships». *Information Sciences*, 80, 1994, p. 1-34.
- Eriksson H-E., Penker M., *UML Toolkit*, Willey & son, 1998.
- Site web Euclid's Elements: <http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/elements.html>, 2005.
- Filho J. L., Sodré V. F., Daltio J., Rodrigues M. F., Vilela V., «A CASE Tool for Geographic Database Design Supporting Analysis Patterns», S. Wang et al. (Eds.): *Conceptual Modeling for Advanced Application Domains*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3289, 2004, p. 17–30.
- Filho J.L., Iochpe C., «Specifying analysis patterns for geographic databases on the basis of a conceptual framework. » *Proceedings of 7th ACM international symposium on Advances in Geographic Information Systems ACM GIS'99*, Kansas City, USA, 2-6 novembre 1999, p. 7-13.
- Karman M., Amdahl G., *Dictionary of GIS terminology*, ESRI Press, 2001.
- Kofler M., Gervauta M., Gruber M., «The Styria Flyover – LOD Management for Huge Textured DTM Models», *Proceedings of Computer Graphics International 98*, Hannover, 1998.
- Kraus K., *Photogrammetry* vol 2. Advanced Methods and Applications, Dümmlers-Verlag, 1997.
- Lachance B., Développement d'une structure topologique de données 3D pour l'analyse de modèles géologiques. Mémoire de maîtrise, Département des sciences géomatiques, Université Laval, 2005.
- Larue T., Pastre D., Chapuis M., «Schéma d'une base de données géographiques pour véhicules dirigés automatiquement», *Actes du 15^e Symposium Européen des Systèmes d'Information Urbains*, vol. 2, 1992, p. 371-382.
- Lee Y.C., Molenaar M., «Theme issue on dynamic and multi-dimensional GIS», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 55, n° 3, 2000, p. 137–138.
- Li J., Jing N., Sun M., « Spatial Database Techniques Oriented to Visualization in 3D GIS», *Proceedings of 2nd international symposium on Digital Earth*, Fredericton, New Brunswick, Canada, 24-28 juin 2001.
- Naiburg E.J., Maksimchuk R.A., *UML for Database Design*, Addison-Wesley, 2001.

- Parent C., Spaccapietra S., Zimanyi E., Donini P., Plazanet C., Vangenot C., Rognon N., Pouliot J., Crausaz P.-A., «MADS: un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles», *Revue Internationale de Geomatique*, vol. 7, n° 3-4, 1997, p. 317-352.
- Pilouk M., *Integrated modelling for 3D GIS*, Thèse de doctorat, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2003.
- Pouliot J., Lachance B., Kirkwood D., «Les structures de stockage de données géométriques 3D : Étape stratégique pour l'élaboration d'un SIG 3D», *Revue internationale de la géomatique*, numéro spécial : Information géographique tridimensionnelle : théories, systèmes et applications, Paris, Hermès Sciences Publications, 2005
- Proulx M.-J., Larrivière S., Bédard Y., « Représentation multiple et généralisation avec UML et l'outil Perceptory », chapitre 6 du livre *Généralisation et représentation multiple*, Paris, Hermès Sciences Publications, 2002, p. 113-130.
- Ruiz A., Kornus W., Talaya J., Colomer J. L., « Terrain Modeling in an Extremely Steep Mountain: A Combination of Airborne and Terrestrial LIDAR» *Proceedings of XX congress of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS*, Istanbul, Juillet 2004.
- Rumbaugh J., Jacobson I., Booch G., *The Unified Modeling Language Reference Manual*, Addison-Wesley, 2004.
- Starr L., *Executable UML: How To Build Class Models*. Prentice Hall, 2002.
- Tardieu H., Rochfeld A., Colletti R., *La Méthode Merise, Principes et Outils*, tome 1, Les Éditions des Organisations, 1983.
- Thurston J., «Geo-Visualisation : Current Issues / Future Potentials», GISCaFe.com, 2001.
- Zlatanova S., Rahman A.A., Shi W., «Topological models and frameworks for 3D spatial objects», *Computers & Geosciences*, vol. 30, n° 4, 2004, p. 419-428.