

la donnée 3D à un modèle 3D : Revue des concepts et des technologies

2.1 Introduction

Pour bien comprendre les défis méthodologiques et technologiques à relever lorsque vient le temps de passer de la donnée 3D à un modèle 3D, nous allons dans cette section présenter les concepts de base nécessaires au processus de modélisation 3D (i.e. la construction du modèle 3D) ainsi qu'aux fonctionnalités connexes telles que la gestion, l'analyse et le partage des modèles 3D. Nous ferons aussi le point sur les normes en vigueur et sur les géotechnologies qui permettent le stockage et le traitement de données géométriques (0D à 3D).

2.2 La construction des modèles géométriques 3D

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, un processus de modélisation consiste à construire un modèle, c'est-à-dire, une représentation simplifiée d'une réalité. Cette modélisation peut s'effectuer par la représentation des propriétés spatiales, thématiques et/ou temporelles. Le processus qui consiste à représenter les propriétés géométriques dont la position, la forme, la taille et l'orientation des objets d'une réalité se nomme modélisation géométrique (OQLF). En modélisation géométrique 3D, on s'intéresse donc à représenter plus spécifiquement les propriétés géométriques volumiques d'objets spatiaux 3D. Selon ISO 19107, (2002) un objet géométrique est un objet utilisé pour représenter les caractéristiques spatiales d'une abstraction d'un phénomène du monde réel. Dans cet ouvrage, nous utiliserons le terme objet spatial en référence à l'objet du monde réel (le bâtiment) et objet géométrique pour référer par exemple au polygone servant à sa représentation. Larrivée *et al.*, (2006) proposent de bien distinguer la notion de dimension associée à l'objet lui-même et la dimension de l'univers dans lequel cet objet est positionné. Par exemple, la représentation d'un bâtiment pourrait être réalisée par un point associé à son centre géométrique (objet géométrique ponctuel), par une ligne associée à sa façade (objet géométrique linéaire), par un polygone associé à son assise (objet géométrique surfacique) et par un polyèdre associé à son volume (objet géométrique volumique). Ces différentes représentations pourraient être placées dans un univers 1D, 2D et 3D. Par exemple, le polygone associé à son assise (objet surfacique) pourrait être positionné sur une

carte topographique (univers 2D). On pourrait aussi positionner ce même objet surfacique dans un univers 3D comme un modèle 3D de la ville dans lequel le bâtiment se situe. Étant donné cette situation potentiellement problématique, nous avons convenu de parler d'objets 3D ponctuels, linéaires, surfaciques ou encore volumiques pour faire référence à la représentation de ces objets positionnés dans un univers 3D (i.e. un modèle 3D). Dans le cas d'objets spatiaux 2D, on ferait alors référence à des objets ponctuels, linéaires et surfaciques positionnés dans un univers 2D comme une carte par exemple.

2.2.1 Structures géométriques 3D

Pour bien comprendre le processus de construction des modèles 3D et les éléments constitutifs des différentes structures de modélisation géométrique 3D, nous allons d'abord présenter les principales structures géométriques. En cartographie, une structure géométrique correspond à la disposition relative de fins éléments graphiques identiques, simples ou complexes, régulièrement répétés (OQLF, 1970). Elle est donc en quelque sorte le schéma ou le plan décrivant l'organisation logique des données géométriques (vectorielles ou matricielles) au sein d'une application. Cette structure géométrique est en général étroitement liée à un système de stockage particulier nécessaire à la persistance des données.

En géomatique, on distingue généralement deux catégories de structure géométrique, l'une dite vectorielle et l'autre matricielle (Longley *et al.*, 2001; Rigaud *et al.*, 2002). L'approche vectorielle (dite orientée-objets) implique des primitives géométriques de type point (0D), ligne (1D), polygone (2D) ou polyèdre (3D). Les objets de la réalité peuvent alors être représentés à partir des coordonnées des points et arêtes décrivant leur position et leur forme. Des polygones ou des volumes représentant les limites des objets peuvent aussi être construits à partir d'arêtes formant une boucle fermée. De son côté, l'approche matricielle (dite orientée-espace) représente la réalité de manière continue et implique des structures où le concept d'objet n'est pas explicite, mais accessible à travers le regroupement des mailles discrétisant l'espace géographique. On nomme raster, grid ou image, le fichier contenant des données matricielles. Un fichier raster peut être vu comme un tableau rectangulaire de cellules carrées identiques appelées pixel dont chacun d'eux se voit associer une valeur numérique ou nulle. Une fois un raster géoréférencé, la position d'un pixel dans le tableau

permet de lui attribuer une coordonnée x,y et la valeur numérique contenue dans le pixel peut être utilisée pour le stockage de la hauteur (valeur z) ou toute autre valeur comme par exemple la mesure du rayonnement électromagnétique acquise par télédétection. En 3D, on parlera plutôt de cellules volumiques (par exemple cubiques) appelées voxels géoréférencées en x,y,z .

En plus de cette distinction entre structures vectorielle et matricielle, un autre concept fondamental, celui de la topologie, doit être pris en compte. La topologie peut être définie comme la branche des mathématiques traitant des relations de voisinage qui s'établissent entre des figures géométriques, et qui ne sont pas altérées par la déformation des figures (OQLF, 2005). Elle fait référence aux relations de voisinage entre les primitives géométriques formant un objet d'un modèle et entre les objets eux-mêmes (micro et macro-topologie). Son application permet d'assurer la cohérence des données géométriques et facilite leur utilisation et leur stockage en éliminant la redondance au niveau des primitives géométriques. Elle vient aussi faciliter l'analyse spatiale puisque celle-ci fait généralement intervenir les relations entre les objets et les primitives spatiales d'un modèle (ex : est-ce que l'objet A se trouve à l'intérieur de l'objet B?) et ce sont spécifiquement ces relations qui sont stockées dans une structure dite topologique. Lorsque la topologie n'est pas explicitement stockée, elle doit être déduite et calculée à partir de la géométrie lors des traitements.

En 3D, la classification vectorielle/matricielle est toujours présente même si plusieurs auteurs ont proposé d'autres catégorisations (Billen, 2002; Breunig, 2001; De La Losa, 2000; Li, 1994; Pouliot *et al*, 2006a; Ramos, 2003; Raper, 1992 ; Shapiro, 1997; Van Den Bergen, 2004). Dans le cadre de l'application de type SIG 3D qui nous intéresse, il sera important de distinguer le type de primitives utilisées pour la représentation de volumes (objets 3D volumiques). C'est pourquoi nous proposons de regrouper et de présenter les structures selon trois niveaux de complexité basés sur le type de primitives utilisés pour construire les objets :

1. les structures basées sur des points et des lignes (fil de fer),
2. les structures basées sur des surfaces (B-Rep, TIN, ...),
3. les structures basées sur des solides (CSG, Voxel, ...)

La description que nous en ferons prend pour hypothèse que les objets sont des manifolds puisqu'il existe tout un monde de modélisation pour le non-manifold. Un manifold est un espace topologique localement euclidien i.e. autour de chaque point, il existe un voisinage qui est topologiquement le même que la sphère unitaire ouverte dans \mathbb{R}^n (<http://mathworld.wolfram.com>). Les objets non Manifold ne respectent pas cette règle.

Structures de modélisation basées sur des points et des lignes

La structure de modélisation basée sur des points et des lignes, appelée fil de fer, consiste à créer des objets à l'aide de nœuds et d'arrêtes formant le squelette de leurs frontières. Ce type de modèle est, parmi ceux de nos trois niveaux de complexité, le plus simple et le moins gourmand côté espace de stockage. Par contre, cette simplicité n'a pas que de bons côtés puisqu'elle ne lui permet pas de représenter sans ambiguïté n'importe quels objets. En effet, le même objet peut être interprété différemment selon que l'on considère fermés ou ouverts les plans implicitement créés par les segments composant les limites de l'objet. Cette méthode n'est donc pas très efficace pour la représentation de volumes puisque la surface des objets n'est pas fermée et leur contenu est vide. Cela a aussi pour effet de compliquer les calculs d'analyse spatiale puisqu'il n'y a pas de topologie entre les différents objets (seulement au niveau micro i.e. les segments adjacents partagent les mêmes points) et le calcul de volume doit être effectué à partir des coordonnées des primitives formant le squelette de la frontière des objets. Au niveau de sa capacité à représenter l'irrégularité des formes, cette structure peut être qualifiée de performante puisqu'il suffit d'introduire plus de nœuds au niveau des lignes pour représenter plus précisément les objets et les phénomènes.

Structures de modélisation basées sur des surfaces

Le deuxième niveau de complexité implique l'utilisation de surfaces pour former les limites des objets ce qui permet de régler le problème d'ambiguïté du modèle fils de fer. Toutefois, le contenu des objets surfaciques ainsi créés reste vide, ce qui complique encore une fois le calcul du volume qui doit être obtenu à partir de la géométrie des surfaces le composant.

Les surfaces d'un modèle surfacique peuvent être planes ou courbes. Les modèles composés de surfaces planes sont souvent appelés « *polygon mesh* » et sont généralement composés de faces triangulaires (TIN), quadrilatères ou d'autres polygones convexes

simples afin de simplifier le rendu graphique. Ces faces peuvent être de formes régulières ou irrégulières et sont composées de vertex (points) et de *edges* (lignes). Le stockage d'un *polygon mesh* consiste minimalement en le stockage des coordonnées de chaque vertex du *mesh* et de la liste de ses vertex adjacents. Afin de faciliter la représentation des faces lors du rendu graphique, on préfère généralement stocker explicitement les faces en tant que liste des vertex qui les composent. Afin d'offrir une plus grande flexibilité lorsque des changements sont apportés dynamiquement au modèle, on peut aussi stocker les *mesh* suivant la méthode appelée *Winged-edge* (Baumgart, 1975). Cette méthode consiste à enregistrer explicitement pour chaque surface, ses vertex, ses faces, mais aussi chaque *edge*. Pour chacun de ces *edges*, ses deux vertex, les deux faces qui le bordent de chaque côté ainsi que les deux *edges* sens horaires et sens anti-horaires les plus près de chaque extrémité sont aussi stockés.

De leur côté, les surfaces courbes sont obtenues par l'application d'algorithmes comme les *Splines*, le plus souvent des NURBS, sur les *edges* composants les faces des surfaces permettant ainsi d'obtenir des courbes lisses et harmonieuses. Pour créer une telle surface on peut partir d'une surface simple (ex : surface plane) laquelle on déforme librement en déplaçant des points de contrôle se trouvant le long des *edges* composant la surface. On peut aussi partir d'une courbe lissée à l'aide d'une *Spline* à laquelle on applique une technique comme le balayage. Le balayage consiste en le déplacement d'un objet 2D comme une courbe ou une surface par exemple, le long d'une trajectoire pour créer un objet. Cette méthode permet de facilement stocker les objets puisque seulement l'objet 2D ainsi que la formule de sa trajectoire doivent être enregistrés. Cette méthode n'est toutefois pas adaptée pour la modélisation d'objet de forme irrégulière puisque le déplacement d'une forme 2D le long d'une trajectoire implique obligatoirement une certaine régularité.

Qu'on traite de surfaces planes ou courbes, l'utilisation de « *mesh* » est souvent suffisante pour la visualisation de ces modèles surfaciques. Toutefois, pour certains modèles plus complexes représentant par exemple des objets surfaciques 3D troués ou contenant d'autres objets 3D, il devient parfois nécessaire de stocker l'orientation de chacune des faces composant sa coquille (*shell*) afin de pouvoir distinguer l'intérieur de l'extérieur de l'objet.

Boundary Representation (B-Rep)

La structure de modélisation basée sur des surfaces la plus connue est appelée B-Rep (Boundary Representation). Cette technique largement implémentée au niveau des outils CAO et DAO est l'une des deux techniques de modélisation géométrique 3D, avec le CSG, les plus répandues. Un B-Rep permet de représenter des objets volumiques 3D seulement par l'assemblage des faces formant sa surface. Un B-Rep est essentiellement une structure en *Graph* dont les nœuds correspondent aux faces, aux *edges* et au vertex et dont l'assemblage forme les frontières d'un solide. Les liens entre les nœuds représentent la connectivité entre les primitives assurant la consistance topologique et les coordonnées liées à chaque vertex correspondent à l'information géométrique. Dans un B-Rep, une face est une portion d'une surface fermée et orientée contenant sa frontière représentée par des *edges*. Un *edge* est une partie d'une courbe contenant sa frontière (des vertex) et un vertex correspond à un point. Pour créer, manipuler et éditer les faces, *edges* et vertex d'un B-Rep, on utilise généralement les opérateurs d'Euler. Les opérateurs d'Euler sont au B-Rep ce que les opérations booléennes sont au CSG. Ils permettent d'assurer l'intégrité des frontières du modèle (fermeture, étanchéité, présence d'*undershoot* et d'*overshoot*) et offrent un mécanisme pour en vérifier la validité. Le principal avantage du B-Rep est sa grande capacité à représenter des solides de forme irrégulière. Il est aussi relativement simple de transformer un B-Rep en une représentation fil de fer, souvent utilisée pour des raisons de simplicité lors de l'affichage graphique. Par contre, le B-Rep a tendance à prendre beaucoup d'espace pour le stockage spécialement dans le cas des modèles complexes. Aussi, même s'il permet la visualisation d'objet 3D comme s'il s'agissait de solide, le B-Rep ne gère pas réellement des solides, mais seulement leur frontière. Pour cette raison, le calcul de certaines analyses spatiales topologiques pourrait s'avérer complexe. Toutefois, lorsque le B-Rep est orienté, i.e. l'intérieur et l'extérieur des objets sont distingués, le B-Rep se rapproche beaucoup de la gestion d'objets volumiques. Il est aussi relativement facile de calculer le volume d'un B-Rep à partir des faces composant sa surface lorsque celles-ci sont planes (De La Losa, 2000).

Structures de modélisation basées sur des solides

La structure de modélisation basée sur des solides consiste en la représentation d'un solide par ses frontières, mais aussi par son intérieur. En effet, cette approche implique la création d'objets par un assemblage de primitives volumiques simples de manière à remplir

l'intérieur des objets en plus de représenter leur frontière. De cette façon, il n'existe plus d'ambiguïté tant au niveau de l'interprétation visuelle qu'au niveau de la connaissance de l'intérieur et de l'extérieur des objets. Dans une telle structure, la représentation des solides doit être suffisamment complète pour faciliter le calcul automatique et non ambigu des propriétés géométriques bien connues comme le volume ou le centre de masse (Requisha et Voelcker, 1982).

Constructive Solid Geometry (CSG)

Il existe plusieurs structures géométriques basées sur des solides. La plus populaire, le CSG, permet la construction de modèles par l'application d'opération d'union, d'intersection et de différence sur des solides élémentaire paramétrable tels que des cubes, sphères, cylindres, cônes, etc. Ces solides élémentaires sont générés à partir de formes de base (cercles, rectangles, carrés...) et de certains paramètres de construction (diamètre, largeur, hauteur...) puis sont déplacés dans l'espace par des translations et des rotations. Les solides élémentaires utilisés pour la construction d'un modèle, leurs paramètres, leurs transformations ainsi que la séquence des opérations appliquées sont généralement stockés sous la forme d'un *Graph* ou d'un arbre, soit une structure de données hiérarchique composée de nœuds (les primitives géométriques) et de relations entre eux (les opérations).

Le CSG est une structure relativement simple à implémenter. L'étanchéité ou la fermeture du solide final créé est aussi facilement atteinte lorsque l'ensemble des primitives le composant le sont elles aussi. Par contre, étant donné la géométrie des solides de base mis à disposition, il peut être très difficile de représenter des objets irréguliers comme par exemple le relief du territoire. Le CSG est bien adaptée lorsque l'on veut offrir à l'utilisateur, la possibilité de construire son modèle de façon intuitive par combinaison et assemblage de primitives volumiques de base. Toutefois, même si plusieurs systèmes permettent de construire des solides en se basant sur le concept du CSG, cette approche seule n'est souvent pas suffisante puisque la forme des objets à représenter est complexe et ne peut pas alors se limiter à un assemblage de primitives de base (Ramos, 2003; Haala *et al.*, 2006; Tsuzuki *et al.*, 2007). En effet, la représentation d'un objet 3D suivant cette structure ne correspond pas à la frontière explicite de l'objet, aucune information sur la connectivité entre les primitives ainsi assemblées n'est présente, et sur l'existence même du solide ainsi

créé en tant qu'entité à part entière puisque la définition de l'objet ne repose uniquement que sur son *Graph*. Pour ces raisons, il est souvent nécessaire dans les systèmes actuels de combiner la structure CSG à celle du B-Rep et diverses méthodes sont présentées pour calculer les frontières d'un solide CSG (Requicha, 1996; Benouamer et Michelucci, 1997; Tsuzuki *et al.*, 2007; Hoffmann, 1992; Ramos, 2003).

Primitive Instancing

Une autre structure géométrique, appelée Primitive Instancing, adopte aussi une approche constructive comme le CSG, mais utilise plutôt des primitives complexes paramétrables pour représenter des objets. Ce type de modélisation consiste à instancier la primitive générique complexe de base et d'adapter cette instanciation en faisant varier des paramètres prédéfinis. Par exemple, dans un ensemble d'engrenage, chacune des pièces sera créée à partir d'une roue de base en spécifiant sa largeur, son rayon et le nombre de dents. Cette approche peut être avantageuse lorsque plusieurs objets du même type doivent être créés. Par contre, si les objets à modéliser sont tous très différents, l'utilisation de cette approche n'est plus justifiée puisque chaque objet demande la création d'une nouvelle primitive (de la Losa, 2000).

Voxel et Octree

La structure géométrique basée sur des solides appelée Voxel consiste en le découpage de façon régulière de la totalité de l'espace à l'aide de cubes élémentaires nommés voxels ("*volumetric elements*") d'une manière semblable au modèle raster et au pixel 2D. Chacun de ces voxels composant l'espace de modélisation, se retrouve soit occupé ou inoccupé par une partie du solide. Le solide ainsi représenté consiste donc en l'ensemble des voxels occupés de l'espace tridimensionnel. Ce modèle permet difficilement de représenter exactement la forme des objets, mais plutôt des approximations qui sont dépendantes de la taille et de la quantité de voxels mise en œuvre. Une grande quantité de voxels plus petits permettra de représenter plus exactement les limites des objets, mais générera un volume de données plus grand. C'est pourquoi cette structure géométrique est généralement considérée comme très gourmande en espace disque et en mémoire. L'analyse spatiale ne peut pas non plus être très élaborée puisqu'elle ne peut compter que sur l'adjacence des

voxels. Les calculs de volumes sont par contre très simples et peuvent être réalisés en faisant la somme des voxels contenus dans les objets.

Afin de diminuer la quantité de données d'un modèle de voxels, on opte souvent pour la structure appelée Octree qui permet de regrouper des voxels adjacents faisant partie de la même entité pour former des cubes plus gros. L'espace se retrouve donc découpé en cubes de tailles variables qui sont stockés dans un arbre possédant une racine (représentant l'espace total), des nœuds (cubes découpés en huit) et des feuilles stockant l'information « espace occupé » ou non. Ceci permet donc une certaine forme de compression tout en facilitant l'accès aux données proches en se basant sur le modèle du Quadtree en 2D (de la Losa, 2000).

Ensemble de solides

Finalement, viennent les modèles représentant des volumes par assemblage de solides irréguliers i.e. de polyèdres. Dans ce genre de modèle, l'assemblage de solides peut se faire au niveau de l'objet tout comme il peut obliger la discrétisation de l'ensemble de l'espace de modélisation comme dans le cas du Tetrahedral Network (TEN) (Pilouk, 1996). Les polyèdres sont assemblés de manière à partager des frontières communes et peuvent être de tailles fixes ou irrégulières. Le tétraèdre est un exemple de ce type de cellule simple qui peut être utilisé dans ce modèle. Les volumes sont alors peuplés de tétraèdres qui eux sont construits à partir d'un ensemble de points qui ne sont pas nécessairement associés sémantiquement à la géométrie de l'objet (Pouliot *et al.*, 2006). En modifiant la densité de ces points, on peut donc affiner la forme des objets sans devoir ajouter une grande quantité de cellules comme c'est le cas lors de l'utilisation de cubes de taille régulière. Cette méthode implique de devoir différencier les faces des polyèdres situées aux frontières des solides afin de pouvoir distinguer les différents volumes entre eux et entre l'espace de modélisation ne faisant pas partie d'un volume.

Ce type de modèle offre comme avantage la possibilité de rendre explicite les relations de voisinage entre les objets (car les frontières font partie intégrante du procédé de modélisation). Cela a pour effet de rendre très intéressant ce type de modèle pour effectuer de l'analyse spatiale topologique en plus de permettre de calculer facilement le volume des objets. Toutefois, remplir les solides de polyèdres ajoute à la complexité de la modélisation

en impliquant une plus grande quantité de calculs et d'information à gérer ce qui peut également nuire à la performance de ces modèles. Il existe plusieurs propositions pour la modélisation de solides irréguliers tels que le 3D Formal Data Structure (3D FDS) (Molenaar, 1990), le Simplified Spatial Model (SSM) (Zlatanova, 2000b) le Urban Data Model UDM (Coors, 2003), le Object Oriented 3D (OO3D) (Shi *et al.*, 2003) ou le Geological TEN (GeoTEN) plus spécifique au domaine géologique (Lachance, 2005). Une particularité importante de ces propositions est qu'elles définissent tous des structures topologiques 3D.

2.2.2 La standardisation des structures géométriques

L'Open Geospatial Consortium (OGC) et le comité ISO/TC 211 de l'International Standard Organisation (ISO), sont les deux principaux organismes responsables de la standardisation dans le domaine de l'information géographique. En 1997, l'OpenGIS Consortium (maintenant OGC) publiait la spécification "*OpenGIS Simple Features Specification*" (SFS). Cette spécification décrit une interface standard permettant à divers systèmes de communiquer en termes de "*Simple Features*" i.e. d'entités géométriques simples 2D. Ces entités sont les points, lignes, "*linestrings*", courbes et polygones définis de manière standard et dont on associe à un système de référence géographique. Les recommandations de cette spécification ont été implémentées dans bon nombre d'applications spatiales comme PostGIS, FME, ArcGIS, etc... et encore aujourd'hui, le SFS représente un des modèles géométriques les plus répandus au niveau des applications gérant des données géométriques 2D.

Plus récemment, l'ISO et l'OGC ont présenté un schéma spatial conceptuel qui décrit d'une manière beaucoup plus complète, les caractéristiques spatiales des entités géométriques et opérations spatiales pouvant s'appliquer sur celles-ci (ISO 19107, 2002). Ce standard international appelé schéma spatial ISO 19107 est équivalent au "*Topic 1: Feature Geometry*" de la spécification "*The OpenGIS Abstract Specification*" de l'OGC. Avec cet effort commun, l'ISO et l'OGC mettent à disposition un modèle standard pouvant servir de guide lors de l'implémentation de la plupart des structures géométriques vectorielles dans une application spatiale. En effet, alors que le SFS se consacrait aux entités simples 2D, le schéma spatial de l'ISO présente un inventaire beaucoup plus complet d'entités

géométriques prenant en charge, en outre, la topologie et le 3D. Pour simplifier sa compréhension, son implémentation et aider à faire le pont avec la spécification SFS encore largement répandue, le schéma spatial ISO 19107 a été décomposé en différents profils. L'un de ces profils, le "*Simple Features*" peut être considéré comme le successeur du SFS et contient un sous-ensemble des entités du schéma spatial ISO 19107 portant sur les entités géométriques 2D non-topologiques. Il est donc important de faire attention au terme "conforme ISO 19107" dans la description de certaines applications, car cela ne signifie pas nécessairement qu'elles permettent la gestion de modèles 3D ou de modèles topologiques. La majorité des systèmes actuels qui implémentent ce schéma spatial sont effectivement conforme qu'en partie puisqu'ils ne gèrent entre autres que les primitives ponctuelles, linéaires et surfaciques 2D, soit le profil "*Simple Features*" (ex : GeoServer, Deegree, GeOxygene, RedSpider). En annexe A, on présente le schéma conceptuel du schéma spatial ISO 19107. Pour ce qui est des structures géométriques de type matriciel (orientées-espace), l'ISO propose aussi une solution pour leur standardisation dans la spécification : "*Schema for coverage geometry and functions*" sous la bannière ISO 19123.

Sans présenter en détail l'ensemble de la norme ISO 19107, les paragraphes suivants présentent les éléments importants qui touchent plus particulièrement le 3D et qui sont susceptibles d'entrer dans la composition des structures géométriques.

La norme ISO 19107 propose la définition des primitives de base point (GM_Point), courbe (GM_Curve), surface (GM_Surface) et solide (GM_Solid) sur lesquelles repose la construction des modèles géométriques. En langage ISO, une primitive est un objet qui n'est pas décomposable en d'autres primitives dans le système. Les courbes, surfaces et solides sont donc considérés comme des primitives au sein de cette norme même si théoriquement ils sont décomposables en primitive plus simple (ce sont des sous-classes de GM_Primitive). Le GM_Solid est l'élément de base de la géométrie tridimensionnelle de l'ISO. La norme ISO nous montre qu'un GM_Solid est construit à partir de ses frontières, soit un GM_SolidBoundary, définit lui-même par une enveloppe intérieure et extérieure à la manière du B-Rep. Les enveloppes intérieures et extérieures d'un GM_SolidBoundary sont représentées par des coquilles fermées (GM_Shell). De son côté, un GM_Shell consiste en un certain nombre de références à des surfaces orientées

(GM_OrientableSurface) connectées entre elles dans un cycle topologique i.e. un objet fermé et sans frontière. Chacune des GM_OrientableSurface qui composent un GM_Shell est formée d'une surface (GM_Surface) et de son orientation (+, -). Avec ces éléments, la norme de l'ISO permet donc de représenter de manière standard l'ensemble des structures géométriques basées sur des points et des lignes et celles basées sur des surfaces.

Pour ce qui est des structures géométriques basées sur des solides, la norme ISO met aussi à disposition les éléments nécessaires à leur représentation. Par exemple, la norme présente plusieurs primitives volumiques telles que GM_Sphere, GM_Cylinder ou le GM_Cone qui peuvent être utilisées pour représenter de manière standard les primitives entrant dans la composition des modèles constructifs comme le CSG ou le Primitive Instancing. Si une primitive volumique n'existe pas dans la norme, elle peut être construite par l'assemblage d'éléments de dimension inférieure pour former un GM_Solid (ex : un cube peut être créé par l'assemblage de surfaces) ou à l'aide des éléments complexes de la norme, soit les composites et les agrégats. En effet, les primitives géométriques de la norme ISO sont des éléments de base qui peuvent être assemblés pour former des modèles géométriques ou des primitives plus complexes telles qu'un GM_Composite ou un GM_Aggregate. Un GM_Composite est un élément complexe dont la géométrie sous-jacente peut être traitée comme une simple primitive. Cet assemblage est aussi restreint à un seul type de géométrie. Par exemple, un GM_CompositeSurface est une collection de surfaces orientées dont leurs frontières communes reposent sur les mêmes *curves* et qui lorsque considérée comme un tout forme une simple surface. D'une manière semblable, un GM_CompositeSolid est une collection de solides assemblés en paires à partir de surfaces communes composant leurs frontières. Cette collection de solides est un élément complexe qui possède les mêmes caractéristiques qu'une primitive de type solide. De leur côté, les GM_Aggregate (GM_MultiPoint, GM_MultiCurve, GM_MultiSurface, GM_MultiSolid) sont aussi des assemblages de primitives de même type, mais dont les frontières peuvent être disjointes. En utilisant ces concepts, des modèles du type Ensemble de solides tels que le TEN ou le GeoTEN pourraient relativement facilement être représentés d'une manière standard à l'aide de la norme ISO. Bien qu'il n'existe pas de primitives volumiques de base telles que le tétraèdre nécessaire à la construction de ces modèles, il est possible à l'aide de cette norme de représenter de tels modèles en tirant profit des composites. En effet, un

modèle tétraédrique est typiquement composé d'un ensemble de solides formés eux-mêmes par un assemblage de tétraèdres. Un tel modèle pourrait être représenté selon les concepts de l'ISO par une collection de GM_CompositeSolid dont chacun d'eux est formé par une collection de solides soit les tétraèdres qui sont eux-mêmes construits à la manière du B-Rep par l'assemblage de quatre surfaces triangulaires. La figure suivante montre les trois niveaux d'agrégation d'un modèle tétraédrique soit le modèle lui-même, les solides composites qui le composent et finalement les tétraèdres qui forment ces solides.

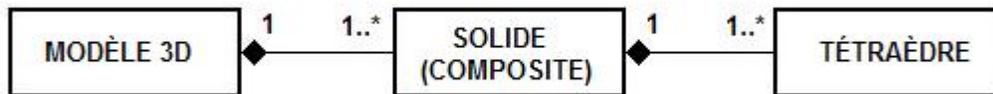


Figure 1: Les niveaux d'agrégation d'un modèle tétraédrique.

La présence d'une primitive volumique comme le GM_Solid, des classes connexes pour la construction de solides à la manière du B-Rep (GM_SolidBoundary, GM_Shell...) ainsi que la possibilité d'assembler ces primitives en modèle plus complexe (GM_Composite, GM_Aggregate, GM_CompositeSolid, GM_MultiSolid...), font du schéma spatial de l'ISO 19107 une norme générique bien adaptée pour la représentation des différentes structures géométriques 3D et pour la modélisation géométrique 3D en général.

2.3 La gestion des données et des modèles 3D

La gestion des modèles géométriques 3D au sein d'une application spatiale implique deux choses, le stockage du modèle et l'ensemble des processus destinés à l'administration des données et des traitements au sein du système. La persistance des modèles sur support numérique passe par l'implémentation d'une structure de stockage qui viendra définir les bases de l'organisation physique des données. Cette structure (à ne pas confondre avec la structure géométrique) peut être implémentée au sein d'un des différents médias de stockage disponible tel qu'une base de données ou un fichier. Pour sa part, la représentation et la manipulation du modèle au sein de l'application passent par une structure géométrique comme celles présentées plus tôt dans ce chapitre. L'application doit donc pouvoir accéder à l'information (le modèle) stockée sur support numérique et la traduire en une structure

géométrique compréhensible et supportée par le programme dans le but de la manipuler et d'éventuellement l'analyser et la diffuser. Ainsi, la gestion des données géométriques inclut l'ensemble des fonctionnalités chargées de créer, maintenir, traiter et interroger une collection de données géométriques que ce soit au niveau du programme lui-même ou de la base de données. La structure géométrique implémentée au niveau du programme et la structure de stockage du modèle sont toutefois deux niveaux structurels distincts dont un système qui gère des données géométriques devrait prendre en charge. Pour bien faire la différence entre les deux, on peut prendre l'exemple d'un logiciel comme Autocad et de sa structure de stockage i.e. le format de fichier d'extension .DWG. Comme Autocad permet entre autres de créer des modèles selon la structure géométrique du CSG, toute information nécessaire pour recréer le modèle CSG au sein de ce logiciel se retrouve codifiée, structurée et stockée au sein d'un fichier .DWG lors d'une sauvegarde. Lorsqu'un usager d'Autocad ouvre ce fichier pour importer son modèle, l'information contenue dans le fichier est interprétée et traduite en un modèle dans la structure géométrique du CSG au sein du programme soit généralement sous la forme d'un arbre binaire.

La persistance des données géométriques implique la codification selon un format prédéfini des propriétés géométriques des primitives formant le modèle. Par exemple, le stockage d'un modèle par balayage pourrait impliquer l'enregistrement des coordonnées formant les primitives 2D ponctuelles, linéaires ou surfaciques avec pour chacune d'elles, une valeur correspondant à la hauteur d'extrusion. Le stockage de cette information dans une application spatiale peut se faire principalement de deux façons soit à l'intérieur d'un fichier ou d'une base de données interne ou externe à l'application.

Le stockage par fichier est la méthode qui vient par défaut avec la plupart des logiciels SIG. Bien que très simple, elle nécessite de parcourir en entier le fichier lors de recherche pour trouver les éléments désirés. On lui reproche aussi certains problèmes de redondance, de maintenance et d'intégrité des données. De plus, un fichier étant accessible en écriture que par une seule personne à la fois, le stockage par fichier est généralement plus approprié au travail individuel et dans les petites organisations.

De son côté, la gestion par base de données permet d'éliminer ces contraintes et permet de porter à un niveau supérieur la gestion des données à l'intérieur des SIG en la faisant passer

du niveau simple usager à celui institutionnel. En effet, la gestion d'une base de données est généralement prise en charge par un SGBD tel Oracle, DB2, PostgreSQL, SQL Server, etc. et présente de nombreux avantages tels que l'accès multi-usagers, la sécurité et le maintien de l'intégrité des données. Afin de permettre aux usagers de SIG de bénéficier de ces avantages, les fournisseurs de SIG et de SGBD ont tous deux fait évoluer leurs produits dans un effort commun d'intégration. Les fournisseurs de SIG ont développé des fonctionnalités, des plug-ins ou des produits intermédiaires (*middlewares*) pour se brancher aux principaux SGBD alors que ceux-ci ont été « spatialisés » par l'ajout de la gestion de primitives géométriques et d'opérateurs spatiaux.

D'une manière générale, la façon dont sont stockées les données dans un SGBD dépend du type de SGBD utilisé. Dans un SGBD relationnel, les données sont stockées au sein de lignes et de colonnes de tables relationnelles. Chaque colonne d'une telle table se voit attribuer un type de donnée tel que entier, texte, date, etc., et chaque table possède sa clé primaire lui permettant d'identifier de manière unique les objets qu'elle contient et de faire le lien avec les autres tables du système. L'information composant un modèle géométrique tel que les primitives, les liens entre elles et les coordonnées x,y,z qui les composent, peut donc être stockée de manière ordonnée au sein d'un tel système. Typiquement, une « couche » spatiale est représentée par une table dont chaque enregistrement (ligne) représente un objet spatial dont les propriétés géométriques et descriptives incluant les coordonnées sont stockées au sein de colonnes. Afin d'améliorer la performance lors de l'accès aux données, les coordonnées de chaque objet spatial sont indexées. L'indexation est la technique qui permet de retrouver plus rapidement certains éléments d'une table à l'aide d'un index calculé à partir des valeurs d'une ou de plusieurs colonnes. Au niveau spatial, cette indexation réalisée par le biais de techniques comme le R-Tree, le Quadtree ou l'Octree, permet d'optimiser les requêtes spatiales et de rechercher plus rapidement à travers les éléments d'un modèle en tenant compte des propriétés géométriques telles que la distance entre ces éléments ou les coordonnées de leur rectangle ou boîte englobante (Samet, 1995).

Dans un SGBD orienté-objet tel qu'ObjectStore, Poet FastObjects, Versant Developer Suite ou Objectivity, les propriétés géométriques telles que les coordonnées ne sont plus stockées

comme des valeurs numériques mais peuvent être stockées comme des objets complexes créés par le biais d'un des langages de programmation orienté-objet supporté par le SGBD. Ainsi, des objets de type point, ligne ou polygone peuvent être créés pour encapsuler les coordonnées décrivant la primitive géométrique ainsi que d'autres informations telles que le système de référence géographique.

Sur le marché, la grande majorité des SGBD dit spatiaux sont des solutions plutôt hybrides. En effet, les produits tels qu'Oracle Spatial, DB2 Spatial Extender, PostGIS, SQL Server Katmai, etc. sont des modules venant se greffer à un SGBD relationnel lui conférant des capacités de gestion des objets géométriques à la manière orientée-objet. Ces SGBD spatiaux permettent donc d'ajouter au sein de tables relationnelles une colonne de type « géométrie » venant encapsuler et stocker les propriétés géométriques d'un point, d'une ligne ou d'un polygone au même titre que les types entier, texte, date, etc. Ces SGBD implémentent aussi des index spatiaux ainsi que plusieurs opérateurs spatiaux leur permettant ainsi d'interroger et de manipuler spécifiquement ces objets

Cette « spatialisation » des SGBD a été réalisée dans la majorité des cas en implémentant une spécification dérivée du SFS soit la spécification "*OpenGIS Simple Features Implementation Specification for SQL*". Cette spécification décrit un schéma SQL standard destiné au SGBD, pour le stockage, la récupération, le requêtage et la mise à jour des entités géométriques simples 2D (vectoriels). Le stockage des modèles matriciels (pixels) étant fondamentalement différent, les fournisseurs de SGBD spatiaux ont aussi développé des techniques spécifiques pour leur gestion. D'une manière semblable au modèle vectoriel, des types géométries propres au modèle matriciel ont été créés pour leur stockage, leur indexation et leur requêtage au sein des SGBD spatiaux (par exemple GeoRaster dans Oracle Spatial).

Jusqu'à tout récemment (depuis Oracle spatial dans sa version 11.1g), les SGBD spatiaux n'offraient pas encore de primitives volumiques au sein de leur système. Le stockage des modèles 3D s'effectue donc encore aujourd'hui presque entièrement au sein de fichiers. Nous verrons toutefois plus loin dans ce chapitre que des études ont été réalisées et qu'il existe des méthodes pour contourner cette lacune.

2.4 L'analyse spatiale 3D

La 3^e composante fondamentale identifiée pour constituer un SIG correspond à ses capacités d'analyse spatiale.

2.4.1 Rappel des concepts

D'une manière générale, l'analyse spatiale peut être définie comme un raisonnement qui permet de déduire les caractéristiques d'un phénomène en faisant intervenir des données géographiques (OQLF, 2004). Les aspects géométriques et topologiques des représentations spatiales permettent de distinguer l'analyse spatiale, d'une analyse conventionnelle (mathématique, statistique ou logique par exemple). Plusieurs publications ont été faites sur ce sujet largement couvert dans le monde du SIG (Anselin 1995; Fotheringham *et al.*, 2000; Goodchild 2000; Longley *et al.*, 1999).

L'analyse spatiale peut d'abord se réaliser visuellement, à partir de représentations, d'univers 2D (une carte par exemple) ou 3D (un modèle 3D par exemple). En exploitant ces vues, l'analyse spatiale permet d'examiner les objets, les patrons et certains de leurs aspects visuels. Même si la visualisation des données spatiales peut être utile pour obtenir certaines informations et pour effectuer de l'analyse qualitative, pour la plupart des applications, une analyse quantitative est nécessaire (Verbree *et al.*, 2005). Ainsi, à partir de traitements spécifiques appliqués sur des données géométriques, l'analyse spatiale peut permettre d'identifier et de calculer de nouvelles informations qui seraient difficiles ou impossibles de déduire sans ces opérations. On parle alors de l'application d'opérateurs métriques, topologiques, arithmétiques ou logiques. Les opérateurs métriques permettent le calcul de la position, de la forme, de l'aire, du périmètre, du volume ou de la distance des objets géométriques alors que les opérateurs topologiques font plutôt références aux relations spatiales (ou de voisinages) entre ceux-ci et peuvent être de cinq types : proximité, intersection, inclusion, égalité et adjacence (Cromley, 1992). Par opérateurs logiques on entend les fonctions classiques du type VRAI, FAUX, OUI, NON, ET, OU, >, <, =. Les opérateurs arithmétiques sont ceux utilisés pour modéliser les opérations de calculs mathématiques telles que l'addition (+), la soustraction (-), la multiplication (*) et la division (÷). Ces différents opérateurs sont appliqués sur les modèles géométriques et l'implémentation des algorithmes sous-jacents dépend directement de la structure

géométrique. Par exemple, le calcul d'adjacence entre deux objets géométriques sera effectué différemment dans un modèle de type B-Rep que dans un modèle Octree.

On peut ainsi distinguer l'analyse spatiale selon qu'elle s'effectue dans un univers 2D (système de coordonnées planimétriques X,Y) ou 3D (système de coordonnées X,Y,Z), selon la dimension des objets examinés (0D à 2D, axiomes de la géométrie plane) et 3D (axiomes de la géométrie des solides) ou encore selon le type d'analyse topologique effectué (2D ou 3D). Notons que l'analyse spatiale 3D ne peut se réaliser qu'en exploitant des systèmes informatiques gérant de manière explicite les coordonnées tridimensionnelles (ex. x,y,z) associées aux objets à représenter. Les objets localisés dans ces univers pourront posséder différentes dimensions (0D à 3D). La catégorie d'opérateurs à appliquer sera ici importante, dépendamment de la dimension de ces objets et c'est pourquoi nous discuterons plus en détail cet aspect particulier.

Le recensement des opérateurs spatiaux dans les SIG actuels montre que ceux-ci sont essentiellement 2D (Pilouk, 1996; Zlatanova, 2000b; Rahman, 2000; Zlatanova *et al.*, 2002; De La Losa, 2000). Ceci est dû au fait qu'ils soient basés sur une géométrie plane et que seules les coordonnées x et y sont prises en compte lors des calculs. Au mieux, ils permettent d'effectuer certaines analyses spatiales 3D comme des calculs d'intervisibilité entre deux points et des calculs d'orientation ou de pentes lorsque l'altitude des points x,y est connue (lorsqu'on dispose d'un modèle 2.5D). Toutefois, la majorité des opérateurs spatiaux courants tels que l'intersection, l'analyse de proximité ou d'inclusion, les calculs d'aire et de distance sont destinés à être appliqués aux modèles 2D (planaires) traditionnels des SIG et ont donc été conçus en conséquence i.e. sans la prise en compte de la 3^e dimension.

Pour ces raisons, et à moins d'une programmation spécifique supplémentaire, une opération spatiale dite 2D appliquée sur un modèle 3D ne fournira pas le résultat attendu puisque l'algorithme ne tiendra pas compte de la troisième dimension dans les calculs, seules les coordonnées x,y seront traitées. Par exemple, l'aire calculée par un opérateur 2D d'une surface plane 3D perpendiculaire au plan horizontal serait nulle puisque la dite surface, en projection plane (celle utilisée par l'opérateur 2D) sera perçue comme une ligne et non pas une surface. Ainsi, l'analyse spatiale est dite 3D lorsqu'elle tiendra compte des trois

dimensions des données géométriques lors des calculs. Dans le cas de l'analyse spatiale vectorielle 3D, on parlera d'analyse portant sur des ensembles discrets de points, lignes, polygones, mais aussi de volumes tandis que du côté matriciel cette analyse porterait sur des grilles continues de voxels.

2.4.2 Standardisation des opérateurs spatiaux

Il existe très peu de normes aidant à la standardisation des opérateurs d'analyse spatiale (mise en œuvre et application). Le standard y portant une attention particulière est la spécification "*OpenGIS Simple Features Implementation Specification for SQL*" de l'OGC et vise le traitement des données 2D au sein d'une base de données. Cette spécification définit huit méthodes pour tester les relations spatiales topologiques entre objets spatiaux simples basées sur le modèle des neuf intersections d'Egenhofer (Egenhofer *et al.*, 1990) et sept opérateurs spatiaux tels que le calcul de distance, de l'union ou de la différence entre objets spatiaux. D'autres méthodes comme le calcul de l'aire ou du centroïde d'un polygone sont aussi abordées dans cette spécification. L'approche amenée par Egenhofer pour évaluer la relation entre deux géométries consiste à tester l'intersection de l'intérieur, de la limite et de l'extérieur des géométries pour ensuite classifier la relation selon la matrice d'intersection résultante. Théoriquement, le modèle d'Egenhofer montre qu'il existe 512 (2^9) types de relations spatiales, mais seulement un petit groupe de celles-ci peut être apprécié dans la réalité. L'OGC en définit cinq comme étant les relations spatiales de base avec leurs matrices d'intersection correspondantes (Disjoint, Touches, Crosses, Within, Overlaps) et en ajoute trois autres à des fins d'accommodement (Contain, Intersects, Equal). Le tableau suivant résume l'ensemble des méthodes pour tester les relations spatiales telles que définies par l'OGC :

Relation	Description
Equals	spatially equal to: $a=b$
Disjoint	spatial disjoint: equivalent to $a \cap b = \emptyset$
Intersects	spatially intersects: $[a \cap b]$ is equivalent to $[\text{not a disjoint}(b)]$
Touches	spatially touches: equivalent to $[a \cap b = \emptyset \text{ and } (a \cap b) \neq \emptyset]$; does not apply if a and b are points
Crosses	spatially crosses: equivalent to $[\dim(I(a) \cap I(b)) < \max\{\dim(I(a)), \dim(I(b))\}]$ and $a \cap b \neq \emptyset$ and $a \cap b \neq b$

Relation	Description
Within	spatially within: within(b) is equivalent to [$a \cap b = b$ and $I(a) \supseteq I(b)$]
Contains	spatially contains: [a contains(b)] is equivalent to [b within(a)]
Overlaps	spatially overlaps: equivalent to [$\dim(I(a) \cap I(b)) = \dim(I(a)) = \dim(I(b))$ and $a \cap b \neq a$ and $a \cap b \neq b$]
Equals	spatially equal to: a=b

Tableau 1: Les types de relations spatiales du SFS for SQL extraits de OGC, 1999.

Ces méthodes pour tester les relations spatiales entre objets spatiaux simples telles que présentées et standardisées par l'OGC sont appliquées à des objets spatiaux ponctuels, linéaires et surfaciques dans un univers 2D. Plusieurs projets de recherche se sont attardés sur la clarification des relations entre objets spatiaux dans un univers 2D mais très peu se sont penchés sur les relations spatiales dans un univers 3D (Zlatanova, 2000). Quelques projets de recherche ont montré que le modèle d'intersection d'Egenhofer peut être utilisé pour déterminer les relations spatiales entre objets spatiaux ponctuels, linéaires, surfaciques, mais aussi volumiques dans un univers 3D (Bric, 1993; Egenhofer, 1995; Zlatanova, 2000). L'introduction de la 3^e dimension change la donne au niveau des cas possibles de relation spatiale entre les objets spatiaux et les différents auteurs ne s'entendent pas tous sur leur quantité. Dans Zlatanova, 2000, le modèle des neuf intersections d'Egenhofer est appliqué pour déterminer les relations spatiales possibles entre objets spatiaux 3D et 25 contraintes sont introduites afin d'en éliminer les cas impossibles. En appliquant ces contraintes, 69 types de relations spatiales seraient possibles en 3D et devraient donc être considérés lors de l'implémentation d'une application offrant des capacités d'analyse spatiale 3D.

Ces relations possibles peuvent théoriquement être regroupées sous l'une ou l'autre des huit appellations standards définies par l'OGC (Disjoint, Touches, Crosses, Within, Overlaps, Contain, Intersects, Equal) bien que dans quelques situations, ces noms établis pour les relations en 2D peuvent paraître inappropriés pour certaines relations entre objets 3D (Zlatanova, 2000). Par exemple, dans la figure 3, il n'est pas nécessairement évident de distinguer qu'une surface pénétrant partiellement à l'intérieur d'un solide est une relation

de chevauchement. Pourtant, nous sommes bien en présence d'un chevauchement puisque nous avons une intersection partielle entre l'intérieur des deux objets.

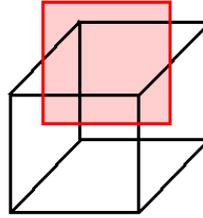


Figure 2: Chevauchement entre une surface et un solide.

Un SIG 3D pourrait donc implémenter ces huit méthodes standards à l'aide d'algorithmes validant l'ensemble des relations possibles entre objets ponctuels, linéaires, surfaciques et volumiques dans un univers 3D.

En plus de ces huit méthodes, l'OGC définit aussi sept opérateurs spatiaux dans la spécification SFS qui permettent de retourner une distance ou une nouvelle géométrie suite à un calcul. Le tableau suivant montre et décrit ces sept opérateurs :

Opérateur	Description
Distance	the shortest distance between any two points in the two geometries as calculated in the spatial reference system of this geometry
Buffer	all points whose distance from this geometry is less than or equal to a specified distance value
Convex Hull	the convex hull of this geometry
Intersection	the point set intersection of the current geometry with another selected geometry
Union	the point set union of the current geometry with another selected geometry
Difference	the point set difference of the current geometry with another selected geometry
Symmetric difference	the point set symmetric difference of the current geometry with another selected geometry (logical XOR)

Tableau 2: Les opérateurs spatiaux standards du SFS for SQL extraits de OGC, 1999.

Encore une fois, la spécification SFS suggère l'implémentation de ces opérateurs avec comme objectif d'être appliqués sur des objets spatiaux ponctuels, linéaires et surfaciques dans un univers 2D. Toutefois, l'ensemble de ces opérateurs pourrait théoriquement être implémenté pour traiter aussi des points, des lignes, des polygones et des volumes dans un

univers 3D. Par exemple, l'opérateur Intersection pourrait très bien être utilisé pour calculer l'intersection d'un solide avec une surface ou un autre solide.

Avec cette spécification, l'OGC définit les méthodes et opérateurs de base permettant de couvrir la grande majorité des principaux traitements d'analyses spatiales vectorielles que l'on retrouve dans les SIG. Nous pensons donc qu'un SIG 3D implémentant ces méthodes et opérateurs, avec la logique 3D sous-jacente qui s'impose i.e. les algorithmes prenant en charge la 3^e dimension, serait très bien outillé pour répondre à la majorité des demandes des usagers en terme d'analyse spatiale tridimensionnelle. Toutefois, l'implémentation des différents algorithmes 3D de ces opérateurs spatiaux représente un travail colossal d'autant plus qu'il n'existe pas de bibliothèque ou d'API complète d'algorithmes d'opérateurs spatiaux 3D standards comme c'est le cas en 2D avec des produits comme la Java Topology Suite (JTS) ou les bibliothèques propriétaires des différents logiciels SIG.

2.5 Le partage des modèles 3D

Dans un objectif de partage de connaissance et d'échange d'information, il est important d'examiner les options qui s'offrent à nous pour faciliter l'accès aux modèles 3D i.e. les rendre disponible pour leur visualisation ou leur importation. Nous allons donc passer en revue les différentes technologies et stratégies de partage des données géométriques 2D présentement employées afin de vérifier si elles sont prêtes à supporter les modèles 3D. Nous accorderons une attention particulière aux technologies orientées vers Internet, média de communication par excellence, et aux standards entrants dans le processus de diffusion afin de vérifier où ils en sont par rapport au 3D.

Il existe différentes façons de transmettre des modèles géométriques. La plus simple, la méthode manuelle consiste à produire un document (papier ou numérique) ou sauvegarder l'information sur un support numérique comme un CD ou un DVD et le faire parvenir à destination. Avant l'ère des nouvelles technologies, c'était souvent la seule méthode disponible. Avec Internet et les réseaux locaux, il est maintenant beaucoup plus simple de transmettre l'information, et ce, de manière plus rapide et à un plus grand nombre d'usagers. L'internet est le moyen de communication par excellence et nous offre plusieurs solutions pour diffuser et distribuer des modèles que ce soit par courriel, par le biais d'une

page Web ou de manière plus dynamique par l'intermédiaire d'une application en ligne. En effet, le Web regorge maintenant de sites Web offrant la diffusion d'information cartographique dynamique par le biais d'applications ou d'API de cartographie en ligne telles que ArcIms, MapGuide (Enterprise ou Open Source), MapXtreme, MapX, Google Map, Google Earth, ArcGIS Explorer, Virtual Earth, Nasa World Wind etc. Le dynamisme est certainement l'élément responsable du succès de ces applications et ce qui les rend particulièrement intéressantes. Une vue statique d'un modèle géométrique comme par exemple une carte peut être suffisante pour un certain nombre d'applications, mais cette vue n'offre certes pas la richesse d'une navigation dynamique et libre au travers d'un modèle. Le dynamisme de ces technologies est dû en grande partie au concept de service web et au principe du client-serveur.

2.5.1 Les services Web

Un service Web peut se définir comme un composant applicatif accessible sur le Web, par l'entremise d'une interface standard ou non, qui peut interagir dynamiquement avec d'autres applications en utilisant des protocoles de communication basés sur le XML, et cela, indépendamment du système d'exploitation et des langages de programmation utilisés (OQLF, 2004). Dans le cadre d'un service de diffusion cartographique en ligne, le service Web permet de recevoir sur demande suite à une requête paramétrée, une carte sous forme d'image créée à partir d'un serveur hébergeant le modèle géométrique. Le client (par exemple un navigateur internet) est l'application à partir de laquelle un usager construit et envoie sa requête au serveur par le biais du service Web. Le serveur est l'ordinateur contenant l'application permettant de recevoir les requêtes des clients, d'effectuer les traitements nécessaires afin de générer l'extrait offert par le service Web et transmettre la réponse au client. Les services web sont utilisés en général pour rendre accessible sur le web des applications ou des données dans le cadre d'un contrat d'échange entre entreprise et client (Business to Consumer) ou entre entreprise et entreprise (Business to Business). Il existe présentement une grande quantité de services Web en tout genre implémentés pour un besoin bien spécifique entre deux organisations ou offerts au grand public par le biais d'annuaires en ligne (<http://www.webservicelist.com>, <http://www.wsindex.org>). Par exemple, deux organisations peuvent implémenter un service web pour copier sur demande, le contenu d'une base de données vers une autre dans un contrat d'échange d'information.

Une autre organisation peut offrir un service public de validation automatique de numéros de téléphone ou de codes postaux pour assurer aux clients de ce service une qualité et une intégrité d'information avant de la stocker.

2.5.2 Limites et solutions pour la diffusion en 3D

Ainsi, les services Web de cartographie en ligne sont des outils de prédilection pour les organisations désireuses de rendre accessible en temps réel de l'information sous forme de carte. Toutefois, les principaux produits offrant de telles capacités ne supportent pas le 3D, étant généralement basés sur des modèles stockés sous l'un des formats des principaux logiciels SIG eux-mêmes reposants sur des structures géométriques incompatibles au 3D. Au mieux, ils permettent la diffusion de modèle 2.5D comme ceux montrant le relief du territoire et les bâtiments. En fait, faute de moyens, on diffuse encore beaucoup sur le Web les modèles 3D sous forme d'image statique. La distribution de ces modèles repose encore aussi en grande partie sur le partage de fichiers. En effet, le recours au CD ou au DVD comme support numérique pour donner accès aux modèles 3D généralement très lourds demeure encore souvent le seul moyen à disposition pour partager cette information. Il existe toutefois quelques solutions intéressantes de diffusion de modèle 3D sur Internet. En effet, on retrouve certains langages comme le Virtual Reality Modeling Language (VRML) et le X3D, son successeur, ayant fait leur apparition il y a déjà quelques années, qui permettent la représentation (géométrique et graphique) et la manipulation de modèles 3D au sein d'un navigateur Web. Les spécifications de ces deux formats ont d'ailleurs été acceptées comme standards ISO. Plusieurs projets de recherche ont utilisé ces langages, couplés à des bases de données, CAO ou SIG, afin de diffuser sur Internet des modèles 3D (Coors et Jung, 1998; Zlatanova et Tempfli, 2000c; Aren *et al.*, 2003; Vries et Stoter 2003). Une alternative intéressante est aussi apparue plus récemment pour la diffusion des modèles 3D soit les fichiers PDF 3D. Des entreprises comme Visual Technology Services ou Adobe offrent des produits permettant de visualiser et manipuler des modèles 3D au sein d'un fichier PDF. Déjà, les développeurs d'outils CAO comme Bentley et GeoSoft commencent à exploiter cette technologie en permettant d'exporter des modèles 3D directement en PDF à partir de leurs produits. Une autre alternative très populaire serait le Keyhole Markup Language (KML), une grammaire XML utilisée pour coder conjointement les données géométriques avec leurs propriétés graphiques dans les visualisateurs de globe

virtuel en ligne tels que Google Earth, Microsoft Virtual Earth, etc. Ce format propriétaire de Google a récemment été adopté comme standard ouvert par l'OGC. Le KML fournit la syntaxe pour la représentation de primitives géométriques vectorielles ponctuelles, linéaires et surfaciques en permettant pour chacune d'elles le stockage des coordonnées x, y et z. Il permet aussi de stocker les propriétés d'images stockées localement ou sur un serveur distant afin de permettre leur drapage sur le relief du globe virtuel.

Bien qu'assez limitées, des solutions de diffusion de modèles 3D existent et ce domaine semble être en pleine croissance. D'ailleurs, du côté des standards de partage de l'information géométrique plus spécifique aux sciences géographiques, on commence aussi à évoluer vers le 3D. En effet, l'OGC propose de standardiser les interfaces de services Web destinés au partage de l'information géographique dans l'optique de favoriser l'interopérabilité entre les systèmes. Bien qu'au départ leur usage se limitait aux données 2D, leurs capacités ont depuis été élargies afin de supporter les données 3D. Ces standards et spécifications tels que le GML, WMS, WFS, WTS, etc. seront présentés plus en détail en mettant l'emphase sur leurs possibilités face au 3D. Nous présenterons aussi un aperçu du Web 3D Service (W3DS), le tout dernier des services Web de l'OGC, encore à l'étape de discussion, portant spécifiquement sur le partage de modèles 3D. Nous verrons ce que ce nouveau standard, à terme, pourrait apporter au 3D.

2.5.3 Le Geography Markup Language

Nous ne pouvons parler de partage de données sans aborder la notion de langage de communication. La tendance actuelle est d'exploiter des langages génériques de balise extensibles de type XML (eXtensible Markup Language) ou GML (Geography Markup Language). XML (eXtensible Markup Language) est un langage informatique de balisage générique supporté par le World Wide Web Consortium (W3C). Son objectif initial était de faciliter l'échange de données entre systèmes d'informations hétérogènes, dont principalement sur Internet (<http://www.w3.org>). Le XML est utilisé pour exprimer des langages de balisages spécifiques comme le XHTML, le SVG, ou le Geography Markup Language (GML) par exemple. Le GML est la grammaire XML, définie par l'OGC pour représenter d'une manière standard des entités géographiques. Le GML sert de langage de modélisation et format de stockage pour les systèmes d'information géographique et est

aussi utilisé comme format d'échange de données spatiales sur Internet (<http://www.opengeospatial.org>). C'est un standard ouvert, indépendant des technologies et non propriétaire. Le langage GML a été adopté comme standard international par l'ISO (sous la bannière ISO 19136) en 2007. Le GML n'est pas le seul langage utilisé pour décrire de l'information géographique, mais il est le premier à être accepté par la majorité des intervenants de la communauté des sciences géographiques et surtout, il est le seul à proposer une description des aspects sémantiques associés aux objets à modéliser. Étant bâti sur le XML, le GML profite de l'ensemble des technologies XML disponibles à ce jour comme par exemple, le schéma XML, le XLink, et le XPointer (Lake, 2004). De plus, par sa syntaxe très flexible, le GML permet de combiner facilement les données spatiales avec des données non spatiales pour ainsi rattacher de l'information aux entités géométriques. En effet, le GML permet de décrire la position, la forme et l'étendu d'un objet spatial mais aussi ses propriétés descriptives comme par exemple le type de sol, le type de roche, la densité ou toute autre information sémantique.

Depuis la version 3, le GML est maintenant adapté à la modélisation 3D et permet de représenter entre autres, des objets volumiques. Il permet aussi de représenter les objets topologiques. Un des points forts du langage GML est sa concordance avec le schéma spatial ISO 19107. En effet, on retrouve dans le GML les éléments de syntaxe nécessaires à la représentation de la majorité des entités géométriques et leur comportement définis dans le schéma spatial de l'ISO. Pour plus de détail sur la représentation des objets volumiques en format GML, consultez l'annexe B.

2.5.4 Les spécifications de services Web standards de l'OGC

L'OGC propose de standardiser les interfaces de services Web destinées au partage et à la diffusion de l'information géographique dans l'optique de favoriser l'interopérabilité entre les systèmes. En effet, la production de données géométriques à jour et de qualité est très coûteuse. L'échange et le partage de données entre organisations sont souvent les seules façons pour les décideurs et autres utilisateurs de données d'obtenir toute l'information désirée (de Vries *et al.*, 2004). Les possibilités d'Internet et des services Web côté diffusion de l'information font de ces technologies des avenues de premier plan pour les organisations qui désirent systématiser les processus de transfert de l'information

géographique. Par contre, la nature hétérogène des données spatiales autant sur le plan technique que sémantique cause problème. En effet, les nombreux formats de données utilisés pour stocker l'information ainsi que les différentes structures géométriques utilisées rendent très complexes les processus d'échange et d'intégration de données. L'interopérabilité entre les données et les systèmes doit être envisagée afin d'amenuiser cette hétérogénéité qui freine le partage de l'information. C'est donc pour ces raisons qu'il y avait nécessité du côté de l'OGC à standardiser ce processus de partage de l'information géographique. Ce travail de standardisation de l'OGC a résulté en différentes spécifications de services web standards telles que le *Web Map Service (WMS)*, le *Web Feature Service (WFS)*, le *Web Coverage Service (WCS)*, le *Web Terrain Server (WTS)* ainsi que le *Web 3D Service (W3DS)*. À noter aussi que l'OGC a récemment adopté comme standard pour la représentation et le partage de données graphiques à contenu géographique en ligne, le format de données propriétaire KML de Google qui permet la représentation sous format XML de modèles 3D destinés au visualisateur Google Earth. Dans les sections suivantes, nous présenterons ces spécifications en prenant soin d'identifier leurs capacités à gérer le 3D.

Web Map Service (WMS)

La spécification WMS est un standard international qui dicte le comportement d'un service Web permettant la création dynamique de cartes géographiques livrées sous format graphique telle qu'une image (WMS, 2001). Les cartes générées par le service sont créées à partir de données spatiales stockées sur un serveur. Suite à une requête d'un client contenant les détails de l'information désirée sous forme de paramètres (format de la carte, symbologie, coordonnées du secteur désiré...), la carte est générée et renvoyée vers le client pour consultation. Cette spécification a été la première à être développée dans la série de standards de services Web de l'OGC et définit trois opérations standards soit GetCapabilities, GetMap et GetFeatureInfo.

Le WMS est sans contredit une spécification limitée à la diffusion de modèles géométriques 2D. En effet, les paramètres passés au service lors des requêtes contiennent uniquement l'information requise pour la création d'une carte et seraient insuffisants pour

permettre la création d'une image d'un modèle 3D. Dans ce cas-ci, l'OGC a mis sur pied la norme WTS spécifiquement pour la diffusion d'images de modèles 3D.

Web Terrain Service (WTS)

La spécification WTS définit une interface standard pour requêter des scènes de terrains 3D générées à partir de données sur un serveur (OGC, 2003). Un WTS fonctionne d'une manière très semblable au WMS à l'exception qu'il sert des images de scènes 3D. Une scène 3D est une projection 2D d'un modèle 3D (ou 2.5D) dans une vue plane. Un WTS doit supporter les opérations *GetCapabilities* et *GetView*. La spécification WTS peut être vue comme un complément au WMS et est utile lorsqu'on veut obtenir des perspectives 3D de certains lieux ou objets.

Web Feature Service (WFS)

La spécification WFS (OGC, 2005b) est la seconde interface Web proposée par l'OGC qui permet de distribuer la donnée spatiale à partir d'un service Web. Contrairement au WMS, un WFS ne sert pas seulement une image de la donnée, mais bien la donnée elle-même en format standard. L'objectif du WFS est donc de recevoir les requêtes du client, de récupérer les données demandées sur le serveur et de retourner au client cette donnée en format XML encodée selon la norme GML. À l'inverse, un WFS peut aussi permettre de mettre à jour des données dans une base de données à partir de requêtes du client. L'interface du WFS propose minimalement les opérations suivantes *GetCapabilities*, *GetFeature* et *DescribeFeatureType*. La spécification WFS exige maintenant du GML version 3.x comme format de transfert de données. Bien qu'il n'ait jamais été présenté officiellement comme un service Web de distribution de données spatiales 3D, le WFS pourrait théoriquement servir des données 3D puisqu'il repose sur le GML 3, un format supportant la représentation de modèle 3D.

Web Coverage Service (WCS)

La spécification WCS définit une interface standard pour l'échange de données géographique sous forme de couverture i.e d'information numérique représentant les caractéristiques spatio-temporelles ou même multidimensionnelles d'un phénomène (OGC, 2006). Contrairement au WMS qui renvoie des cartes statiques sous forme d'image, un service Web WCS permet de distribuer la donnée avec sa sémantique associée comme par

exemple l'information contenue dans chaque pixel d'une image raster. Cette donnée peut être interprétée ou extrapolée contrairement à une image qui n'offre qu'un rendu graphique sans information sous-jacente. D'une manière générale, on peut décrire le WCS comme l'équivalent du WFS mais avec la capacité de distribuer des données en tessellation au lieu de données discrètes. Un service WCS supporte les opérations `GetCapabilities`, `DescribeCoverage` et `GetCoverage`. Supportant les couvertures multidimensionnelles, la spécification WCS pourrait théoriquement permettre la distribution de modèles 3D à base de voxels.

Web 3D Service (W3DS)

La spécification W3DS, toujours à l'étape de « Draft », définit une interface standard, permettant de servir des modèles 3D sous la forme de scènes 3D destinées à être consultées et manipulées de manière interactive dans un navigateur Web par le biais d'un plugin ou dans un visualisateur de globe virtuel. Un des principaux aspects du W3DS est la diffusion de ces scènes 3D accompagnées de l'information graphique permettant non pas de télécharger les données brutes comme dans le cas d'un WFS mais bien une représentation visuelle de celles-ci incluant par exemple couleurs, textures, animations et éclairage (Schilling et Kolbe, 2010). Contrairement au WMS, ces scènes ne sont pas servies sous forme d'images mais sous des formats standards tels que le X3D ou le KML, formats d'échanges centrés sur la visualisation graphique. Il est important de mentionner que le W3DS ne vient pas remplacer le WFS mais bien offrir un service complémentaire à celui-ci. En effet, ce standard prévoit que ces scènes 3D pourraient très bien être créées à partir de données brute obtenues d'un WFS, lesquelles seraient formatées et augmentées de l'information graphique nécessaire à leur visualisation et leur animation.

2.6 Inventaire des géotechnologies 3D

Maintenant que nous connaissons mieux les différentes facettes de la manipulation des données 3D et des standards s'y rapportant, il est pertinent de réaliser un inventaire plus approfondie des technologies 3D en liens avec ces aspects.

Contrairement au domaine du 2D où l'on retrouve une grande diversité de solutions ou technologies faisant intervenir des données spatiales, le domaine du 3D reste relativement

peu exploité vis-à-vis certains aspects tels la gestion, l'analyse ou la diffusion des modèles. Plusieurs projets de recherche se sont attardés et s'attardent encore à faire avancer le domaine du 3D en ce sens (Balovnev *et al.*, 1997; Breunig, 1999 et 2001; Shumilov et Breunig, 2000 ; Zlatanova, 2000; Stoter et Zlatanova, 2003; Arens *et al.*, 2003; Shi, 2003; Apel, 2004; Lachance, 2005; Bédard, 2006; Pouliot *et al.*, 2008; Ledoux et Gold, 2008; Kolbe, 2009). Afin de présenter ce bilan, nous distinguerons ces géotechnologies 3D par leur finalité et les regrouperons en différentes catégories soit les outils CAO, DAO, les SIG, les visualisateurs de globes virtuels et les SGBD spatiaux. Pour chacune de ces catégories, nous dresserons un portrait de ses aptitudes vis-à-vis du 3D en faisant un bref rappel et en venant compléter l'information déjà présentée au chapitre 1 le cas échéant. Un bref aperçu de quelques-unes des géotechnologies analysées les plus populaires est aussi présenté en annexe D. Les aptitudes 3D des différentes catégories de géotechnologie sont évaluées et présentées sous la forme d'un tableau comparatif. Cette comparaison a été effectuée sur la base de l'évaluation de trois solutions jugées représentatives de chaque catégorie de géotechnologie soit celles présentées en annexe D. Chaque catégorie de géotechnologie est analysée sur la base des critères modélisation géométrique 3D, analyse spatiale 3D, gestion des données 3D (usage de bases de données), partage des données 3D (sur le Web) et usage des standards en 3D. Ces critères d'évaluation ont été choisis puisqu'ils permettent à notre avis de faire ressortir les caractéristiques fondamentales des produits analysés. Pour ce qui est du critère de la modélisation géométrique 3D, nous ferons la distinction entre visualisation 3D, modélisation volumique et modélisation 2.5D.

Cet inventaire des géotechnologies a été réalisé en 2008 et repose sur diverses expériences personnelles (professionnelles et pédagogiques) réalisées sur plusieurs des logiciels présentés et sur différentes lectures complémentaires (documentation technique, aide en ligne, sites Web officiels, blogues, etc.). Dans le cas particulier des outils DAO, des entrevues ont aussi été réalisées avec des professionnels du milieu de l'infographie et des jeux vidéo.

Le tableau 3 présente le résumé comparatif des différentes catégories de géotechnologie. Les sections suivantes présentes un bref aperçu de chacune des catégories et de leurs

aptitudes face au 3D. Pour plus de détail sur la justification de chacun des choix du tableau comparatif, se référer à l'annexe E.

	Capacité en termes de				
	CAO (Autocad, Gocad, Micro- Station)	DAO (3dsMax, Maya, Blender)	SIG (ArcGIS, MapInfo, GeoMedia)	Visualisateur de globe virtuel (Google Earth, Virtual Earth, ArcGIS Explorer)	SGBD Spatiaux (Oracle, SQL Server, PostGIS)
Visualisation 3D	Possible	Possible	Possible	Possible	Non disponible
Modélisation de volume	Possible	Possible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Modélisation 2.5D	Possible	Possible	Possible	Possible	Non disponible
Analyse spatiale 3D	Partiellement possible	Non disponible	Non disponible	Non disponible	Non disponible
Stockage base de données 3D	Non disponible	Non disponible	Partiellement possible	Non disponible	Partiellement possible
Partage données 3D sur le Web	Non disponible	Partiellement possible	Partiellement possible	Possible	Non disponible
Usage des Standards en 3D	Non disponible	Non disponible	Possible	Partiellement possible	Partiellement possible

Tableau 3: Résumé comparatif des capacités des géotechnologies en termes de 3D.

2.6.1 Les outils CAO

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) sont des outils de modélisation qui permettent la conception, l'édition et la visualisation de modèles géométriques 3D. Ces outils ont été conçus à la base pour des besoins spécifiques en architecture, ingénierie mécanique, et construction, solutions dites AEC-Architecture/Engineering/Construction (Kunwoo, 1999 ; Lattuada *et al.*, 2004). De nos jours, les logiciels CAO sont aussi utilisés dans plusieurs secteurs tels la modélisation géologique (Bédard, 2006), archéologique (Losier *et al.*, 2007), etc.

Ces logiciels permettent l'exploitation de diverses structures de données géométriques 3D comme le B-Rep, le CSG, la décomposition en cellule, le Voxel, le balayage, etc... et font aussi appel aux courbes de Bézier ou aux NURBS. Tel que mentionné au chapitre 1, ils exploitent peu les bases de données et ne permettent habituellement pas d'effectuer d'analyse topologique (métrique seulement). Malgré de récents efforts de dialogue entre certains acteurs de l'industrie de l'AEC, celle-ci souffre encore d'un manque d'interopérabilité notamment au niveau des données et les outils CAO sont souvent pointés du doigt (Gallaher *et al.*, 2004).

2.6.2 Les DAO

Les logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) sont des outils de modélisation 3D, généralement utilisés par des infographistes, plutôt orientés vers le dessin, la construction et la visualisation de modèles 3D destinés à l'animation cinématographique, aux jeux vidéo et à la création d'environnements de réalité virtuelle. Tel que mentionné au chapitre 1, les outils DAO implique généralement l'instanciation de forme de base qui sont ensuite modelées manuellement par le modélisateur. On exploite principalement les structures CSG, les B-Rep, et surtout les formes paramétrables. Le stockage des modèles des outils DAO inventoriés se limitaient aux fichiers et l'analyse spatiale à certains opérateurs métriques comme le calcul de distance. Pour ce qui est de la diffusion, les modèles créés au sein d'un DAO sont rarement destinés à être montrés ou publiés dans leur état brut. Ils sont plutôt texturés, colorés et éclairés pour ainsi pouvoir être publiés de manière plus artistique. Ils sont aussi souvent intégrés dans un environnement plus complexe comme un jeu vidéo ou animés au sein même du DAO ou par le biais d'un produit externe pour produire une séquence vidéo. Lors de notre inventaire, nous n'avons pas trouvé d'outil DAO implémentant les standards de l'ISO et de l'OGC.

2.6.3 Les SIG

Tel que mentionné, au chapitre 1, les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils bien adaptés pour l'acquisition, la structuration et la manipulation de données géométriques. Ils permettent l'analyse spatiale autant métrique que topologique et permettent l'usage des bases de données pour le stockage des modèles. Ils gèrent aussi les systèmes de référence cartographique. La plupart des principaux fournisseurs de SIG

offrent un module de diffusion venant compléter leur produit phare en permettant de publier et de consulter dynamiquement les cartes construites à l'aide de leur SIG sur le Web. Toutefois, notre inventaire nous a permis de constater que les SIG sont des systèmes qui sont spécialisés dans la gestion de données spatiales 2D. Ils peuvent lire certains formats 3D mais se limitent à la création de MNT et à l'extrusion de primitives géométriques 2D à l'aide d'une hauteur. Au niveau de la standardisation, la plupart des SIG implémentent les standards et spécifications de l'ISO et de l'OGC (SFS, GML, WMS, WFS, ...) soit directement dans leur produit de base ou par le biais d'extensions dites « d'interopérabilité ».

2.6.4 Les visualisateurs de globes virtuels

D'autres solutions de visualisation cartographique possédant certaines capacités pour la diffusion Web de données 3D, les visualisateurs de globe virtuel, ont aussi fait leur apparition plus récemment. Nous parlons ici des applications Google Earth, Virtual Earth, Nasa World Wind et ArcGIS Explorer. La grande popularité de ces applications et leur distinction des SIG fait en sorte que nous pensons qu'il vaille la peine d'en faire une catégorie à part entière et de les présenter un peu plus en détail.

Bien que l'on diffuse déjà de l'information spatiale sur le Web depuis plusieurs années, ces nouvelles applications innovent par leur mode de navigation saisissant, leur vitesse, leur gratuité et par l'énorme quantité d'information qu'ils servent en ligne et ce, dans un univers 3D. En effet, ces produits offrent la possibilité de naviguer sur une terre virtuelle en 3D et y visualiser différentes couches vectorielles (réseaux routiers, commerces, lieux touristiques, etc.), une couverture d'imageries satellitaires drapée sur le relief (TIN) ainsi que des bâtiments en 3D (extrusion par balayage). Côté analyse spatiale, ces applications se limitent en général à des calculs de distance et de corridors (analyse métrique). Le mode de stockage des modèles offert aux usagers se limite aussi aux fichiers et ces solutions ne supportent généralement pas le standard GML. Il est possible de superposer sur le globe des images provenant d'un service WMS.

2.6.5 Les SGBD spatiaux

Pour ce qui est de la gestion des modèles géométriques, nous avons vu plus tôt dans ce chapitre que les systèmes de gestion de bases de données (SGBD) sont des outils qui offrent généralement la possibilité de stocker et de requêter des objets géométriques sous forme de points, de lignes, de polygones et exceptionnellement de solides (Oracle Spatial depuis sa version 11g) ou sous forme matricielle au sein de bases de données. Bien qu'ils permettent le stockage des coordonnées en 3D (x,y,z), les SGBD spatiaux implémentent le standard SFS qui est à la base un schéma spatial vectoriel destiné à la modélisation 2D. Les opérateurs spatiaux qu'ils fournissent vont aussi en ce sens et ne tiennent pas compte de la troisième dimension lors des calculs.

2.6.6 Recensement des projets de recherche sur le SIG 3D

Maintenant que nous avons vu plus en détail les principales géotechnologies 3D et leurs particularités liées à la 3D, il est pertinent de recenser les principaux projets de recherche qui touchent à cette même thématique. En 1999, Breunig présente GeoStore/Geotoolkit (Balovnev *et al.*, 1997; Breunig, 1999 et 2001), une application développée pour permettre un accès distant, la visualisation 2D/3D et certains traitements appliqués à des modèles géologiques 3D stockés dans une base de données spatiale 3D, à partir de différents outils client. Pour le stockage des modèles 3D, Geotoolkit repose sur le SGBD orienté-objets ObjectStore dans lequel sont implémentées les primitives spatiales suivant une structure de *simplicial complexes* i.e. les surfaces sont construites à l'aide de *mesh* de triangles et les solides sont construits par un assemblage de tétraèdres. Bien qu'extensible et ouvert, le GeoToolkit se limite à l'utilisation d'un seul SGBD. Dans Shumilov et Breunig (2000), on décrit comment Gocad fut connecté à GeoToolKit et ObjectStore dans un effort visant l'intégration de données géologiques et géophysiques 3D dans une base de données commune à l'aide d'un adaptateur Corba. Ce projet représente un bel effort de couplage entre un outil CAO et une base de données. Mentionnons que l'équipe de Breunig travaille depuis 2007 sur le projet DB4GeO, une version plus moderne du GeoStore/Geotoolkit prenant maintenant en charge le 4D et qui utilise db4o au lieu de ObjectStore pour le stockage des modèles. Cette application permet l'interrogation des modèles à travers le Web et l'exportation des données vers les formats Gocad, GML et VRML (Breunig *et al.*, 2009).

En 2003, Stoter et Zlatanova expliquent comment il est possible de stocker des solides dans un SGBD spatial en les stockant comme des multi-polygones (ensembles de polygones disjoints ou se touchant uniquement en un nombre fini de points et ne s'intersectant pas qui sont traités comme une seule entité) ou comme un ensemble de polygones. Bien que cette façon de faire permette effectivement de profiter de plusieurs avantages qu'offrent les SGBD, elle comporte plusieurs problèmes comme on le mentionne dans Arens *et al.*, 2003 :

- Le SGBD spatial ne reconnaît pas les objets spatiaux 3D parce qu'il n'a pas de primitive 3D pour les modéliser. Cela résulte en un mauvais fonctionnement de certaines fonctions spatiales du SGBD
- Il n'y a pas de validation pour les objets 3D en temps qu'élément à part entière (seulement en temps qu'ensemble de polygones)
- Les mêmes coordonnées sont stockées plusieurs fois causant un risque d'inconsistance des données
- Les opérateurs spatiaux du SGBD ne fonctionnent que lorsque les objets sont projetés en 2D parce que la 3^e dimension est ignorée
- Il n'y pas d'information permettant de distinguer l'intérieur et l'extérieur des objets
- Lorsque les objets 3D sont représentés et stockés comme un ensemble de polygones, il y a une relation 1:n (un à plusieurs) entre l'objet et le nombre d'enregistrements de la table. Pour gérer de façon plus claire et efficiente un large jeu de données, une relation 1:1 est nécessaire entre les objets de la base de données et la réalité

Afin de régler une partie de ces problèmes, Arens *et al.*, 2003 proposent d'implémenter une primitive spatiale volumique dans Oracle spatial 9i. Ils expliquent comment stocker, valider, indexer et requêter un objet spatial 3D dans ce SGBD et ce, par l'implantation d'une primitive spatiale 3D suivant la structure géométrique du B-Rep. Ces travaux présentent sans doute la première démonstration d'un SGBD pouvant supporter directement une primitive 3D. Toutefois, les problèmes au niveau des opérateurs spatiaux persistent toujours puisque ceux-ci ne reconnaissent pas la nouvelle primitive et la 3^e dimension des coordonnées est donc toujours ignorée.

En 2004, Apel présente un projet de développement d'un SIG 3D orienté vers le Web et suivant une architecture distribuée (client-serveur-SGBD). Le système qu'il propose consiste en le couplage d'un outil de modélisation 3D (Gocad), d'une base de données XML et d'un serveur d'applications servant d'intermédiaire entre la base de données et les clients. L'objectif de ce projet est de favoriser l'interopérabilité des données par le partage et le stockage des données en XML ce qui lui permet d'être indépendant des langages et des systèmes d'exploitation. Apel propose de stocker directement les données en XML dans un SGBD spécialisé dans le stockage XML natif (TAMINO) et de retirer de la base de données, les tâches reliées à l'analyse spatiale. Pour ce faire, il propose un nouveau serveur d'application spécialement conçue pour les calculs d'analyse spatiale 3D. Bien que très intéressant au niveau de son architecture, le requêtage et le stockage des données présentent certaines lacunes puisqu'aucune structure de données ni spécification de service Web standard n'ont été utilisées. Le projet est aussi resté au niveau du prototype, la gestion des solides et des opérateurs spatiaux 3D n'étant implémentée que partiellement.

En 2006, un autre groupe de chercheurs du secteur des sciences de la Terre au Ministère des Ressources Naturelles du Canada et de Mira Geoscience ont aussi travaillé à étendre les capacités de Gocad (Sprague *et al.*, 2006). Un système de requêtage appliqué à l'exploration minière est proposé supportant par exemple des requêtes de proximité, d'intersection et aussi des requêtes portant sur les propriétés descriptives. Bien qu'intéressant pour les acteurs du domaine minier, ce plug-in Gocad ne permet que le requêtage de propriétés descriptives de type numérique et cette information reste gérée au niveau de fichiers n'utilisant pas de SGBD pour le stockage. Son utilisation est aussi restreinte aux modèles de données de Gocad.

En 2006, dans un effort de requêtage topologique d'objets 3D issus d'une modélisation par un outil CAO, Lachance *et al.* présentaient le prototype TQuery (Lachance, 2005; Pouliot *et al.*, 2008). TQuery pour 3D Topological Query, permet l'exportation d'objets Gocad vers une structure de stockage 3D topologique implémentée dans un SGBD (SQL Server) qui régularise certaines relations de voisinage de type touche et intersecte, entre les objets volumiques (représentés par un assemblage de tétraèdres). Bien qu'intéressant, ce prototype présente certaines lacunes. Par exemple, plusieurs manipulations de nettoyage du modèle

3D sont nécessaires avant de pouvoir être capable de requêter celui-ci et il n'existe pas de lien réel entre Gocad et la base de données puisque l'import/export se fait manuellement. L'interface limite aussi l'analyse topologique à seulement deux objets à la fois.

Plus récemment, Kolbe et son équipe travaillent au développement de modèles 3D urbains interopérables avec le City Geography Markup Language (CityGML) (Gröger *et al.*, 2008; Kolbe, 2009; Stadler *et al.*, 2007; Stadler *et al.*, 2009). CityGML est un standard de l'OGC basé sur GML 3 qui définit les classes et les relations pour les objets spatiaux que l'on retrouve en milieu urbain en prenant en charge leurs propriétés géométriques, topologiques, sémantiques et graphiques.

À noter aussi les efforts de Lapierre *et al.*, 2007 et Hagedorn et Dollner, 2007 qui ont démontrés la faisabilité d'intégrer des données provenant de CAD, SIG et BIM (Building Information Model) dans une approche de services Web standard. Ou encore, ceux de Chang et Li, 2008 qui présente l'architecture d'une application SIG 3D collaborative synchrone destinée à la visualisation et au partage de modèles 3D dans un contexte de prise de décision. Sans aller dans les détails, d'autres projets se sont aussi penchés sur le thème du SIG 3D et ont produit des prototypes comme celui de Zlatanova en 2000 ou le SpaceInfo de Shi, 2003.

2.7 Conclusion du chapitre

Nous avons vu que les SIG actuels couplés aux SGBD spatiaux ont atteint un niveau de maturité important au niveau de la modélisation, de la gestion, de l'analyse et du partage des données géométriques 2D et 2.5D. Toutefois, les SIG sont des systèmes qui permettent la visualisation de modèles 3D mais qui reste très limités quant à leur construction ou édition. Les SGBD spatiaux, pour leur part, ne sont pas conçus pour gérer des objets volumiques (à l'exception de Oracle 11g tout récemment). De leur côté, les outils CAO se sont distingués comme de robustes outils de modélisation 3D permettant la gestion explicite des objets volumiques. Toutefois, aucun de ces systèmes n'est encore apte à réaliser au niveau 3D, et ce, de manière intégrée, la construction, la gestion, l'analyse et la diffusion des modèles géométriques. D'ailleurs, il n'existe pas encore de bibliothèque offrant les algorithmes permettant d'implémenter les opérateurs spatiaux capables de

calculer la proximité, l'intersection, l'inclusion, l'égalité ou l'adjacence d'objets géométriques 3D provenant de modèles basés sur des surfaces ou des solides. Plusieurs projets de recherche ont amené de bonnes idées et ont proposé des solutions pour contourner les limites de ces systèmes (Balovnev *et al.*, 1997; Breunig, 1999 et 2001; Shumilov et Breunig, 2000; Zlatanova, 2000; Stoter et Zlatanova, 2003; Arens *et al.*, 2003; Shi, 2003; Apel, 2004; Sprague *et al.*, 2006). Cependant, et comme nous l'avons mis en évidence, aucune de ces solutions n'a été jugée adéquate pour répondre complètement et correctement à ces tâches. Entre autres, les solutions de type SIG 3D :

- ne reposent pas sur des standards au niveau de la structure géométrique pour la gestion des objets 3D.
- n'utilisent pas de spécifications de service Web standards pour l'interrogation de données sur le Web.
- n'utilisent pas de standard de représentation de données pour le partage de l'information géométrique sur le Web.

Nous estimons pourtant que la communauté géomatique a besoin de ce genre de solution 3D et c'est dans cette perspective que nous allons faire une proposition au chapitre suivant.