

BERNARD LACHANCE

**DÉVELOPPEMENT D'UNE STRUCTURE
TOPOLOGIQUE DE DONNÉES 3D POUR
L'ANALYSE DE MODÈLES GÉOLOGIQUES**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences géomatiques
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2005

©Bernard Lachance, 2005

Résumé

La géologie a exprimé, face à la géomatique, le besoin de modéliser les objets géologiques en 3D et d'analyser ces modèles pour prendre des décisions plus éclairées. La géomatique répond relativement bien à certains de ces besoins comme celui de construire des modèles géologiques tridimensionnels. Cependant, les systèmes géomatiques (tels que les systèmes d'information géographique) ne sont pas adaptés à la gestion explicite des relations topologiques s'exprimant dans un univers 3D. Ce projet de maîtrise vise à développer une structure de stockage qui régularise les relations spatiales entre des objets tridimensionnels, permettant d'élargir les possibilités d'analyse d'un modèle géologique 3D. Pour réaliser ce projet, quatre étapes ont été nécessaires : 1) inventaire des structures topologiques 2D et 3D, 2) création d'une structure de données géométriques 3D, 3) création d'un prototype et, finalement, 4) réalisation de tests avec le prototype. Avec ces développements, une requête montrant la relation spatiale *contient* entre des unités géologiques et des fractures a été réalisée en 3D. Les résultats obtenus montrent le grand potentiel de cette approche pour l'analyse de modèle géologique. De plus, la création d'une nouvelle structure topologique de données appliquée aux données géologiques est certes un avancement pour l'application de la géomatique au domaine des sciences de la terre.

Avant-Propos

Je profite de cette section pour remercier toutes les personnes qui m'ont aidé pendant la réalisation de ce travail. Premièrement, je tiens à souligner l'apport incommensurable de ma directrice, Jacynthe Pouliot. En plus de m'avoir manifesté une très grande confiance, elle m'a offert un soutien total et entier tout au long de la réalisation de cette maîtrise. J'ai également profiter des conseils et des connaissances géologiques de ma co-directrice Donna Kirkwood. De plus, ces deux personnes m'ont épaulé financièrement grâce aux fonds de recherche du réseau GEOIDE (projet RES#LON)

J'ai également eu la chance de pouvoir compter sur des personnes de mon entourage qui m'ont encouragé et supporté depuis le début. En plus du soutien financier, mes parents m'ont toujours poussé à aller un peu plus loin. Je vous remercie infiniment! Ma copine, Véronique, a été présente pour m'encourager et me conseiller durant toutes les étapes de la réalisation de ce travail. J'ai toujours pensé que tu as été l'élément déclencheur qui m'a permis de réaliser ces défis. Je t'adore!

À toutes ces personnes, je tiens à vous remercier sincèrement.

Table des matières

Table des matières	iii
Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Introduction.....	8
Mise en contexte	8
Problématique	10
Hypothèse	11
Objectifs de la recherche.....	12
Cadre expérimental	12
Méthodologie	13
Chapitre 1. Revue des concepts.....	15
1.1. Les données tridimensionnelles	15
1.2. Représentation de la 3 ^e dimension	20
1.2.1. Modèles par balayage	22
1.2.2. Modèles volumiques	22
1.2.3. Modèles par frontières	25
1.2.4. Systèmes informatiques	26
1.3. L'analyse spatiale	29
1.4. Structure de données géométriques	31
1.4.1. Modèles non topologiques	31
1.4.2. Modèles topologiques	36
1.5. Modèles formalisant les relations topologiques.....	47
1.5.1. Modèle des quatre intersections (4I).....	50
1.5.2. Modèle des neuf intersections (9I).....	51
1.5.3. Dimension Extend Method (DEM).....	52
1.6. Conclusion du chapitre	54
Chapitre 2. Analyse de la performance des systèmes informatiques pour la modélisation géologique	55
2.1. Sélection des logiciels à comparer et descriptions des données tests	55
2.2. Évaluation de la performance	58
2.2.1. Évaluation de la performance des logiciels pour l'acquisition des données.....	58
2.2.2. Évaluation de la performance des logiciels pour la construction et la visualisation d'objets 3D	59
2.2.3. Évaluation de la performance des logiciels pour l'analyse spatiale	67
2.3. Discussion et conclusion du chapitre.....	73
Chapitre 3. Élaboration de la structure GeoTEN	76
3.1. Identification des exigences de développement.....	76
3.2. Définition de la structure topologique GeoTEN.....	81

3.3.	Évaluation de la structure proposée	84
3.3.1.	Comparaison avec la structure TEN	84
3.3.2.	Comparaison avec le logiciel Gocad	86
3.4.	Conclusion du chapitre	88
Chapitre 4.	Implantation de la structure topologique	89
4.1.	Introduction.....	89
4.2.	Développement du prototype.....	90
4.2.1.	Algorithme de la Fonction 1 : Transformation des données.....	91
4.2.2.	Algorithme de la Fonction 2 : Analyse des données	98
4.3.	Discussion et conclusion du chapitre.....	104
Conclusion	106
	Discussion sur la recherche.....	109
	Travaux futurs.....	110

Liste des tableaux

Tableau 1-1 - Dix des douze conventions régissant le modèle 3D FDS	41
Tableau 1-2 - Définitions des règles générales du modèle Simplified Spatial Model (SSM)	45
Tableau 1-3 - Définitions des règles de construction du modèle TEtrahedral Network (TEN)	47
Tableau 1-4 - Nombre de cas possibles et cas réels pour le modèle des quatre intersections dans un environnement 2D.	51
Tableau 1-5 - Tableau des cas possibles et des cas réels pour le modèle des neuf intersections	52
Tableau 1-6 - Tableau des cas possibles et des cas réels pour le modèle DEM	53
Tableau 2-1 - Résultats de la performance globale pour la modélisation géologique de trois types de logiciels (CAO, SIG et modélisation géologique)	74
Tableau 3-1 - Comparaison entre les structures de données topologiques 3D présentées pour la rapidité d'analyse.....	77
Tableau 3-2 - Comparaison des structures pour l'aptitude à construire des objets géologiques	81
Tableau 3-3 - Règles de construction de la structure proposée qui sont inspirées de la structure TEN.....	82
Tableau 4-1 - Résultats de la modification des primitives.	95

Liste des figures

Figure 0-1 - Comparaison entre les formes irrégulières des objets en milieu géologique et les formes régulières des objets en milieu urbain.	9
Figure 0-2 – Méthodologie proposée pour la réalisation du projet.	13
Figure 1-1 – Figure représentant la conception du 3D par ESRI. Les cases jaunes représentent les cas considérés comme étant du 3D. Adaptée de Brisebois (2003).	19
Figure 1-2 - -Figure représentant la conception du 3D par Bentley. Les cases jaunes représentent les cas où il y a présence de 3D. Adaptée de Brisebois (2003).	19
Figure 1-3 - Figure représentant la conception du 3D par Bédard <i>et al.</i> La case jaune représente l'unique cas où il y a présence de 3D. Adaptée de Brisebois (2003).	20
Figure 1-4 - Classification des modèles de représentation graphique de la troisième dimension, inspiré de de la Losa (2000).	21
Figure 1-5 - Exemple de la modélisation d'un cube à l'aide de voxels.	23
Figure 1-6 - Exemple graphique du modèle octree.	24
Figure 1-7 - Exemple d'une opération de soustraction d'objets avec le CSG d'AutoCAD 2004.	25
Figure 1-8 - Schéma des types d'analyse présents dans un SIG.	29
Figure 1-9 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle spaghetti.	32
Figure 1-10 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle par dictionnaire de points.	33
Figure 1-11 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle par dictionnaire de chaînes/points.	34
Figure 1-12 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle de Gocad.	35
Figure 1-13 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du DIME.	37
Figure 1-14 - Illustration de la différence entre les points du DIME (image de gauche) et le vrai concept de nœuds (image de droite).	38
Figure 1-15 - Éléments constitutifs de la structure de données géométrique du POLYVRT.	39
Figure 1-16 - Modèle conceptuel du 3D FDS (Formal Data Structure).	40
Figure 1-17 - Représentation graphique de cas d'intersection de primitives qui sont décrits par les conventions 7, 9 et 11 du 3D FDS.	43
Figure 1-18 - Modèle conceptuel du Simplified Spatial Model (SSM).	44
Figure 1-19 - Modèle conceptuel du modèle TEtrahedral Network (TEN).	46
Figure 1-20 - Exemples de relations topologiques entre différents objets.	48
Figure 1-21 - Les <i>cas réels</i> varient en fonction de la dimension des objets. L'image A montre la superposition de deux surfaces dans un univers 2D. L'image B montre que peu importe l'endroit où est situé le point (objet 0D), il est impossible de créer une superposition entre une surface et un point.	49
Figure 1-22 – Les <i>cas réels</i> varient en fonction de la dimension de l'univers. L'image A montre deux surfaces dans un univers 2D. L'intersection entre ces deux objets implique également une superposition. L'image B met également en scène deux surfaces mais, dans un univers 3D. Dans ce cas, l'intersection n'est pas accompagnée d'une superposition.	49
Figure 1-23 - Exemple d'objets ayant une frontière connectée ou déconnectée.	50
Figure 1-24 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle des quatre intersections et représentation de la relation en 2D.	51
Figure 1-25 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle des neuf intersections (9I) et représentation de la relation.	52
Figure 1-26 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle DEM et représentation de la relation.	53

Figure 2-1 - Données fournies pour la création du modèle géologique de la Formation de Turner Valley .	57
Figure 2-2 - Résultat de l'extrusion d'une surface avec le module ArcScene de ArcGIS	61
Figure 2-3 - Résultat de la modélisation d'une partie de la Formation de Turner Valley avec le module ArcScene de ArcGIS où la fracture (en rouge) est située à l'intérieur de la surface extrudée (en beige)	62
Figure 2-4 - Exemples d'extrusion de surfaces avec des angles différents : a) 0°, b) 30° et c) -10°. AutoCAD 2004.....	63
Figure 2-5 - Exemple de simulation d'objets 3D construits à partir d'un assemblage de quatre surfaces (Les surfaces bleue, verte et rouge sont visibles tandis que la surface jaune n'est pas visible de cet angle) AutoCAD 2004	64
Figure 2-6 - Résultat de la modélisation de la Formation de Turner Valley avec AutoCAD 2004.....	65
Figure 2-7 - Représentation volumique dans Gocad V. 2.0.8. : voxels (image A) et modèle par frontières (image B).....	66
Figure 2-8 - Résultat de la modélisation d'une partie de la Formation de Turner Valley avec Gocad 2.0.8	67
Figure 2-9 - Exemple d'analyse topologique avec l'opérateur <i>contient</i> de ArcGIS 8.1	69
Figure 2-10 - Boîte de dialogue de la fonction de calcul d'aire et de volume ArcGIS V 8.1	70
Figure 2-11 - Résultat du calcul de volume de la section de la Formation de Turner Valley et menu des opérations possibles sur solide Gocad 2.0.8.....	72
Figure 3-1 - Modèle d'implantation de la structure topologique GeoTEN	82
Figure 3-2 - Comparaison des tables des triangles et des tétraèdres du TEN et de la nouvelle structure	85
Figure 3-3 - Comparaison de la définition des tétraèdres du TEN et de la nouvelle structure.....	86
Figure 3-4 - Comparaison entre les primitives de Gocad et du GeoTEN	87
Figure 4-1 - Stratégie d'implantation pour le développement du prototype d'analyse topologique 3D.....	89
Figure 4-2 - Emplacement et utilité des fonctions du prototype.	91
Figure 4-3 - Liste des fonctions à réaliser afin de transformer des données non topologiques en données topologiques.	92
Figure 4-4 - Erreurs de connectivité pour des segments dans un univers en 2D.	93
Figure 4-5 - Problème de dépassement entre deux surfaces dans un environnement 3D.	93
Figure 4-6 - Cas possible où l'absence de primitives doit être corrigée. Exemple du cas de l'intersection entre deux arêtes.	94
Figure 4-7 - Exemple d'un cas d'intersection entre des primitives qui possède une multitude de possibilités de configuration.....	96
Figure 4-8 - Erreurs de duplication de nœuds qui composent des segments en 2D.....	97
Figure 4-9 – Modèle d'implantation de données de la structure proposée implanté dans SQL Server.....	98
Figure 4-10 - Interface d'interrogation des données géométriques du SGBD telles que structurées pour respecter l'analyse topologique 3D.....	99
Figure 4-11 - Étapes suivies pour identifier la relation <i>contient</i> entre un solide et une surface à partir de la structure de données proposée.	100
Figure 4-12 - Identification des nœuds communs à un solide et à une surface.....	101
Figure 4-13 - Relations topologiques possibles dans les cas où les nœuds de la surface sont tous des composantes du solide.	103

Introduction

Mise en contexte

Le grand dictionnaire Web définit la géologie comme suit : « *Science comprenant l'étude des parties de la Terre directement accessibles à l'observation, et l'élaboration des hypothèses qui permettent de reconstituer leur histoire et d'expliquer leur agencement* ». Cette définition signifie que la géologie est la science qui fait de la Terre son objet d'étude et qui cherche à mieux comprendre l'origine de la Planète et sa dynamique, par le biais d'une connaissance adéquate des grands phénomènes et processus qui la régissent. Les études géologiques commencent généralement sur le terrain puisqu'elles sont basées sur l'observation directe des phénomènes. Ce travail permet d'élaborer des cartes qui sont indispensables aux géologues de toutes spécialités puisqu'elles permettent d'y représenter et de positionner les divers éléments géologiques qui affleurent en surface. Les géologues ont tenté de représenter le plus fidèlement possible les structures géologiques qui les entourent et, traditionnellement, ils utilisent la carte géologique comme outil de base (De Kemp et Sprague, 2001). Cette carte, qui est une représentation planimétrique du territoire, montre généralement les types de roches, les données lithologiques¹, les données structurales² et les données stratigraphiques³ (Kirkwood, 2002). Les méthodes traditionnelles d'interprétation et de visualisation avec des cartes géologiques sont beaucoup plus ardues que lorsque ces tâches sont automatisées à l'aide d'un système informatique (De Kemp, 2000). Pour ce faire, la construction d'un modèle géologique est nécessaire. La modélisation géologique est définie comme étant l'ensemble des méthodes mathématiques qui permettent de modéliser de façon unifiée la géométrie et les propriétés physiques des objets géologiques (Mallet, 2002). Pour plusieurs raisons, la construction de ce genre de modèle représente un grand défi. Par exemple, les formes géométriques des objets géologiques sont beaucoup plus irrégulières que le sont les objets construits par l'homme.

¹ Données portant sur l'ensemble des caractères macroscopiques des roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques (composition minéralogique, texture, couleur, etc.).

² Aspect géométrique des objets géologiques (ex : orientation de la stratification, type de faille, etc.).

³ Données portant sur la succession des dépôts sédimentaires généralement organisés en couches (ou strates).

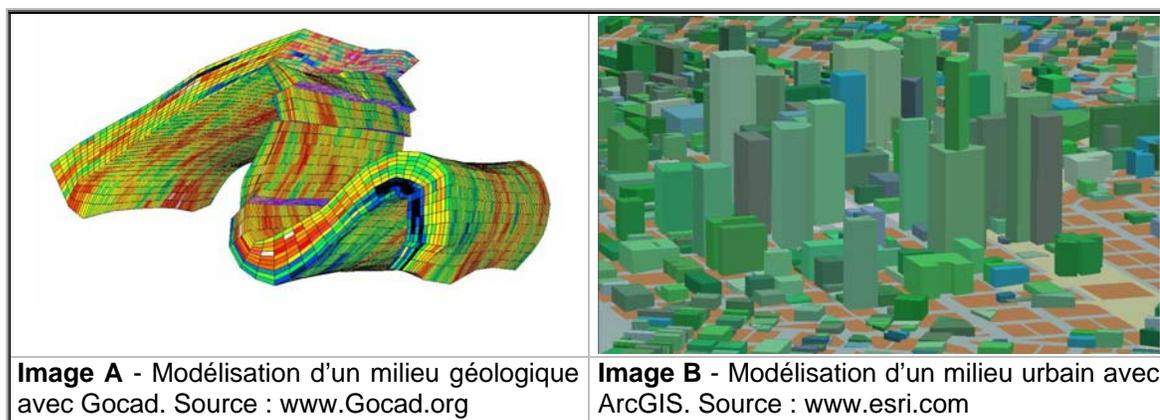


Figure 0-1 - Comparaison entre les formes irrégulières des objets en milieu géologique et les formes régulières des objets en milieu urbain.

La figure précédente montre que dans un environnement urbain, les objets à représenter ont des formes géométriques relativement simples et entièrement accessibles tandis les objets géologiques sont des objets naturels géométriquement complexes.

Un environnement de représentation 2D (ex. : une carte), qui montre la réalité selon deux dimensions, n'est pas en mesure de représenter fidèlement les objets géologiques (Apel, 2001). La visualisation de ces éléments dans un objectif de connaissance et de compréhension des phénomènes à l'intérieur d'un environnement montrant la troisième dimension⁴ (3D) devient alors pertinente, voire essentielle. La visualisation est une technique qui tente de représenter la réalité à partir d'un modèle dérivé des données provenant d'une multitude de sources. Une visualisation efficace permettra d'améliorer ou d'augmenter la compréhension de la réalité (Brown et Herber, 1996). Cependant, la visualisation 3D nécessite l'utilisation de systèmes informatiques performants et capables de générer et de gérer des surfaces naturelles complexes. Ce contexte particulier de la géologie a nécessité le développement de certains logiciels spécialisés⁵ qui permettent de représenter la troisième dimension.

Pour mettre sur pied des modèles géologiques 3D, les géologues se tournent de plus en plus vers l'exploitation des systèmes géomatiques. En effet, la géomatique est : « une discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques, et qui fait appel aux sciences et aux

⁴ Les trois dimensions font référence à la longueur, la largeur et la hauteur des objets.

⁵ Les différents types de logiciels utilisés dans les sciences de la Terre pour faire de la visualisation feront l'objet d'une description au chapitre 2.

technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion (OQLF, 2004). Ainsi, la géomatique est spécialisée dans la représentation d'objets du territoire, que ce soit dans un univers en deux dimensions (exemple : carte) ou dans un univers en trois dimensions (exemple : modèle numérique de terrain). Les objets du territoire sont représentés numériquement par des données géométriques. Le domaine de la géomatique serait en mesure de rendre de précieux services dans un contexte de modélisation géologique puisqu'elle se spécialise dans la gestion des données spatiales. De façon plus concrète, cette compétence se traduit par le biais de l'exploitation de différents types de logiciels comme les CAO (logiciel de Conception Assistée par Ordinateur), les SIG (Systèmes d'Information Géographique) et les logiciels de visualisation scientifique. Fondamentalement, les plus grandes différences entre ces systèmes concernent la structure de stockage de données géométriques qu'utilise le système. Ces thèmes seront abondamment discutés au chapitre 1 et 2.

Problématique

La mise en contexte a fait la lumière sur un élément important : la modélisation d'objets géologiques en 3D permet d'avoir une meilleure compréhension de l'environnement. Par contre, la construction de modèle géologique 3D se bute à certains problèmes. Quatre difficultés principales sont rencontrées lors de la construction et l'analyse de modèles géologiques 3D. Mallet (2002) exprime bien ces difficultés découlant de la complexité des données géologiques:

- Elles sont hétérogènes et sont souvent regroupées en secteur, ce qui cause des problèmes de généralisation.
- Elles sont plus ou moins précises, tout dépendant de leur provenance. Par exemple, les données de puits de forage sont plus précises que les données sismiques.
- Elles sont de sources différentes (lithologie ou type de roche, couleur, granulométrie, analyses chimiques, teneur, résistivité électrique, porosité, degré de fracturation, magnétisme, etc.)

- Elles résultent d'observations directes (données géoscientifiques recueillies par le géologue sur l'affleurement rocheux ou sur une carotte de forage) ou indirectes (données sismiques, données magnétiques, résistivité, etc.)

Généralement, il est facile de représenter la deuxième et la troisième dimensions lorsqu'il s'agit de représenter des objets possédant une enveloppe ou une frontière mesurée selon les trois dimensions géométriques (x , y , z ou h). Le contexte géologique étant fort différent, il est presque impossible de mesurer l'objet précisément. La complexité des objets à modéliser est la première cause de la difficulté d'effectuer de la modélisation géologique. La géométrie irrégulière des objets géologiques est la deuxième difficulté réduisant l'efficacité de la modélisation. Ces objets ne sont pas aussi prévisibles que peuvent l'être les bâtiments du milieu urbain. Il est alors plus difficile de prévoir les détails géométriques de l'objet géologique à modéliser. Finalement, les possibilités d'analyse des modèles géologiques sont réduites parce que les systèmes géomatiques ne sont pas en mesure de gérer la topologie dans un environnement 3D (De La Losa, 2000; Zlatanova, 2000). Lorsque le géologue crée son modèle, il doit être en mesure de l'analyser correctement. Un modèle qui possède un grand nombre d'objets géologiques différents devient rapidement très complexe et lourd à gérer. Par exemple, pour un modèle possédant quatre objets, il est facile de déterminer les relations spatiales entre les objets simplement à l'aide d'une analyse visuelle. Par contre, si le modèle possède cent objets différents, la tâche sera beaucoup plus difficile et laborieuse à accomplir et nécessitera une plus longue période de temps.

Alors, comment aider le géologue à mieux analyser un modèle géologique 3D? Une partie de la réponse se trouve, probablement, dans le développement d'une structure topologique permettant de traduire les relations spatiales entre des objets décrits et définis dans un espace tridimensionnel.

Hypothèse

Le développement d'une structure de stockage qui permet d'explicitier les relations spatiales topologiques entre les différents objets géologiques rendrait l'analyse d'un modèle géologique plus efficace.

Objectifs de la recherche

L'objectif principal de cette recherche est d'adapter une structure topologique de données 3D au contexte de la modélisation géologique 3D. Pour atteindre le but visé, trois objectifs spécifiques devront être réalisés :

- Mettre en évidence les forces et les limites des systèmes SIG et CAO pour la construction et l'analyse de modèle 3D.
- Examiner l'apport des outils d'analyse spatiale topologique pour la modélisation géologique.
- Formaliser l'utilisation d'un ou de plusieurs opérateurs topologiques 3D pour la modélisation géologique.

Cadre expérimental

Cette recherche a été basée sur deux projets. Le cadre expérimental choisi comme base de la présente étude est celui du projet Moose Mountain intitulé : Three dimensional digital integration of geological, photogrammetric, remote sensing and geophysical data, application to resource assessment in foreland thrust and fold belts. Ce projet a été financé par le réseau de centre d'excellence GEOIDE et visait à développer et à évaluer de nouvelles méthodes d'intégration des données provenant de la télédétection et de la photogrammétrie pour améliorer la création des cartes géologiques (Lebel *et al.*, 2000). Dans le but de produire de meilleurs modèles d'exploration et de prévoir la présence de réservoir de gaz naturel du secteur Moose Mountain, situé à 40 km à l'ouest de Calgary en Alberta, les outils de visualisation et de modélisation ont été évalués. À partir de ces outils et des données géologiques, il a été possible de dériver une nouvelle connaissance géologique qui a pu être utilisée afin de mieux modéliser la réalité (Lebel *et al.*, 2001). Les données utilisées pour ce travail de recherche ont été recueillies pour le projet Moose Mountain (photographies aériennes, cartes géologiques numériques, etc.). Par contre, cette recherche s'inscrit dans le cadre de la suite de ce projet qui, lui aussi, a été financé par le réseau GEOIDE. Le projet RES#LON (Long *et al.*, 2001) a comme thématique principale l'application de la géomatique adaptée pour l'exploration des ressources et des risques naturels. Différents intervenants sont impliqués dans ce projet de recherche soient l'INRS-ETE, la Commission géologique du Canada, le département de géologie et de génie

géologique de l'Université Laval ainsi que le département des sciences géomatiques de l'Université Laval.

Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs décrits ci-dessus, la méthodologie s'organise autour de trois différentes étapes qui sont : la recherche théorique, le développement et l'évaluation du système (figure 0-2).

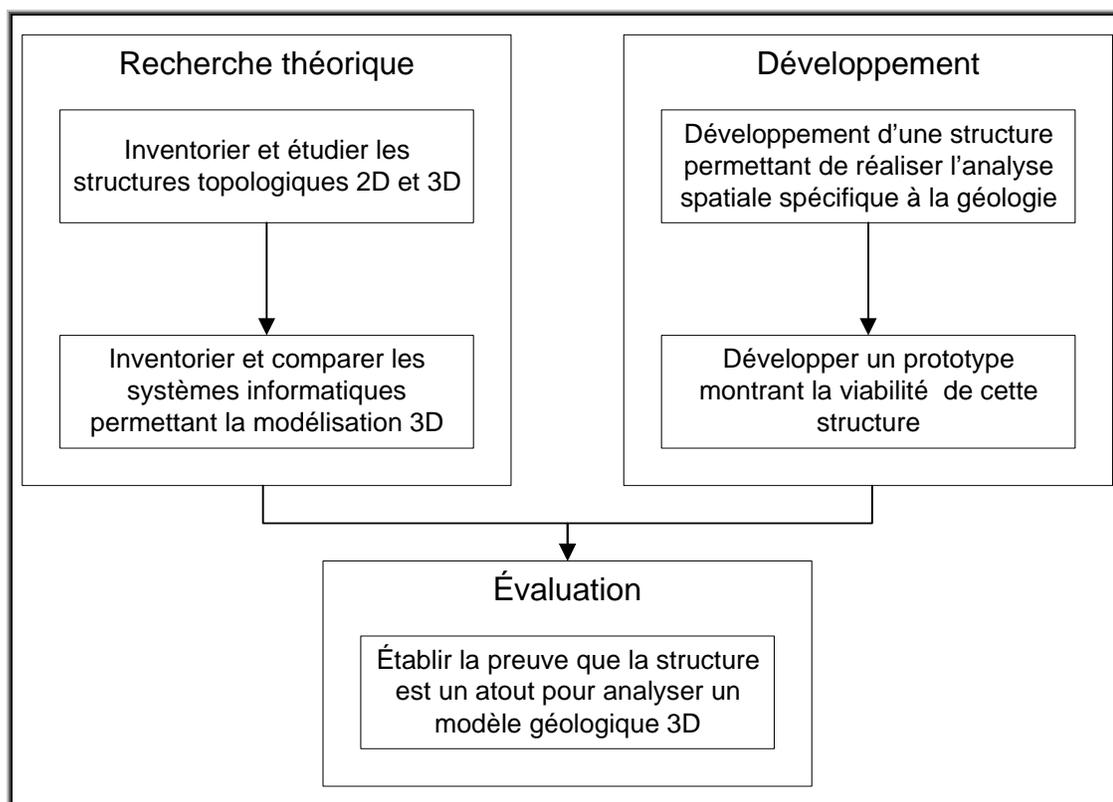


Figure 0-2 – Méthodologie proposée pour la réalisation du projet.

La recherche théorique a été effectuée pendant tout le déroulement du projet et avait l'objectif d'approfondir la notion de topologie et de décrire les systèmes permettant la modélisation géologique 3D. La recherche était basée sur les mots clés suivants : visualisation 3D, structure de données géométriques, topologie, modélisation géométrique, système de modélisation informatique et géologie structurale. La recherche a débuté par l'inventaire des structures de données géométriques topologiques 2D et 3D existantes. Il a fallu analyser en détail chacune d'elles et choisir celle qui était la plus susceptible de s'adapter au contexte particulier de la géologie et aux spécificités du logiciel utilisé. Par la

suite, une étude des logiciels permettant la modélisation 3D a été effectuée. Il a donc été possible de choisir le logiciel qui semblait répondre le plus adéquatement aux besoins du présent projet. L'étape du développement, qui s'est déroulée après avoir complété une grande partie de la recherche théorique, visait la conception d'une structure de données géométriques à partir des résultats obtenus précédemment. De plus, un prototype qui permet l'interrogation de la structure a été développé. Finalement, la dernière étape de la méthodologie consistait à valider les développements théoriques et techniques. Il fallait établir la preuve qu'une structure topologique 3D permet de résoudre les problèmes liés à l'analyse spatiale d'un modèle géologique.

Chapitre 1. Revue des concepts

Le présent chapitre introduit les concepts théoriques concernant les données 3D, les systèmes informatiques, l'analyse spatiale et les structures de données topologiques. Étant donné que l'ensemble de ce mémoire est basé sur ces concepts, il est impératif de bien définir et de résumer les connaissances nécessaires à la compréhension de ces notions avant d'exposer les développements effectués.

1.1. Les données tridimensionnelles

Le 3D est devenu un sujet très à la mode depuis les dix dernières années (Bédard *et al.*, 2001; De La Losa, 2000; Pilouk, 1996; Zlatanova, 2000; Zlatanova *et al.*, 2001). Presque tous les logiciels, qui tentent de modéliser la réalité ou une fiction quelconque, s'adonnent à la représentation 3D. Les logiciels ArcGIS, Gocad, MicroStation, 3D Visual Studio ne sont que quelques exemples. Pourtant, une définition claire et non ambiguë du 3D n'est pas encore reconnue et acceptée par tous (Brisebois *et al.*, 2003). Les concepts de dimensions, d'univers et d'objets sont les points qui portent le plus à confusion dans la définition du 3D. Certains auteurs (Bédard *et al.*, 2001; Bentley, 2002; Kennedy, 2001) tentent des réponses qui sont plutôt incomplètes ou hors contexte. Voici les définitions répertoriées dans la littérature au sujet des notions de dimensions, d'univers et d'objets.

Dimension

Le Grand dictionnaire Web, section mathématique, définit une dimension comme étant : « l'étendue d'un corps suivant une direction donnée (longueur, largeur, hauteur, profondeur, diamètre). Longueur d'un segment de droite comprise entre deux lignes ou deux plans. » Dans le domaine de la physique, et toujours dans le Grand dictionnaire Web, une dimension est : « une grandeur réelle, mesurable, qui détermine la portion d'espace occupée par un corps. Valeur de ces grandeurs (hauteur, largeur, longueur, etc.) exprimées en fonction d'une unité de mesure. »

Aussi, la notion de dimension est largement utilisée dans la mise en place d'un système OLAP (On Line Analytical Processing) mais elle ne possède pas nécessairement la même

signification que précédemment. Dans le jargon OLAP, une dimension correspond à un axe ou un thème selon lequel les données seront analysées (Rivest, 2000). Il devient donc possible de posséder une multitude de dimensions qui s'appuient sur une infinité de thèmes. Par exemple, les systèmes OLAP sont souvent confrontés à des thèmes comme le temps, les produits, les pays. Ce sont tous des axes différents donc des dimensions différentes.

Les trois définitions présentées ci-haut font référence à un domaine d'application différent. Cependant, elles ont un point en commun puisqu'elles soutiennent qu'une dimension n'existe jamais seule. Une dimension doit toujours être appliquée à un objet. Dans le cadre de ce mémoire, la notion de dimension s'applique à partir des concepts d'objets et d'univers.

Dimension d'un objet

La dimension d'un objet est reliée au nombre de mesures nécessaires pour décrire la portion de l'espace occupée par l'objet ou sa représentation géométrique. Cette définition rejoint celle du domaine des mathématiques et de la physique du grand dictionnaire WEB mentionnées précédemment. Cependant, il faut préciser qu'il s'agit de l'espace occupé par l'objet lui-même et non pas par son rectangle englobant. Ainsi, un objet ponctuel n'aura aucune dimension (0D), un objet linéaire aura une seule dimension (1D), un objet surfacique aura deux dimensions (2D) et finalement, un objet volumique aura trois dimensions (3D) soient une largeur, une longueur et une hauteur (Bédard *et al.*, 2001).

Dimension d'un univers

Le concept d'univers est défini dans le domaine des mathématiques comme étant un ensemble des objets, des éléments logiques impliqué dans un jugement ou un raisonnement donné. Plus précisément, ce concept présente trois niveaux différents : l'univers global, l'univers du système et l'univers local (Bédard *et al.*, 2001). L'univers global permet de référencer géographiquement tout ce qui existe au niveau de la planète Terre. Tout objet, y compris un objet géologique affleurant à la surface, peut être localisé à l'aide de coordonnées géographiques (latitude, longitude) et d'une altitude. Cet univers possède toujours trois dimensions.

L'univers du système, comme son nom l'indique, permet de localiser tous les objets qui sont à l'intérieur du même système. Par exemple, une base de données pourrait contenir des objets qui sont géoréférencés dans un fuseau de la projection Mercator Transverse Universel (UTM). Ce fuseau de la projection UTM devient alors l'univers du système de la base de données. La position des objets au sein de l'univers du système est considérée comme absolue au niveau de la base de données. Par définition, il n'y a qu'un univers du système mais il est possible d'intégrer des données provenant de différents systèmes et possédant des univers différents. Dans ce cas, il faut transformer le système de référence vers celui du système cible. Le nombre de dimensions d'un univers du système peut être variable.

Finalement, il y a l'univers local qui permet de positionner un phénomène particulier régionalement. Les dimensions de ces univers ne sont pas directement reliées aux dimensions de l'univers du système ou de l'univers global. En géologie, le positionnement de données provenant d'un forage (élément linéaire) peut être un exemple de cette réalité. Ainsi, la distance entre la surface de la Terre et un élément particulier au forage indique sa position. Pour être en mesure de connaître la position absolue (dans l'univers du système), il faut connaître les paramètres de transformation entre les deux univers. À l'intérieur d'un univers du système, il peut y avoir plusieurs univers locaux. Le positionnement de manière absolue de tous les objets doit cependant être respecté. Ici également, le nombre de dimensions d'un univers local peut être variable.

Comme mentionné précédemment, les univers du système et local peuvent avoir plusieurs configurations de dimensions. Voici quelques exemples d'univers à différentes dimensions :

Un *univers 1D* possède un seul axe et l'ensemble des objets est positionné le long de cet axe.

Un *univers 2D* se compose de deux axes. L'exemple le plus courant de ce type d'univers se trouve en cartographie où l'ensemble des objets est représenté selon les axes X et Y. Il est possible de retrouver des univers qui sont en fonction des axes X et Z ou Y et Z. Les

coupes transversales géologiques utilisées pour représenter la géométrie des objets dans la troisième dimension sont un bon exemple de ce type de cartographie en 2D.

Un *univers 3D* permet de représenter les trois axes cartographiques soit le X, le Y et le Z. Il existe deux types d'univers 3D qui se distinguent au niveau de la façon d'obtenir et de stocker l'information concernant l'axe Z.

2D+1D : cette configuration correspond à un univers 2D pour lequel la troisième dimension est obtenue à l'aide d'un modèle numérique de terrain. En d'autres termes, les objets (2D) sont drapés sur un MNT dans le but d'en dériver la valeur de la troisième dimension.

2.5D : cette configuration correspond à un univers local 2D dont l'information concernant la coordonnée Z est enregistrée dans une base de données sous forme d'attribut. Par la suite, il est possible de visualiser cet attribut qui correspond généralement à la hauteur ou l'altitude relative à une surface de référence.

Un *univers 4D* est un univers pour lequel la quatrième dimension n'est pas une dimension géométrique comme les autres. En général, l'univers 4D est un univers 3D auquel la dimension du temps a été ajoutée, les quatre axes correspondant à X, Y, Z et T.

Un *univers nD*, comme il est possible d'imaginer, n'a rien de géométrique. Cette terminologie est employée dans des systèmes OLAP ou SOLAP (Rivest, 2000) où chaque dimension représente un thème, d'où la possibilité d'avoir une multitude de dimensions.

Les définitions du 3D

Avec toutes ces définitions, il y a plusieurs interprétations possibles de ce qu'est une représentation 3D. La compagnie ESRI (Environmental Systems Research Institute) définit les formes 3D comme étant des points, des lignes, des polygones qui, en plus des dimensions X et du Y, possèdent une coordonnée Z (Kennedy, 2001). Selon cette définition, peu importe le nombre de dimension des objets, ils sont considérés en 3D s'ils sont positionnés dans un univers possédant trois dimensions. La figure 1-1 montre les

configurations de dimensions des univers et des objets qui sont considérés comme étant du 3D. Les cases jaunes sont les seuls cas où il y a présence de 3D.

Objet \ Univers	0D	1D	2D	3D
1D	●	—		
2D	●	/ \	■	
3D	●	/ \	■ ↗	■

Figure 1-1 – Figure représentant la conception du 3D par ESRI. Les cases jaunes représentent les cas considérés comme étant du 3D. Adaptée de Brisebois (2003).

D'autre part, la compagnie Bentley (2002) possède une conception complètement différente. Leur définition du 3D se réfère à l'enveloppe englobante des objets. Par exemple, si le rectangle englobant d'un objet doit posséder une profondeur pour le contenir, il y a présence de 3D. En d'autres termes, il y a une représentation 3D lorsque les objets ne sont pas planaires. Ainsi, si tous les objets présents à l'intérieur d'un univers peuvent être représentés sur un seul et unique plan, la représentation est de type 2D. Cette approche fait appel directement à la géométrie intrinsèque des objets et ne prend pas en considération l'univers dans lequel se trouve l'objet (Brisebois *et al.*, 2003). La figure 1-2 illustre la conception du 3D par Bentley (2002).

Objet → Rectangle englobant ↓	0D	1D	2D	3D
0D	●			
1D		—		
2D		/ \	■	
3D		/ \	■ ↗	■

Figure 1-2 - -Figure représentant la conception du 3D par Bentley. Les cases jaunes représentent les cas où il y a présence de 3D. Adaptée de Brisebois (2003).

Par ailleurs, Bédard *et al.* (2001) définit le 3D comme étant une représentation d'objets qui ont, au minimum, trois dimensions (longueur, largeur et profondeur). Cette approche fait

appel uniquement à la géométrie des objets et non pas à l'univers dans lequel il se trouve (Brisebois *et al.*, 2003). Cette conception du 3D est illustrée à la figure 1-3.

Objet \ Objet	0D	1D	2D	3D
0D	●			
1D		/ \		
2D			□ ◊	
3D				■ ▢

Figure 1-3 - Figure représentant la conception du 3D par Bédard *et al.* La case jaune représente l'unique cas où il y a présence de 3D. Adaptée de Brisebois (2003).

Après l'étude de ces définitions, il devient possible d'expliquer une représentation 3D par rapport à plusieurs concepts différents. Cependant, la définition qui semble être la plus juste, dans le contexte de ce travail, est celle adoptée par la compagnie ESRI (Kennedy, 2001), selon laquelle une représentation sera dite 3D si les objets sont situés dans un univers à trois dimensions. Cette idée est beaucoup moins restrictive que celles présentées par Bédard *et al.* (2001) et Bentley (2002) puisqu'elle englobe toutes les situations où il y a présence d'un univers 3D et ne se restreint pas uniquement aux dimensions des objets présents.

1.2. Représentation de la 3^e dimension

Cette section effectue un bref survol des techniques d'acquisition de données 3D, en plus de faire une étude détaillée des modèles de représentation des objets en trois dimensions. De plus, les systèmes qui permettent le stockage des données spatiales seront analysés en détail.

Pour effectuer de la modélisation 3D, il est impératif d'utiliser des mesures concernant la position et la forme des objets à modéliser en 3D. Ces mesures seront obtenues à l'aide de techniques d'acquisition. La télédétection, le GPS, la topométrie, la photogrammétrie (Heywood *et al.*, 1998; Longley *et al.*, 2001) et le LIDAR (Wozencraft, 2002) sont toutes des méthodes d'acquisition de données qui sont utilisables pour effectuer des relevés

tridimensionnels. Il est évident que chacune de ces méthodes d'acquisition ont des particularités propres à la technologie utilisée. Par exemple, le GPS permet le positionnement d'un seul point à la fois tandis que la photogrammétrie permet de positionner en 3D n'importe quel point présent sur un couple de photographies. Ce sont des petites différences qui doivent être prises en considération lorsque vient le temps de déterminer le type de méthodes d'acquisition nécessaire à la caractérisation spatiale des objets d'un modèle.

Il existe différents modèles pour représenter les objets dans un espace tridimensionnel (De La Losa, 2000). Plusieurs ouvrages ont déjà été consacrés à faire l'état de l'art de ces modèles (Apel, 2001; Bak et Mill, 1989; Clementini et DiFelice, 1994; De Cambray et Yeh, 1994; Foley *et al.*, 1990; Fritsh, 1990; Gardan et Lucas, 1984; Jones, 1989; Mantyla, 1988; Peroche *et al.*, 1988; Raper et Belk, 1991). Selon De La Losa (2000), les modèles de représentation 3D peuvent être séparés en trois catégories distinctes : les modèles par balayage, les modèles par frontières et les modèles volumiques. Chacun de ces modèles implique des techniques de construction et de stockage particulières. La figure 1-4 illustre l'organisation des différents modèles selon De La Losa (2000). Les sections suivantes expliquent ces catégories.

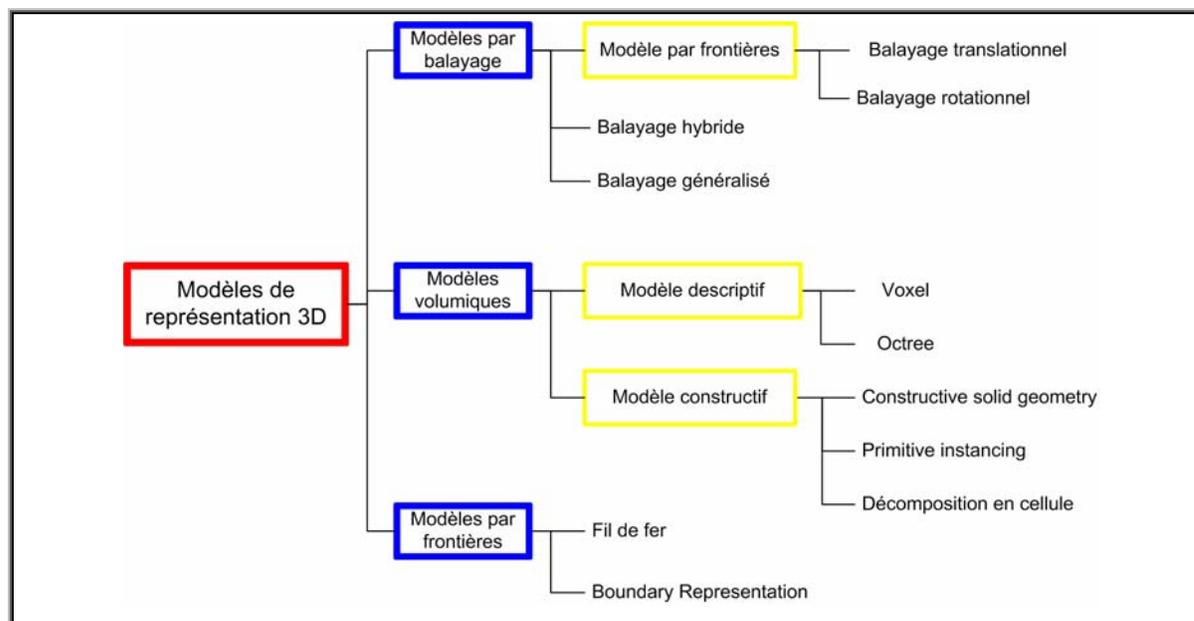


Figure 1-4 - Classification des modèles de représentation graphique de la troisième dimension, inspiré de de la Losa (2000).

1.2.1. Modèles par balayage

La technique de construction à la base d'un modèle par balayage consiste à déplacer une surface le long d'une trajectoire pour créer un volume 3D. Le balayage simple permet de déplacer des surfaces dans une seule et unique direction. Le balayage translationnel implique la translation de la surface selon un axe tandis que le balayage rotationnel consiste à déplacer la surface autour d'un axe. Ces techniques simples sont très limitées puisque le déplacement de la surface ne peut se faire que selon un vecteur unique. Cette façon de créer des modèles 3D n'est pas très bien adaptée pour la représentation d'objets ayant des formes complexes comme des bâtiments ou des couches géologiques plissées. Par contre, dans le domaine de la mécanique, cette façon de modéliser peut être utile lorsque l'objet à représenter ou à construire est simple et qu'il doit avoir une forme exacte et précise.

Le balayage hybride permet de faire l'union de plusieurs objets produits par le balayage simple (Ramos, 2003). Ainsi, il est possible d'attribuer et d'effectuer différentes opérations de translation ou de rotation à plusieurs surfaces différentes, ce qui permet de construire des objets plus complexes.

Finalement, le balayage généralisé est plus flexible. Il est possible de modifier une surface pendant une trajectoire, ce qui permet de débiter avec une surface et de terminer avec une géométrie complètement différente. Par exemple, à partir d'un carré, il est possible d'effectuer une translation et de terminer avec un seul et unique point. Ainsi, le résultat de ce balayage sera une pyramide.

Ces techniques de modélisation d'objets 3D ont l'avantage d'être d'une grande simplicité. Cependant, elles sont limitées à la modélisation d'objets plutôt simples. Il serait périlleux d'entreprendre la modélisation d'un bâtiment complexe comme le Stade olympique de Montréal.

1.2.2. Modèles volumiques

Ces modèles sont construits à partir de combinaisons de primitives tridimensionnelles (cube, cylindre, sphère, etc.). Il existe deux types de modèles volumiques : les modèles descriptifs et les modèles constructifs. Voici une description détaillée de tous ces modèles.

Les **modèles descriptifs** modélisent l'espace occupé par un objet à partir d'objets voisins et sans intersection. Ces modèles utilisent des assemblages de formes régulières et facilement modélisables (comme des cubes) pour construire des objets plus complexes. Seulement les modèles volumiques descriptifs utilisent de véritables volumes qui sont une représentation matricielle 3D.

Le modèle voxel utilise de petits éléments volumiques (Voxel qui vient de VOlume ELement) pour décrire la forme des objets. La figure 1-5 montre un cube construit à l'aide de voxels.

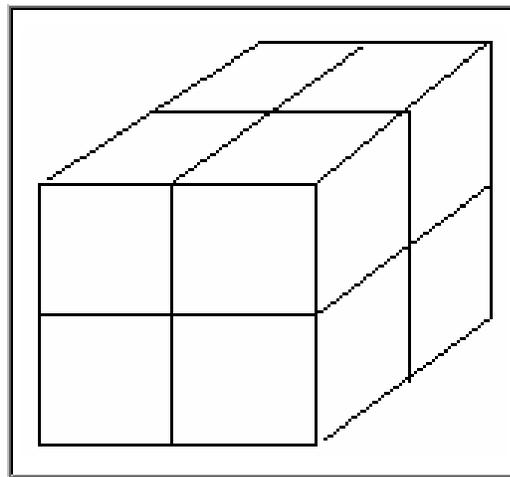


Figure 1-5 - Exemple de la modélisation d'un cube à l'aide de voxels

Certains problèmes sont liés à l'utilisation des voxels pour construire des modèles 3D. Par exemple, pour bien définir les contours d'un objet, la résolution (taille des voxels) doit être très haute. Sans la présence de moyens de compression des données, la taille des fichiers augmente significativement. De plus, l'analyse spatiale est réduite à des relations d'adjacence, ce qui limite énormément la diversité des opérateurs spatiaux applicables.

Le modèle octree est une extension du modèle voxel qui permet, selon les besoins, de diviser un grand voxel en plusieurs voxels plus petits. L'espace est alors découpé en cubes de taille variable. Ce découpage peut être conceptualisé par un arbre, dont le tronc correspond à l'espace global. À toutes les intersections, l'arbre se divise en huit branches. La figure 1-6 donne l'exemple d'un arbre et d'un cube octree. Il est possible de voir que chaque niveau possède huit divisions. Ainsi, un cube est divisé en huit parties différentes.

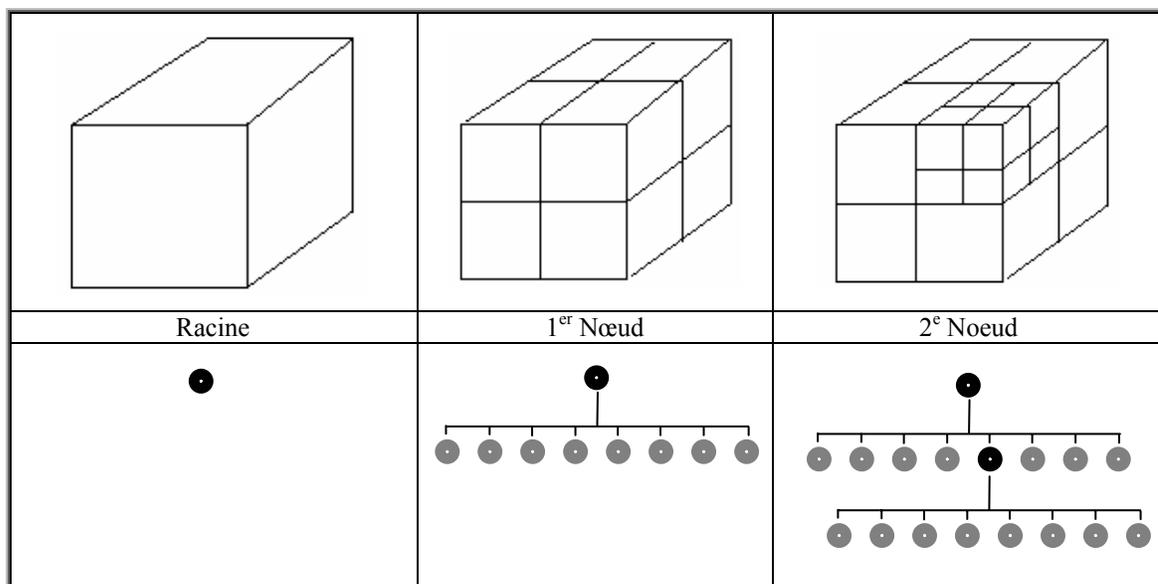


Figure 1-6 - Exemple graphique du modèle octree

Chaque cube, grand ou petit, peut posséder trois valeurs dans la structure : nœud intermédiaire (espace divisé en cubes plus petits), espace occupé (présence d'un objet) ou espace inoccupé (absence d'un objet). L'utilisation d'octree permet de réduire la taille du fichier de façon significative en comparaison avec les objets construits à partir de voxels.

Les **modèles constructifs** sont bâtis à partir d'objets ayant des formes plus ou moins complexes. Bien que l'on qualifie ces modèles de volumiques, ils ne sont pas de véritables volumes puisqu'ils représentent le contour des objets sans que ces derniers ne soient nécessairement pleins. Il existe trois modèles constructifs différents : le Constructive Solid Geometry (CSG), le Primitive Instancing et la décomposition en cellules.

Le CSG utilise un jeu d'objets 3D (cubes, sphères et cylindres) et différentes opérations (l'union, l'intersection et la différence) pour construire des objets complexes. Par exemple, la différence entre un cube et un cylindre donnera un cube ayant un trou de forme cylindrique. De plus, il est possible d'appliquer sur les primitives des translations, des facteurs échelles et des rotations. Les objets réguliers, comme des pièces mécaniques, peuvent être modélisés à partir du CSG. Cependant, plus l'objet est complexe, plus le nombre d'opérations pour le modéliser sera grand et, par conséquent, plus le temps nécessaire pour l'affichage sera grand. La figure montre un exemple de CSG réalisé avec le logiciel AutoCAD.

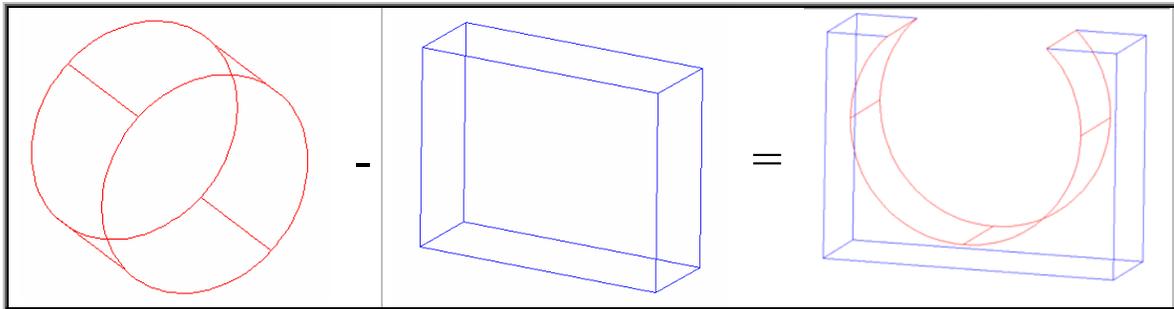


Figure 1-7 - Exemple d'une opération de soustraction d'objets avec le CSG d'AutoCAD 2004

La figure précédente illustre l'opération de soustraction d'un cylindre et d'un solide rectangulaire.

Contrairement au CSG, le modèle primitive instancing utilise des primitives complexes paramétrables. D'après ce principe, il est possible de décrire tout objet à partir d'un certain nombre de paramètres. Ce type de modèle a été conçu pour modéliser des environnements pour lesquels les objets sont semblables. Par exemple, un engrenage peut être décrit à partir de son rayon et du nombre de dents qu'il possède. Encore ici, cette technique est efficace pour modéliser un environnement contenant des objets mécaniques.

Le dernier modèle constructif est celui par décomposition de cellules et il est considéré comme une extension du modèle CSG. Il existe deux différences majeures entre le CSG et le modèle par décompositions de cellules. Premièrement, il y a un ajout de certaines primitives telles le quart de cône et le quart de cylindre pour arriver à mieux décrire les objets. Deuxièmement, seule l'opération d'intersection a été conservée, ce qui permet de réduire le temps de calcul nécessaire pour effectuer l'affichage des objets.

1.2.3. Modèles par frontières

Comme son nom l'indique, ce type de modèle représente les frontières des objets. Il n'est alors plus question de volumes mais bien de faces et de lignes qui décrivent les contours des objets. Il existe deux types de modèles par frontières : le fil de fer et le Boundary Representation (BR).

Le modèle fil de fer a été le premier à modéliser les frontières des objets en 3D. Pour ce modèle, la représentation se fait uniquement à partir de points et de segments qui décrivent

les objets. La simplicité de ce type de modèle entraîne certaines ambiguïtés puisque les surfaces ne sont pas décrites explicitement.

Le deuxième modèle de représentation par frontières est le Boundary Representation qui est une extension du modèle fil de fer. Les objets modélisés sont décrits par un ensemble de faces, elles-mêmes délimitées par un ensemble de segments possédant un nœud à chacune de ses extrémités. Pour être utilisées, les faces doivent être planaires. La vérification de la planéité des faces peut être une entreprise périlleuse étant donné que la précision des données (nombre de décimales) peut entraîner des erreurs.

L'utilisation de faces triangulaires enrayer le problème de planéité des surfaces et permet la décomposition des objets en primitives géométriques nommées simplexes. Les simplexes permettent de décrire des objets plus complexes (Breunig *et al.*, 1994). Il y a quatre simplexes possibles : 0-simplexe (point), 1-simplexe (ligne), 2-simplexe (triangle), 3-simplexe (tétraèdre). Chaque simplexe est constitué de $n + 1$ (n-1)-simplexe. Par exemple, un triangle (n=2) est délimité par 3 (n+1) segments (n-1).

1.2.4. Systèmes informatiques

Tous les modèles présentés dans les sections précédentes possèdent des caractéristiques particulières. Certains de ces modèles ont été développés pour modéliser des objets du domaine de la mécanique dont les besoins sont bien différents de la modélisation en milieu urbain ou en milieu géologique. Il existe plusieurs autres types de logiciels de modélisation 3D qui ont été développés pour des applications dans des domaines spécifiques et adaptés à des besoins différents. La section suivante est consacrée à l'étude des logiciels de modélisation et aux modèles de représentation qu'ils utilisent.

On retrouve sur le marché au moins quatre catégories de logiciels permettant de faire de la modélisation et de la visualisation en 3D, soit les logiciels de réalité virtuelle (RV), les logiciels de visualisation scientifique (VS), les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La littérature montre que les quatre grandes familles de logiciels utilisent un amalgame impressionnant de techniques de modélisation pour afficher la troisième dimension et représenter les objets en

3D (De La Losa, 2000; Ramos, 2003). Cette section fait une description de chacun des types de logiciel, donne des exemples de logiciels présentement sur le marché et présente les techniques qu'ils utilisent pour représenter la troisième dimension.

La **réalité virtuelle** a comme défi de créer par ordinateur un monde le plus près de la réalité possible. Il faut donc que les objets aient une apparence, produisent des sons et agissent de façon réaliste. C'est Sutherland (1965) qui a défini le terme « Ultimate Display » comme étant une fenêtre par laquelle il est possible d'apercevoir un monde virtuel. Ce concept, jumelé à la possibilité d'interagir avec ce monde virtuel, permet de définir ce qu'est la réalité virtuelle. Les logiciels de réalité virtuelle ne représentent pas encore une réalité aussi complète que celle décrite par Sutherland(1965). La visualisation se fait souvent par le biais d'un écran cathodique et les outils d'interaction sont le clavier et la souris. Cette limitation rend difficile l'immersion complète à l'intérieur d'un monde virtuel. Cependant, les univers créés par des logiciels de RV sont d'un réalisme époustoufflant. Le logiciel 3D Studio Max (www.discreet.com) est un bon exemple de support qui permet de créer un monde virtuel. Ces logiciels utilisent beaucoup de techniques de modélisation pour représenter des objets 3D. Par exemple, le logiciel 3D Studio Max utilise les modèles CSG, BR ainsi que certains modèles par balayage pour représenter les objets en 3D.

La **visualisation scientifique**, contrairement à la réalité virtuelle, a pour but de montrer ce qui n'est pas visible à l'œil humain, comme des fonctions mathématiques, des structures moléculaires complexes, des galaxies évoluant dans le temps. Ce mode de visualisation permet d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes naturels ou abstraits. Il n'existe pas de logiciels capables d'accomplir toutes les tâches de VS. Chaque domaine possède un programme qui répond à un besoin spécifique en VS; il existe donc une multitude de logiciels sur le marché qui s'appliquent dans de nombreux domaines. HyperPlan (www.zib.de) est un exemple d'outil utilisé dans le domaine médical qui permet de créer des modèles d'un corps à partir de la physiologie d'un patient. Le logiciel Gocad (www.earthdecision.com) fait également de la visualisation scientifique dans le domaine médical. Ce dernier utilise le modèle BR et les Voxels pour construire des objets 3D.

Les logiciels de **conception assistée par ordinateur** (CAO) ont pour but d'effectuer des tâches de modélisation dans des domaines comme l'ingénierie, l'architecture, la

cartographie, etc. (Bernhardsen, 2002). La philosophie derrière la conception de ce type de logiciels est orientée pour offrir à l'utilisateur un outil de modélisation puissant. Ceci implique que les aspects d'analyse spatiale, d'analyse de données descriptives et d'intégration de données multisources sont négligés au dépend de la performance de la modélisation. Ainsi, la structure de données est conçue pour offrir les capacités optimales de représentation et non pas pour effectuer le travail d'analyse spatiale (Korte, 1997). La plupart des CAO utilisent le BR et le CSG comme modèles de données. Deux logiciels CAO possèdent une très grande part de marché. Tout d'abord, Micro Station de la compagnie Bentley (www.bentley.com) est très utilisé pour faire de la cartographie mais possède également un module permettant la modélisation 3D. Deuxièmement, AutoCAD de la compagnie Autodesk (www.autodesk.ca) propose des solutions pour les personnes qui exécutent des tâches de modélisation de pièces mécaniques ou de bâtiments. Il existe également des logiciels spécialisés dans des domaines bien précis qui possèdent une structure semblable aux CAO. Par exemple, le logiciel Surfer de la compagnie Scientific Software Group (www.ssg-surfer.com) permet de créer des modèles numériques de terrain.

Les **systèmes d'information géographique** sont des systèmes qui regroupent plusieurs objets différents. En plus des logiciels (software) et des équipements informatiques (hardware), tous les équipements servant à effectuer la numérisation des données (table numérisante) font partie du système. Les SIG sont définis selon les tâches qu'ils doivent être en mesure d'accomplir : l'acquisition et la vérification, la compilation, l'entreposage, la mise à jour et l'édition, la gestion et l'échange, la manipulation, la réception, la présentation et finalement, l'analyse et la combinaison des données (Bernhardsen, 2002). Les structures de données doivent posséder des caractéristiques particulières pour permettre d'effectuer toutes ces tâches. Une différence majeure entre les SIG et les CAO, en plus de la structure des données, réside dans le fait que chacun des objets géométriques est décrit à l'aide d'attributs situés dans un système de gestion de base de données (SGBD). Les logiciels SIG les plus connus sont : ArcGIS (www.esri.com), MapInfo (www.mapinfo.com) et GeoMedia (www.intergraph.com). Bien que les SIG permettent d'accomplir plusieurs tâches importantes, ils offrent très peu de possibilités de représentation 3D. La raison est simple; il est difficile de structurer les données 3D (autant géométriques que descriptives) pour être en mesure d'effectuer l'ensemble des tâches propres à un système d'information

géographique complet. Un exemple de modèle de représentation 3D qui se retrouve dans un SIG commercial est celui du module ArcScene de ArcGIS. Ce dernier utilise le modèle par balayage pour faire la représentation de bâtiments.

1.3. L'analyse spatiale

Comme il a été mentionné précédemment, la force des systèmes d'information géographique réside dans leur capacité à analyser les données spatiales. La figure 1-8 montre qu'il est possible de distinguer trois types d'analyse de données : temporelle, conventionnelle et spatiale (Bédard et Larrivée, 2003). Cette recherche vise plus spécifiquement l'analyse spatiale.

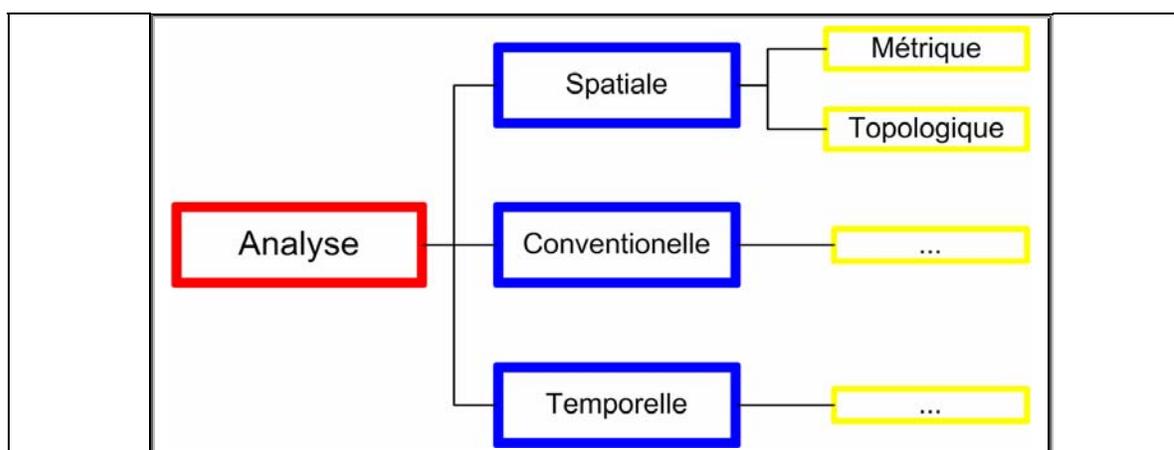


Figure 1-8 - Schéma des types d'analyse présents dans un SIG.

L'analyse spatiale (AS) : « concerne le raisonnement qui permet de déduire les caractéristiques d'un phénomène en faisant intervenir des données géographiques » (OQLF, 2004). L'AS exploite l'information métrique et topologique reliée aux données géographiques. L'information métrique est reliée au calcul d'un certain type d'attributs (ex. : aire, distance) qui met en cause un ou plusieurs objets. Ces calculs sont basés uniquement sur les coordonnées des objets et, généralement, ils sont simples à réaliser. Par contre, l'information topologique est beaucoup plus complexe à exploiter. La topologie est une discipline des mathématiques qui étudie la propriété des figures qui sont invariantes, même après des transformations comme la translation, la rotation et le changement d'échelle (Develin, 1994; Egenhofer, 1989; Lachance *et al.*, 2005). En géomatique, l'analyse spatiale topologique cherche à identifier les relations d'un objet par rapport aux

autres objets de son environnement (Cromely 1992). Ces relations peuvent être de cinq types différents : proximité, intersection, inclusion, égalité et adjacence.

Pour réaliser des requêtes spatiales, il faut avoir recours aux opérateurs. Il s'agit en fait de l'algorithme qui est utilisé par le logiciel pour obtenir l'information concernant le résultat de la requête. Il existe deux types d'opérateurs : topologique et métrique. Les opérateurs topologiques exploitent uniquement l'information topologique tandis que les opérateurs métriques permettent de déduire l'information métrique et topologique. Cela peut sembler incohérent, mais il est facile de justifier cette ambiguïté :

Les opérateurs métriques se basent sur des calculs mathématiques pour identifier l'information métrique. Pour l'information topologique, il est également possible d'utiliser les calculs mathématiques mais, il est aussi possible d'exploiter les structures de données. Ces méthodes sont directement reliées à la structure de données géométriques qui est utilisée par le logiciel. Les deux types de structures de données les plus importantes sont les structures topologiques et les structures non topologiques. Les structures topologiques sont organisées de façon à réduire la redondance de l'information à l'intérieur des tables. Prenons l'exemple de deux objets qui partagent un point et qui sont enregistrés avec une structure topologique de données. L'enregistrement de ce point ne sera pas répété deux fois puisqu'il y a uniquement l'identifiant du point qui sera inscrit deux fois dans la description des objets. L'utilisation d'identifiant unique pour décrire des objets permet de les comparer facilement entre eux. Il devient beaucoup plus facile de faire des liens entre les objets. Lorsqu'un logiciel utilise ce type de structure de données, l'utilisation d'opérateurs topologiques est requise pour déduire l'information topologique. D'un autre côté, les structures non topologiques sont beaucoup moins bien organisées. Il existe beaucoup de redondance, ce qui rend la gestion plus difficile. Reprenons l'exemple décrit ci-haut, où deux objets partagent un même point. Lorsque cette situation se présente à l'intérieur d'une structure de données non topologique, le point est tout simplement répété autant de fois qu'il est utilisé. Cette façon de stocker l'information permet d'afficher les données plus rapidement puisqu'il n'est pas nécessaire de faire des liens entre différentes tables pour trouver

toute l'information concernant un objet. Par contre, il est beaucoup plus difficile de faire l'édition des données. Par exemple, si nous désirons changer la position d'un point, il faut vérifier tous les objets qui possèdent ce point et faire les changements à tous ces endroits. Il est également beaucoup plus difficile de réaliser des requêtes topologiques. Pour ce faire, il faut avoir recours aux opérateurs métriques qui, à partir de calculs mathématiques, donne de l'information topologique. Par exemple, dans le cas où deux objets partagent le même point, à partir d'un calcul de distance (opérateur métrique), il est possible d'affirmer que ces objets se touchent (relation topologique). Ainsi, les opérateurs métriques permettent de déduire de l'information métrique et topologique.

Comme il est possible de le voir, les structures de données géométriques jouent un rôle important dans l'analyse spatiale. La section suivante propose de faire un examen en profondeur des différents types de structures.

1.4. Structure de données géométriques

Les structures de données géométriques sont construites selon deux approches différentes : le « path topological » et le « graph topological » (Cromley, 1992). Dans le domaine de la cartographie assistée par ordinateur, le « path topological » est considéré comme un modèle non topologique (ou géométrique) tandis que le « graph topological » est considéré comme un modèle topologique. Cette section présente les différentes structures associées aux deux groupes de modèles mentionnés précédemment, autant dans un environnement 2D que 3D. La présentation sera effectuée par le biais d'une courte description ainsi que l'illustration de la structure du modèle à l'aide de diagramme UML (Scott, 2001).

1.4.1. Modèles non topologiques

Les modèles non topologiques sont développés pour permettre au logiciel une représentation rapide des données. Les structures sont dénormalisées au maximum pour faciliter l'accès aux données ce qui signifie que la même information est répétée à plusieurs endroits afin qu'elle soit accessible rapidement. Cette façon de stocker l'information amène de la redondance, ce qui peut provoquer un manque de cohérence entre les données

(intégrité). Par exemple, si un point est une composante de deux objets distincts (polyligne⁶ ou polygone⁷), il sera enregistré deux fois. Par conséquent, si l'utilisateur doit modifier le positionnement de ce point, ce changement devra se répercuter sur tous les objets qui sont composés à partir de ce point. La littérature fait référence au « silvering problem » pour identifier cette difficulté (Peucker et Chrisman, 1975). Voici les modèles de données géométriques qui ont été recensés pour les données 2D et 3D.

1.4.1.1. Structure non topologique de données 2D

1.4.1.1.1. Modèle Spaghetti

Ce modèle enregistre les frontières comme étant une chaîne de coordonnées sans aucune correspondance avec les véritables frontières des polygones (Chrisman, 1974). Ce modèle ne gère pas les polygones mais uniquement les polygones qui représentent les frontières. Les intersections entre deux segments ne sont pas nécessairement marquées par un point. Ce genre de structure de données sert presque uniquement à faire une représentation visuelle des données. Il est très difficile d'effectuer de l'analyse spatiale autant métrique que topologique (Cromley, 1992). La figure 1-9 montre, avec le formalisme UML, les éléments de base nécessaires pour stocker des primitives géométriques dans la structure spaghetti.

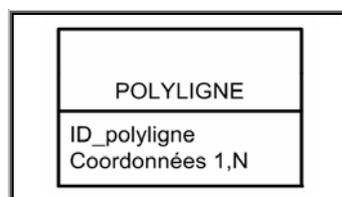


Figure 1-9 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle spaghetti
La figure précédente montre que la structure spaghetti nécessite uniquement la classe polyligne et deux champs : l'identifiant unique (ID) et de 1 à N paires de coordonnées.

1.4.1.1.2. Représentation par dictionnaire de points

⁶ Une polyligne représente un regroupement de plusieurs segments de ligne connectés entre eux. Le résultat est une ligne qui possède plusieurs petits segments.

⁷ Un polygone représente un regroupement de plusieurs segments de ligne connectés entre eux qui forme un objet fermé. Le résultat est une forme géométrique qui possède un nombre variable de côtés.

Ce modèle de représentation par dictionnaire de points introduit le concept de polygone (Cromley, 1992). Ce modèle consiste à inscrire chacun des polygones de façon indépendante à l'intérieur du fichier. Ainsi, l'enregistrement d'un polygone, tel qu'illustré par le modèle de la figure 1-10, consiste à inscrire l'identifiant unique de ce polygone et de tous les points qui le composent.

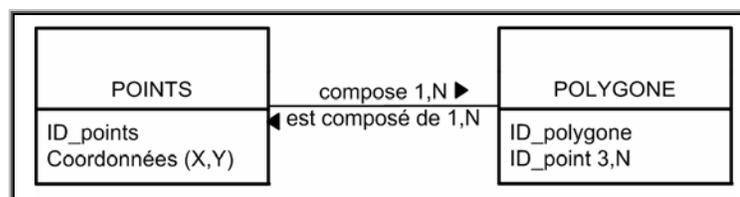


Figure 1-10 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle par dictionnaire de points

La figure précédente montre que la classe polygone utilise les identifiants uniques des points pour représenter les polygones au lieu de paire de coordonnées (X, Y). Ainsi, l'ajout d'une classe (points) qui fait la correspondance entre les coordonnées et les identifiants des points est nécessaire. Cette particularité a pour conséquence de réduire en partie la taille des fichiers associés à cette structure. Avec la structure par dictionnaire de points, l'édition des objets devient difficile puisqu'il y a duplication des frontières entre deux polygones adjacents. Dans le cas de la modification d'une frontière commune entre deux polygones, la manipulation de deux polygones sera nécessaire. Ce problème est connu comme étant le « silvering problem ». Par contre, l'introduction de la classe *points* permet de mieux gérer ce problème puisqu'il devient plus facile de détecter des erreurs en comparant des identifiants uniques qu'en comparant des paires de coordonnées.

1.4.1.1.3. Représentation par dictionnaire de chaînes/points

Dans le but de ne pas dupliquer les frontières, il est possible de définir ces dernières comme étant des chaînes uniques (Cromley, 1992). Chacun des polygones est alors défini par le biais d'une liste circulaire de chaînes, ce que propose le modèle par dictionnaire de chaînes/points présenté à la figure 1-11.

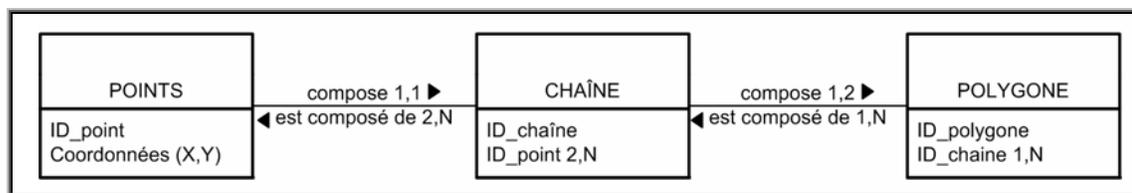


Figure 1-11 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle par dictionnaire de chaînes/points

Cette structure fait appel à trois tables différentes pour enregistrer l'information. La première table donne la liste de tous les points avec leurs identifiants uniques et leurs coordonnées. Ces points sont assemblés dans la deuxième table pour former des chaînes. Finalement, un polygone est défini par une liste de chaînes qui représentent sa frontière. L'affichage des polygones devient ainsi plus long car plusieurs associations entre les différentes tables doivent être effectuées avant d'identifier les chaînes et les points qui le composent.

1.4.1.2. Structure non topologique de données 3D

La section précédente a montré qu'il existe diverses structures de stockage de données 2D. Les structures non topologiques de données 3D (X, Y et Z) ne sont pas aussi bien documentées, possiblement en raison de leur relative simplicité. Pour passer du 2D au 3D, la majorité des structures ne font qu'ajouter la troisième coordonnée aux objets existants, en plus de faire l'ajout d'un véritable objet 3D (solide). Cette section présente un cas particulier de structure non topologique de données 3D. La structure du logiciel Gocad (Gocad, 2004) a été choisie puisqu'elle représente un cas typique de logiciel qui met l'emphase sur la représentation et l'édition des données au détriment de l'analyse des relations de voisinage. Ce logiciel sera analysé en profondeur au chapitre 2. La figure 1-12 illustre la façon dont Gocad structure les données géométriques des principaux objets qui sont formés à partir de noeuds.

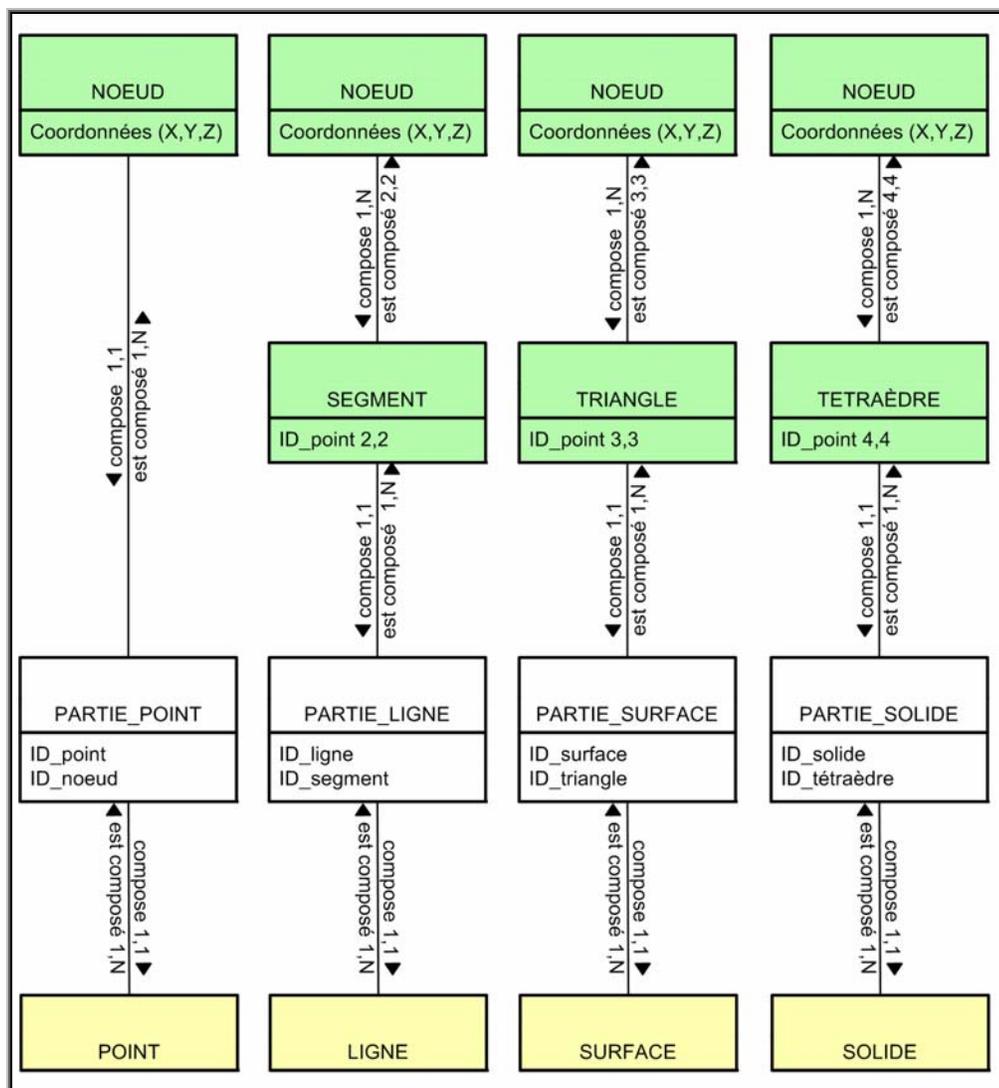


Figure 1-12 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du modèle de Gocad.

Comme il est possible de constater, le modèle possède trois niveaux d'abstraction différents : les primitives géométriques (vert), les parties (blanc) et finalement, les objets géométriques (jaune). Chaque niveau sert à former le niveau supérieur : les primitives forment les parties, et les parties forment les objets géométriques. Par exemple, les tétraèdres forment des parties de solide et les parties de solide forment les solides. Il faut noter que les différents éléments ne communiquent pas entre eux, c'est-à-dire qu'il y a une indépendance totale entre les objets de nature différente ainsi que les objets de même nature. À partir du modèle, il est possible de remarquer que chaque type d'objets possède ses propres primitives et il faut également constater l'absence de lien entre ces primitives. Cette situation est responsable de l'indépendance entre les objets, ce qui réduit

considérablement la capacité d'analyse topologique. De plus, étant donné que l'information se situe dans des fichiers différents, il est plus difficile de faire des liens entre les objets.

Cette structure donne un bon exemple de la faiblesse des modèles non topologiques pour gérer les relations entre les objets car les données sont enregistrées dans le fichier de façon redondante et peu organisée. Par contre, cela permet une efficacité remarquable pour la visualisation des données géométriques. Voyons maintenant comment s'organisent les structures de données dites topologiques.

1.4.2. Modèles topologiques

Les modèles topologiques sont construits dans le but de stocker l'information concernant les relations de voisinage des objets qui y sont enregistrés. Au détriment de l'efficacité de l'affichage, ces structures enregistrent les données de façon à accélérer l'exécution de requêtes à caractère topologiques. La première partie de cette section fait la description de deux structures de données topologiques 2D. Ces dernières ont été choisies pour montrer l'évolution de la topologie dans les structures 2D. La seconde partie de cette section est consacrée à l'étude des modèles topologiques 3D.

1.4.2.1. Structure topologique de données 2D

1.4.2.1.1. Dual Independent Map Encoding (DIME)

Le segment est la principale composante du modèle Dual Independent Map Encoding (Cooke et Maxfield, 1967). Les attributs *point de départ* et *point d'arrivée* permettent de déterminer le sens d'un segment. Ainsi, il devient possible d'identifier les polygones qui se situent de chacun des côtés du segment. Ces informations permettent de déterminer les segments qui forment un polygone. Par exemple, pour connaître tous les segments constituant un polygone en particulier, il faut identifier les enregistrements de la table *segment* qui possèdent le numéro du polygone d'intérêt dans un de ses champs *polygone* dans un de ses champs *polygone de gauche* ou *polygone de droite*. Avec ces informations, il est possible de reconstituer le polygone recherché. La figure 1-13 illustre le modèle conceptuel de données du DIME.

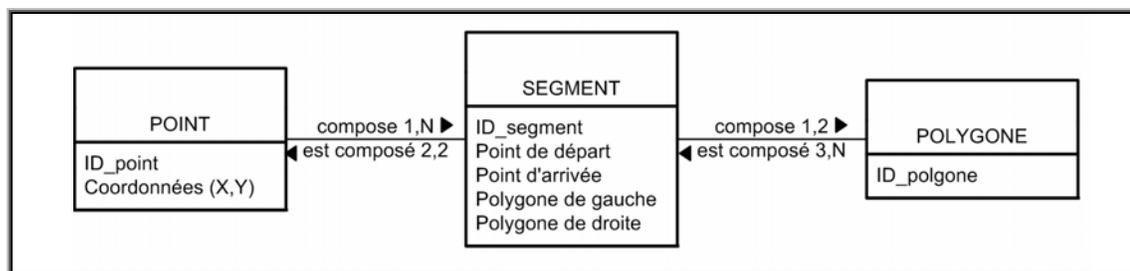


Figure 1-13 - Éléments constitutifs de la structure de données géométriques du DIME

La table de points contient les identifiants uniques et les coordonnées de chacun des points. La table *polygone* possède seulement l'identifiant unique des polygones. Finalement, la table *segment* contient l'information concernant la composition même du segment (*ID*, *point de départ*, *point d'arrivée*) et l'information sur le voisinage (*polygone de gauche* et *polygone de droite*). La définition explicite des polygones voisins permet d'identifier facilement les relations de voisinage et ainsi de répondre à des requêtes topologiques rapidement. Par contre, l'affichage d'un seul polygone devient plus complexe puisque le fichier ne définit pas explicitement leur contour. Il faut alors faire une recherche pour trouver l'ensemble des segments qui ont le numéro du polygone recherché dans l'un des champs *polygone de gauche* ou *polygone de droite*. Cette opération requiert un temps de traitement relativement long.

Il faut noter que les points ne sont pas définis comme étant des nœuds proprement dits. La figure 1-14 illustre la différence entre les points utilisés avec le DIME et le véritable concept de nœuds.

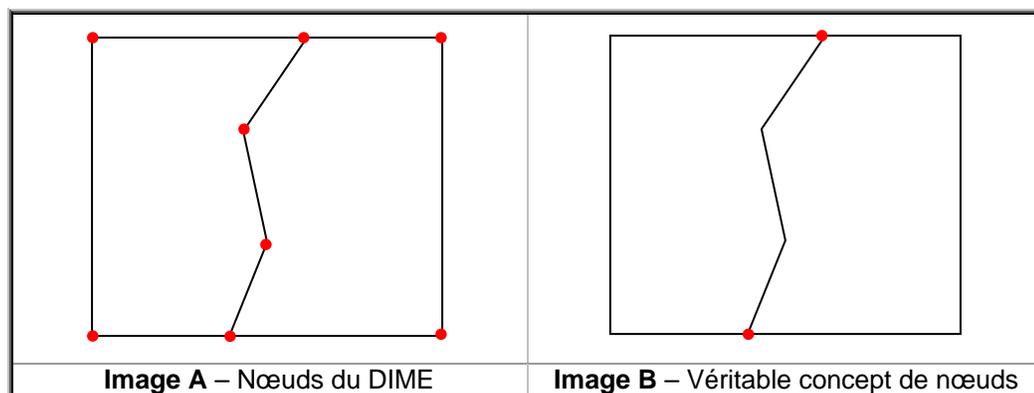


Figure 1-14 - Illustration de la différence entre les points du DIME (image de gauche) et le vrai concept de nœuds (image de droite)

Dans la figure précédente, il est possible de voir qu'avec le DIME (image A), un point est inséré chaque fois qu'il y a une cassure dans une ligne. Par contre, le vrai concept de nœuds (image B) introduit un marqueur (vertex) uniquement dans les cas où une propriété d'un segment change. Par exemple, si la valeur du champ *polygone de gauche* change, un nouveau nœud devra être introduit.

1.4.2.1.2. POLYVRT (POLYgon conVeRTer)

Pour palier aux faiblesses du DIME, le modèle POLYVRT a été construit autour de la structure des chaînes/points (modèle non topologique 2D) (Peucker et Chrisman, 1975). Contrairement au DIME, la notion de nœuds est bien utilisée. Une chaîne est composée d'un nœud de départ et d'un nœud d'arrivée mais possède aussi de 1 à N vertex intermédiaires permettant de faire courber le segment à volonté. Ainsi, les polygones complexes sont définis avec un plus petit nombre d'enregistrements. La différence majeure par rapport au modèle par chaînes/points réside dans l'inscription explicite des polygones de gauche et de droite. Cette particularité permet de facilement déduire les relations de voisinage entre les différents polygones. La figure 1-15 montre le modèle conceptuel de données du POLYVRT.

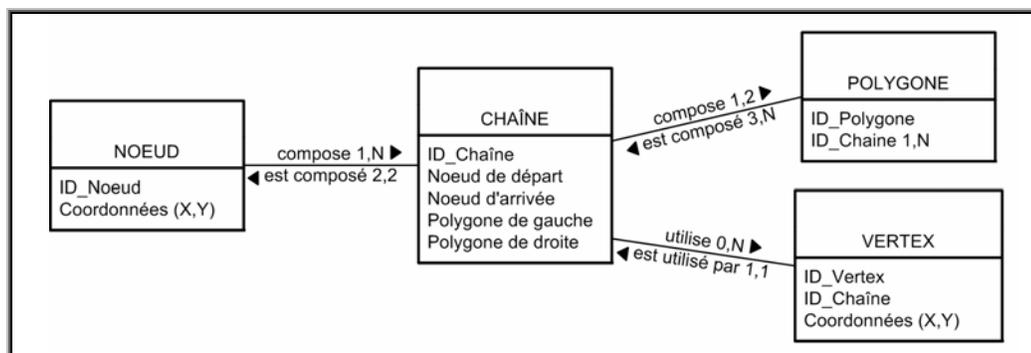


Figure 1-15 - Éléments constitutifs de la structure de données géométrique du POLYVRT

La table de *noeud* est composée des identifiants uniques et des coordonnées de chacun des nœuds. La table *polygone* enregistre les identifiants uniques des polygones et le numéro des chaînes qui les composent. La table *chaîne* stocke l'information concernant les relations entre les polygones voisins (*polygone de gauche* et *polygone de droite*) et la composition même des chaînes (*ID_Chaîne*, *noeud de départ*, *noeud d'arrivée*). Finalement, la table des points intermédiaires (vertex) permet de faire des cassures à l'intérieur d'une même chaîne. Ainsi, une plus grande flexibilité de représentation des chaînes est possible.

La présentation de ces quelques structures topologiques a montré que ces modèles sont relativement simples. Il est possible d'en déduire que la topologie en 2D n'est pas très complexe à stocker. La prochaine section démontrera que les structures topologiques sont beaucoup plus complexes à stocker lorsque la troisième dimension est ajoutée.

1.4.2.2. Structure topologique de données 3D

Plusieurs structures topologiques 3D ont été recensées : le 3D Formal Data Structure (3D FDS) (Molenaar, 1990), le TEtrahedral Network (TEN) (Pilouk, 1996), le Simplified Spatial Model (SSM) (Zlatanova, 2000), le Solid Object Management System (SOMAS) (Pfund, 2001), le Cell Tuple (Pigot, 1995), le Modèle Orienté-Objet (De La Losa, 2000), le Urban Data Model (UDM) (Coors, 2001) et le modèle Orienté-Objet 3D (Shi *et al.*, 2003). Ces modèles ont été développés dans des contextes et pour des buts bien différents. Cependant, le but ultime de chacun est de faciliter l'analyse topologique en 3D. Certains modèles ne sont que des adaptations d'un autre modèle dans le but de répondre à des besoins particuliers. Pour cette raison, uniquement les modèles 3D Formal Data Structure (3D FDS), Simplified Spatial Model (SSM) et TEtrahedral Network (TEN) seront présentés

puisqu'ils possèdent des caractéristiques très différentes et ils sont représentatifs de l'ensemble des modèles existants.

1.4.2.2.1. Formal Data Structure (3D FDS)

Les premières bases associées aux structures topologiques de données 3D ont été jetées par Molennar (1990). Le développement du 3D FDS avait comme objectif de créer une structure de données universelle. Ce concept est illustré à partir du modèle conceptuel de données de la figure 1-16.

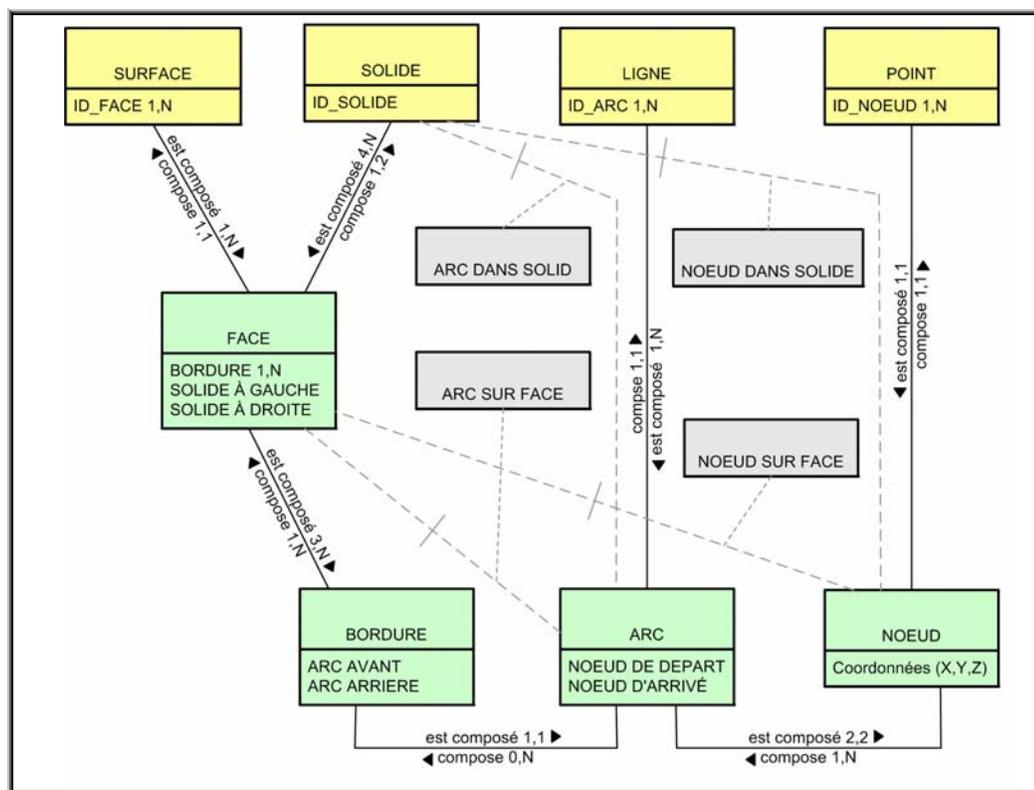


Figure 1-16 - Modèle conceptuel du 3D FDS (Formal Data Structure)

La figure 1-16 illustre un modèle construit à partir de trois types d'objets différents : les objets géométriques (en jaune), les primitives géométriques (en vert) et les singularités (en gris). Les singularités représentent des cas d'exception ne respectant pas la règle générale d'agrégation en objets du modèle. Par exemple, dans cette structure, il est impossible qu'un point se retrouve à l'intérieur d'un solide sans faire partie de ce solide. Pour respecter la règle, il faudrait partitionner le solide pour y inclure le point, ce qui entraîne de multiples traitements. Ainsi, en ajoutant les singularités, il est possible de contourner cette règle, ce

qui simplifie et accélère le processus de construction des objets. Ce modèle a pu être construit grâce à la définition des douze conventions qui sont présentées dans le tableau 1-1.

No	Description des conventions
3	Tous les points sont considérés comme des nœuds;
4	Les lignes sont constituées de plusieurs arcs reliés entre eux;
5	Pour chaque paire de noeuds, il y a, au plus, un (1) arc qui les relie. De plus, les noeuds peuvent être connectés par un ou plusieurs arcs;
6	Les arcs doivent posséder des noeuds de départ et d'arrivée différents;
7	Deux arcs ne peuvent se croiser. Cette situation devra être remplacée par quatre (4) arcs et un nœud;
8	Les faces doivent être planes;
9	Deux faces ne peuvent se croiser. Elles devront être remplacées par des faces avec un côté commun;
10	Les solides doivent être disjoints, c'est-à-dire séparés par une surface commune;
11	Une face ne peut faire partie de plus d'une surface;
12	Un arc ne peut croiser une face;

Tableau 1-1 - Dix des douze conventions régissant le modèle 3D FDS

Les conventions sont des règles qui servent à décrire le comportement des données et des différents objets du modèle. Le tableau 1-1 énonce les conventions qui régissent la structure de données du modèle conceptuel. Il faut remarquer l'absence des conventions 1 et 2. Ces dernières concernent uniquement l'aspect descriptif des données. Puisque le but principal de cette section est de décrire la façon de construire les objets géométriques, ces conventions ont été ignorées dans la description du modèle. Les paragraphes suivants établissent le lien entre le modèle conceptuel de données et les conventions.

Les relations entre les primitives géométriques sont en partie définies par les conventions 4 et 5. Ces dernières établissent la relation entre les nœuds et les arcs. Il est dit qu'un arc possède un nœud de départ et un nœud d'arrivée qui doivent être différents. Il s'agit alors d'une relation de 2 à N entre les tables *nœud* et *arc*. Pour définir la relation entre les faces et les arcs, il faut se baser sur le contexte particulier du modèle. Les objets étant dans un univers 3D, il est possible qu'un arc soit la limite de plusieurs faces, ce qui résulte en une relation de type N à N. Une relation N à N est indésirable dans un modèle conceptuel de données puisque cela introduit une certaine ambiguïté dans la relation entre les objets. Par exemple, dans le cas présenté, une face est constituée de plusieurs arcs et un arc peut appartenir à plusieurs faces. Ainsi, il est impossible de relier un arc à une seule face et il est

également impossible de relier une face à un seul arc. Dans ces conditions, il est difficile d'identifier des relations topologiques entre les objets. L'introduction d'un nouvel objet (bordure) permet d'éviter cette relation indésirable. La bordure a comme objectif d'identifier les arcs qui sont des frontières de faces. Une face est alors composée de 3 à N bordures et une bordure est reliée à un seul arc.

Les relations avec les objets géométriques sont définies, en partie, à l'aide des conventions 3, 4, 8, 10 et 11. La convention 3 établit un lien direct entre les points et les noeuds. Cela se traduit par une relation 1 à 1 entre la table *point* et la table *noeud*. La convention 4 indique que les arcs peuvent être reliés entre eux pour former une ligne. Une relation 1 à N naît de cette définition entre la table *arc* et la table *ligne*. Les conventions 8 et 11 établissent une relation 1 à N entre les faces et les surfaces en stipulant qu'une face ne peut appartenir qu'à une surface et qu'une surface peut être construite de plusieurs faces. La relation entre les faces et les solides est définie par la convention 10 ainsi que par le contexte particulier du modèle. La convention 10 indique que les solides doivent être disjoints et, par conséquent, délimités par une face. Cette convention a comme conséquence d'orienter fortement la définition des solides par les faces. Ainsi, ces dernières possèdent deux attributs qui représentent l'identifiant du solide qui se trouve à droite et celui qui se trouve à gauche. Ces attributs permettent de définir les contours d'un solide, comme le font les segments pour définir le contour d'un polygone dans un environnement 2D.

Les conventions 7, 9 et 12 montrent la façon de procéder pour faire la construction de certains objets. Ces règles sont illustrées à la figure 1-17.

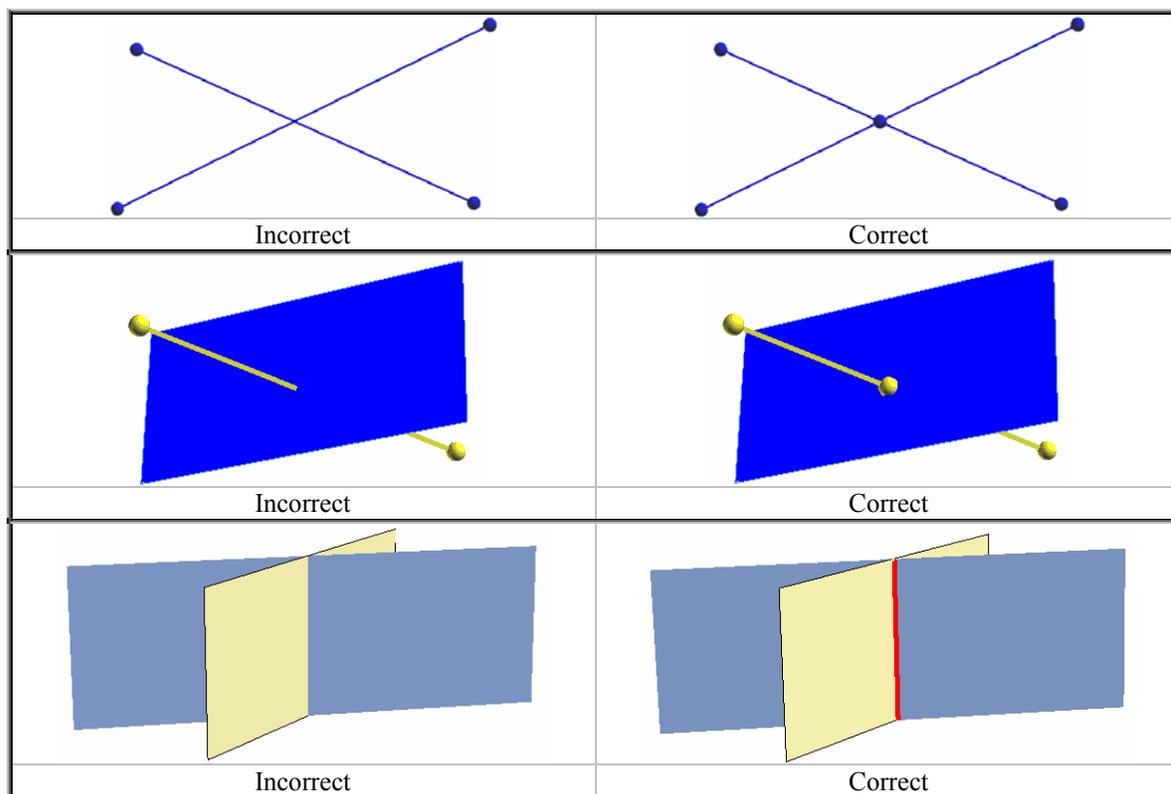


Figure 1-17 - Représentation graphique de cas d'intersection de primitives qui sont décrits par les conventions 7, 9 et 11 du 3D FDS

La convention 7 dit que lorsqu'il y a intersection entre deux segments, l'introduction d'un point à l'endroit de l'intersection est nécessaire. La convention 12 fait la même chose mais pour une ligne et une surface. Finalement, la convention 9 parle de l'intersection entre deux faces. Dans ce cas, les faces en question doivent être remplacées par deux faces ayant un côté commun. Il faut remarquer que ce n'est pas l'ensemble des cas qui sont décrits par ces conventions. Par exemple, le cas d'un point sur une face n'est pas discuté. Pour répondre à ces cas particuliers et pour les gérer, quatre singularités ont été introduites : *nœud sur face*, *arc sur face*, *nœud dans solide* et *arc dans solide*.

1.4.2.2.2. The Simplified Spatial Model (SSM)

Le *Simplified Spatial Model* (SSM) a été développé par Zlatanova (2000) dans le but de mettre sur pied un système permettant l'analyse spatiale des données 3D via un SIG sur le Web. Certaines contraintes au modèle sont introduites étant donné que l'affichage et les requêtes doivent être effectués via une interface Web. Ainsi, la structure de données

géométriques doit réduire au maximum la quantité de données enregistrées sans toutefois nuire à la rapidité d'affichage et d'analyse. Le modèle conceptuel initial du SSM (Zlatanova, 2000) présente certaines relations qui ne sont pas nécessaires dans le contexte de ce mémoire. Comme pour le 3D FDS, ces relations font référence uniquement à la sémantique des objets et ne compromettent pas la compréhension du modèle. Le modèle est présenté à la figure 1-18.

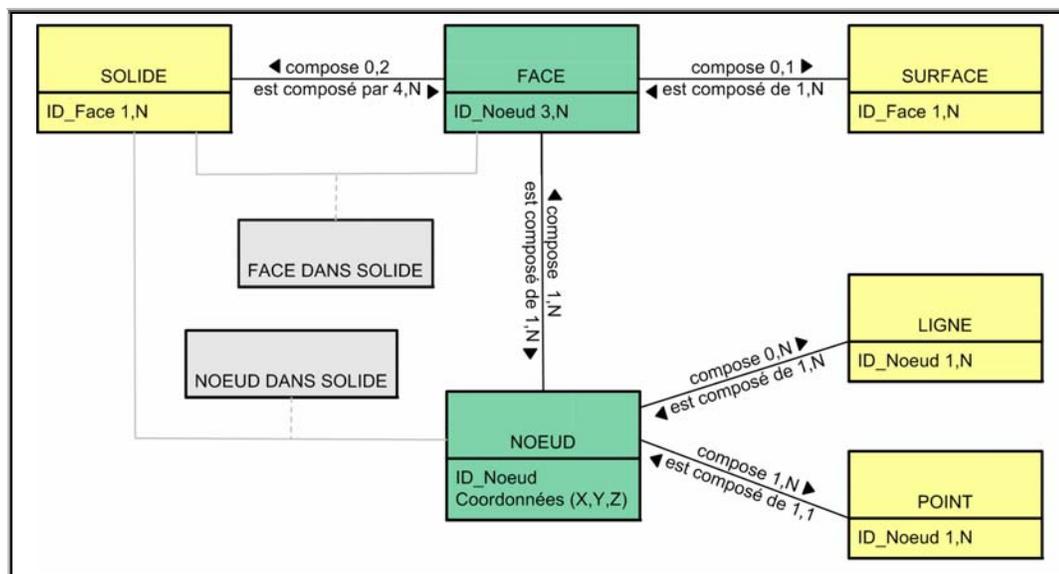


Figure 1-18 - Modèle conceptuel du Simplified Spatial Model (SSM)

La figure 1-18 est un modèle conceptuel simplifié du SSM qui se construit autour d'objets géométriques (en jaune), de primitives géométriques (en vert) et de singularités (en gris). Cette figure illustre bien le fait que les objets géométriques sont organisés autour de deux primitives géométriques : les faces et les nœuds. Comme pour le 3D FDS, ce modèle utilise des conventions qui le régissent (tableau 1-2).

No	Description des conventions
1	Deux nœuds sont toujours disjoints;
2	Deux nœuds sont connectés s'il y a une ligne droite qui les joint;
3	Une face est construite à partir d'une série de 3 à N nœuds;
4	Les intersections entre deux faces et entre une face et un nœud ne sont pas permises;
5	Un point est composé de nœuds;
6	Un nœud peut composer plusieurs points;
7	Une ligne est composée d'une série de nœuds et peut être formée de 2 à N nœuds. Une ligne est fermée si le nœud de départ rejoint le nœud de fin;
8	Une ligne est restreinte à exister uniquement en bordure d'une face ou librement dans l'espace. Si une face et une ligne se croisent, une subdivision doit être exécutée;
9	Une surface est composée de 1 à N faces;
10	L'intersection de surfaces est possible. Il est possible que deux faces égales fassent partie de deux surfaces différentes;
11	Un solide est composé de 4 à N faces;
12	L'intersection de solides est possible. Il est possible que deux faces égales fassent partie de deux solides différents;
13	Les nœuds et les faces sont permis à l'intérieur d'un solide;

Tableau 1-2 - Définitions des règles générales du modèle Simplified Spatial Model (SSM)

Les énoncés 1 à 5 portent plus particulièrement sur les primitives géométriques. Il est dit que les nœuds servent à la construction de points, de lignes et de faces. Les faces convexes et planaires sont les éléments de base des surfaces. Les définitions 6 à 13 concernent les objets géométriques et leurs liens avec leurs primitives. Les surfaces et les solides sont formés à partir de faces. Les points et les lignes sont construits à partir des nœuds. Les singularités *nœud sur face* et *face sur face* ne sont pas permises donc une subdivision devra avoir lieu dans ces cas précis. Cependant, les singularités *nœud dans solide* et *face dans solide* sont permises dans le but de maintenir la relation à *l'intérieur* sans avoir l'obligation de subdiviser les solides en parties non naturelles.

1.4.2.2.3. *TEtrahedral Network (TEN)*

Ce modèle a été introduit par Pilouk (1996) pour résoudre les difficultés rencontrées par le 3D FDS dans la modélisation d'objets ayant des frontières difficilement identifiables (formations géologiques, nuages, pollution, etc.) (Zlatanova, 2000). Le modèle conceptuel est présenté à la figure 1-19.

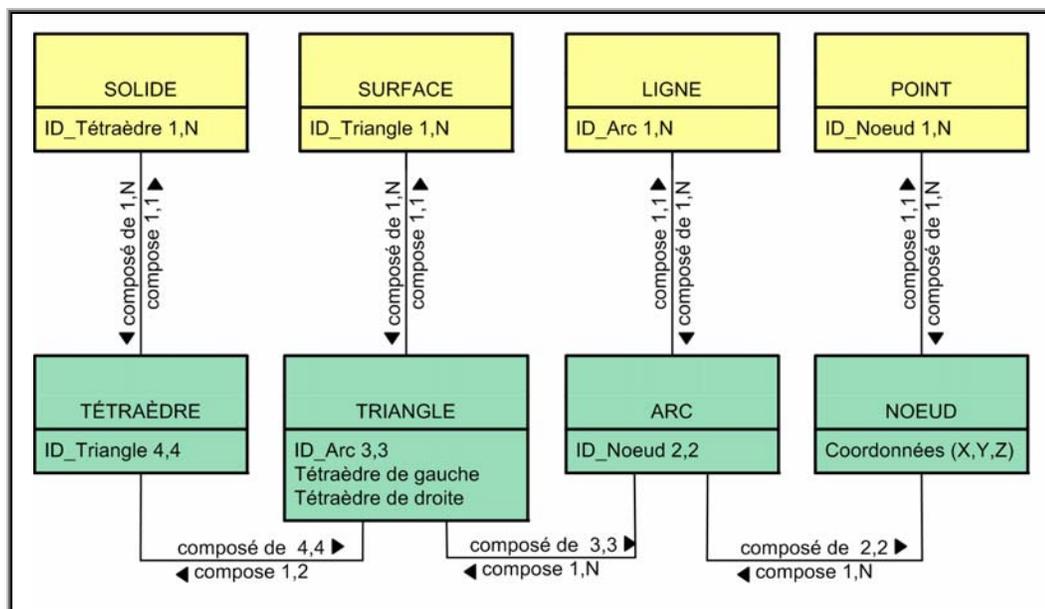


Figure 1-19 - Modèle conceptuel du modèle Tetrahedral Network (TEN)

Le modèle TEN possède quatre primitives (en vert) et quatre objets géométriques (en jaune). Comme il est possible de le voir dans le modèle conceptuel, un solide contient des tétraèdres, une surface de triangles, une ligne d'arcs et les points sont faits de nœuds. Le principe général du modèle TEN veut qu'une primitive géométrique soit un constituant d'une primitive géométrique de dimensions supérieures. Ainsi, tous les nœuds font partie d'arcs, tous les arcs sont des constituants des triangles et tous les triangles sont à la base des tétraèdres. Cela implique que l'ensemble de l'univers dans lequel le modèle est situé est subdivisé avec des primitives géométriques. Un objet géométrique est alors assemblé à partir d'un groupe de primitives géométriques. Il est possible de retrouver des primitives qui ne sont pas associées à un objet géométrique. De plus, cette façon particulière de construire des modèles élimine totalement la présence des singularités (*nœud sur face, arc sur face, nœud dans tétraèdre et arc dans tétraèdre*).

Le tableau 1-3 présente quatre règles permettant l'établissement d'un modèle TEN. Ces règles renseignent sur les relations de chacune des primitives avec les autres primitives et les objets géométriques.

No	Description des définitions
1	Un nœud possède des coordonnées X, Y et Z. Il est possible qu'un nœud fasse partie d'un point (objet géométrique).
2	Un arc est défini comme une ligne droite. Il est alors composé d'uniquement deux nœuds à chaque extrémité. Il se peut qu'un arc fasse partie d'un objet géométrique <i>ligne</i> .
3	Un triangle est composé de trois arcs. Il définit la frontière entre deux tétraèdres. Un triangle peut faire partie d'un objet géométrique <i>surface</i> .
4	Un tétraèdre fait partie d'un solide (objet géométrique).

Tableau 1-3 - Définitions des règles de construction du modèle TEtrahedral Network (TEN)

La première définition concerne les nœuds et indique que ces derniers possèdent trois coordonnées (X, Y et Z) et peuvent être, dans certain cas, reliés à un fichier de points. Le deuxième énoncé indique que les arcs sont linéaires et sont constitués d'un nœud à chacune des extrémités. Il est également mentionné qu'un arc peut faire partie d'une ligne. La troisième convention définit les relations des triangles en affirmant qu'ils sont construits à partir de trois arcs et qu'ils représentent la frontière entre deux tétraèdres. De plus, il est indiqué qu'un triangle peut faire partie d'une surface. Finalement, la dernière définition dit que les tétraèdres ne sont reliés à aucune primitive géométrique de dimensions supérieures et qu'ils doivent assurément faire partie d'un solide.

Ces structures topologiques de données ont été élaborées dans le but précis de déterminer les relations de voisinage entre différents éléments d'un modèle. La section suivante a pour but de montrer les mécanismes qui permettent de formaliser les relations topologiques.

1.5. Modèles formalisant les relations topologiques

Pour mieux comprendre ce que sont les relations topologiques, la figure 1-20 présente quelques exemples simples pour un environnement 2D.

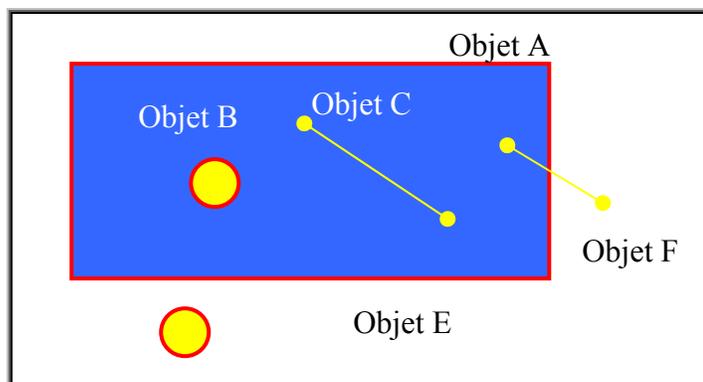


Figure 1-20 - Exemples de relations topologiques entre différents objets.

La figure 1-20 montre que l'objet A *inclut* l'objet B tandis que s'il y a inversion de l'ordre des objets, l'objet B *est inclus* à l'intérieur de l'objet A. Deux autres relations topologiques sont présentes dans cette figure : la relation *se chevauche* entre les objets A et F ainsi que la relation *disjoint* entre les objets A et E. Il faut comprendre que les relations topologiques ont un sens, c'est-à-dire que la relation n'est pas la même s'il y a inversion du premier et du deuxième objet.

Il existe plusieurs façons de déterminer les relations topologiques entre deux objets. Au cours des quinze dernières années, certaines propositions ont été faites : le modèle des quatre intersections (Pullar et Egenhofer, 1988), le modèle des neuf intersections (Egenhofer et Herring, 1990) et le Dimension Extend Method (Clementini *et al.*, 1993).

Ces modèles, tout dépendant de leur fonctionnement, sont en mesure de détecter un nombre limité de relations entre deux objets, les *cas possibles*. Par contre, le nombre de dimensions des objets, le nombre de dimensions de l'univers et le type de frontières (connectées ou déconnectées) sont des facteurs qui limitent le nombre de relations indépendamment du modèle utilisé. Ainsi, il faut introduire les concepts de *cas impossibles* et de *cas réels*. Le nombre de *cas réels* est obtenu en soustrayant le nombre de *cas impossibles* au nombre de *cas possibles*.

Certains exemples particuliers permettent de démontrer ces faits, comme la dimension des objets. Par exemple, sur l'image A de la figure 1-21, il y a superposition partielle entre deux polygones (relation entre deux objets 2D). Par contre, l'image B illustre qu'il est impossible pour un point de répéter ce genre de comportement (relation entre un objet 0D

et un objet 2D). Cet exemple montre bien que la variation de la dimension des objets joue un rôle sur le nombre de *cas réels*.

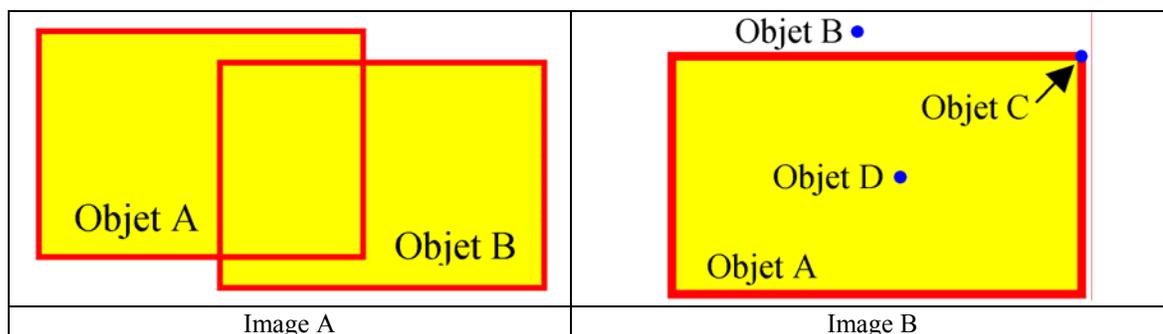


Figure 1-21 - Les *cas réels* varient en fonction de la dimension des objets. L'image A montre la superposition de deux surfaces dans un univers 2D. L'image B montre que peu importe l'endroit où est situé le point (objet 0D), il est impossible de créer une superposition entre une surface et un point.

De même, le nombre de dimensions d'un univers influencera la quantité de *cas réels*. Comme l'image A de la figure 1-22 le montre, dans un environnement à deux dimensions, il est impossible que deux surfaces puissent se croiser sans avoir une zone de superposition. Par contre, dans un environnement 3D, cette relation est possible comme l'illustre l'image B de la figure 1-22.

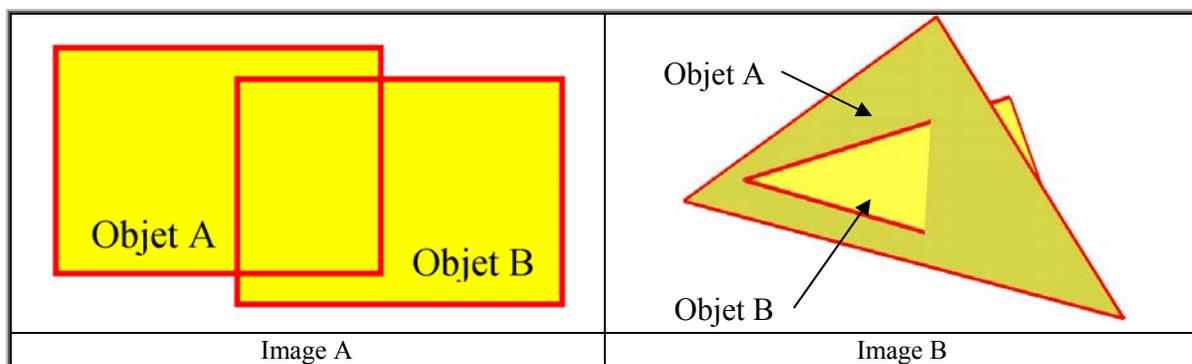


Figure 1-22 – Les *cas réels* varient en fonction de la dimension de l'univers. L'image A montre deux surfaces dans un univers 2D. L'intersection entre ces deux objets implique également une superposition. L'image B met également en scène deux surfaces mais, dans un univers 3D. Dans ce cas, l'intersection n'est pas accompagnée d'une superposition.

Le type de frontières est le troisième facteur qui influence le nombre de relations possibles entre des objets. Une frontière connectée indique que pour toucher à l'intérieur d'un objet, il faut absolument traverser la frontière. Par contre, l'intérieur d'un objet ayant une frontière déconnectée peut être atteint sans passer par la frontière. Cette caractéristique influence le nombre de *cas réels* dans la mesure où le modèle se base sur l'intersection

entre les différentes parties des objets (intérieur, extérieur et frontière) pour déterminer le nombre de *cas possibles*. La figure 1-23 montre des objets ayant une frontière connectée (polygone) et une frontière déconnectée (ligne).

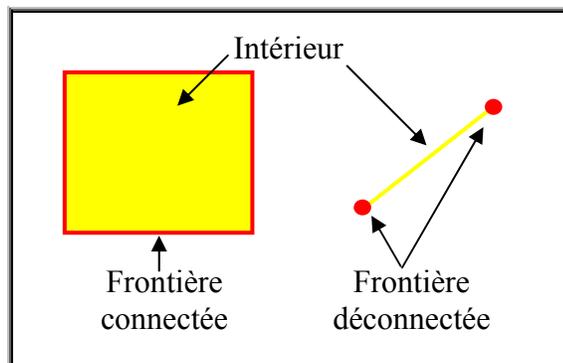


Figure 1-23 - Exemple d'objets ayant une frontière connectée ou déconnectée.

Toutes ces contraintes réduiront le nombre de relations topologiques possibles et entraîneront des *cas impossibles*. Voici maintenant la description du fonctionnement des trois modèles. Il est à noter que les explications seront effectuées à l'aide d'objets en 2D.

1.5.1. Modèle des quatre intersections (4I)

Le modèle des quatre intersections a été développé par Pullar et Egenhofer (1988). Il est basé sur la détection des intersections (\cap) entre deux objets (A et B) et deux parties des objets : l'intérieur (A°) et la frontière (∂A). L'intersection peut être vide (\emptyset) ou non vide ($\neq \emptyset$). Deux parties de deux objets différents permettent de former quatre intersections à l'intérieur d'une matrice 2×2 . La figure 1-24 présente une relation topologique et son interprétation sous forme matricielle. Il y a contact entre les frontières des deux objets et les intérieurs des deux objets. Cela se traduit par une valeur non vide aux positions (1,1) et (2,2) de la matrice. De plus, les deux frontières entrent en contact avec les intérieurs des objets. Ici encore, les positions (1,2) et (2,1) ont comme valeurs $\neq \emptyset$.

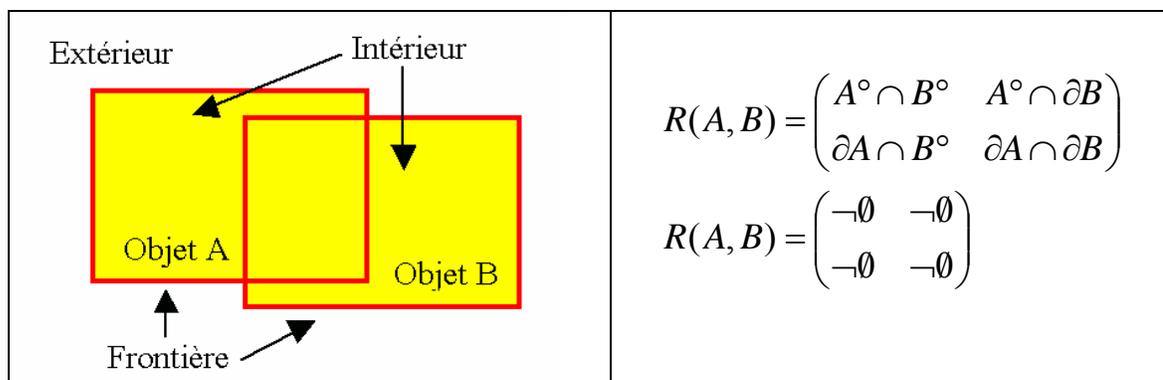


Figure 1-24 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle des quatre intersections et représentation de la relation en 2D.

Puisque cette matrice comporte quatre éléments et que chacun de ces éléments peut avoir deux états (vide ou non vide), le nombre de « cas possibles » est de 2^4 , soit 16. Le tableau 1-4 fait un décompte des *cas possibles* et des *cas réels* pour le modèle des quatre intersections dans un environnement 2D. Ce tableau présente une liste de toutes les combinaisons possibles entre les trois différents types d'objets présents dans un environnement 2D (point, ligne et polygone).

Groupes de relations	Cas possibles	Cas réels
POLYGONE / POLYGONE	8	6
LIGNE / POLYGONE	11	11
POINT / POLYGONE	3	3
LIGNE / LIGNE	16	12
POINT / LIGNE	3	3
POINT / POINT	2	2
Total	43	37

Tableau 1-4 - Nombre de cas possibles et cas réels pour le modèle des quatre intersections dans un environnement 2D.

Le nombre de *cas possibles* est comptabilisé en ne considérant pas les cas inverses, c'est à dire les cas pour lesquels l'ordre des objets est inversé. Par exemple, la frontière de la surface A croise la frontière de la surface B signifie également que la frontière de la surface B croise la frontière de la surface A.

1.5.2. Modèle des neuf intersections (9I)

Le modèle des neuf intersections (Egenhofer et Herring, 1990) est une extension du modèle des quatre intersections. L'extérieur (A^-) a été ajouté aux deux éléments du modèle

précédent, soient l'intérieur (A°) et la frontière (∂A). Ce modèle forme une matrice 3X3, produisant ainsi neuf intersections différentes. La figure 1-25 montre un exemple de l'utilisation du modèle des neuf intersections. Il est possible de voir deux objets qui ne sont pas en contact sauf par le biais de leurs extérieurs. Ainsi, les positions (1, 3) (2,3) (3,1) (3,2) et (3,3) de la matrice sont non vides puisqu'elles sont directement reliées à l'extérieur d'un objet. Par contre, les positions (1,1), (2,1), (1,2) et (2,2) sont vides puisque les intérieurs et frontières des objets ne se touchent pas.

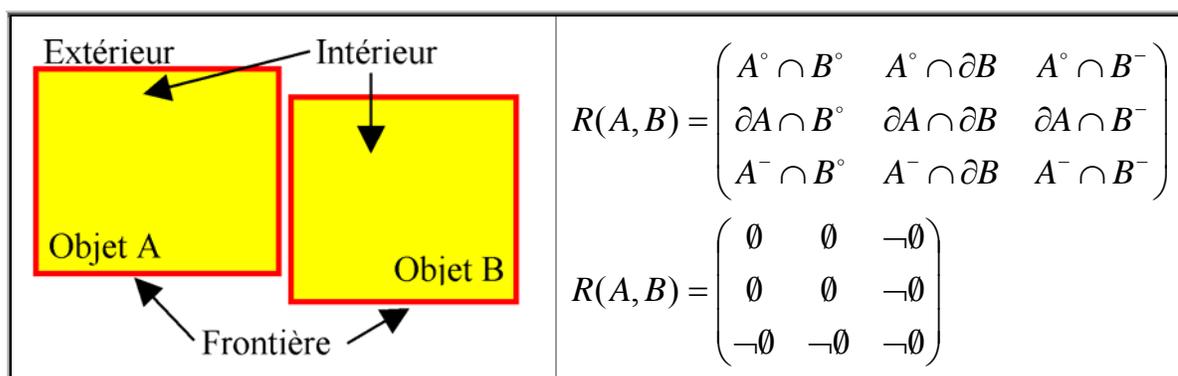


Figure 1-25 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle des neufs intersections (9I) et représentation de la relation.

Les *cas possibles* sont plus nombreux puisqu'ils forment 2^9 relations (512 cas). Le tableau 1-5 présente les *cas possibles* et les *cas réels* pour le modèle des neuf intersections.

Groupes de relations	Cas possibles	Cas réels
POLYGONE / POLYGONE	8	6
LIGNE / POLYGONE	19	19
POINT / POLYGONE	3	3
LIGNE / LIGNE	33	23
POINT / LIGNE	3	3
POINT / POINT	2	2
Total	68	56

Tableau 1-5 - Tableau des cas possibles et des cas réels pour le modèle des neuf intersections

1.5.3. Dimension Extend Method (DEM)

La Dimension Extend Method (DEM) peut être considérée comme une extension du modèle des quatre intersections (Clementini *et al.*, 1993). Les intersections (\cap) entre l'intérieur (A°) et la frontière (∂A) des objets sont encore représentées par une matrice 2X2 mais plusieurs notations sont possibles pour les identifier. Il y a quatre notations possibles :

s'il y a absence d'intersection (-), si l'intersection résultante est un point (0), si l'intersection résultante est une ligne (1) et finalement, si l'intersection est une surface (2). La figure 1-26 montre un exemple de la façon de fonctionner du DEM pour identifier des relations topologiques. La position (1,1) dans la matrice représente l'intersection entre les deux frontières des objets. Cette intersection est représentable par un point, ce qui signifie que le résultat dans la matrice est 0. Les positions (1,2) et (2,1) désignent l'intersection entre la frontière et l'intérieur des deux objets. Le résultat correspond à une ligne, ce qui doit être noté par le chiffre 1. Finalement, la valeur inscrite à la position (2,2) est le chiffre 2 puisqu'il est possible de former une surface à partir de l'intersection de l'intérieur des deux objets.

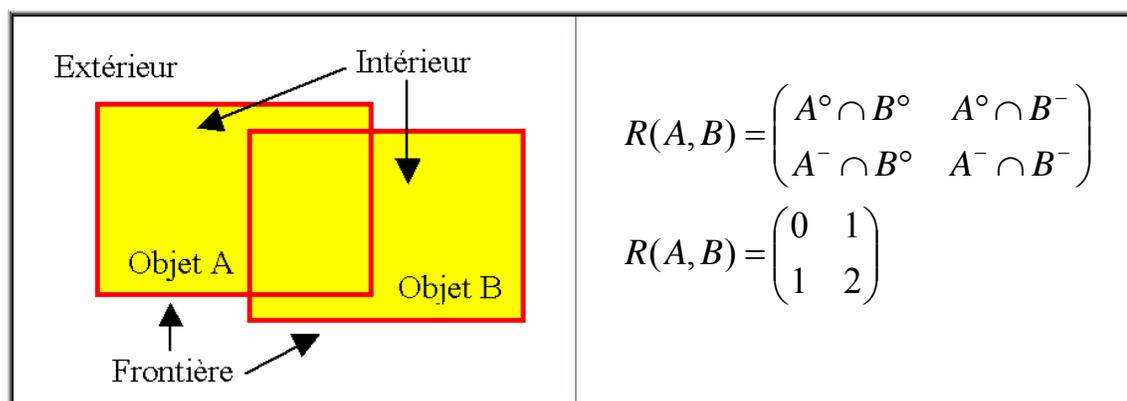


Figure 1-26 - Matrice d'identification des relations topologiques du modèle DEM et représentation de la relation.

Pour ce type de modèle, le nombre de *cas possibles* est beaucoup plus grand puisque la matrice est composée de quatre variables qui peuvent avoir quatre résultats différents : 4^4 donc 256 cas. Le nombre de cas possibles augmente (tableau 1-6) significativement par rapport au modèle des quatre intersections.

Groupes de relations	Cas possibles	Cas réels
POLYGONE / POLYGONE	12	9
LIGNE / POLYGONE	17	17
POINT / POLYGONE	3	3
LIGNE / LIGNE	24	18
POINT / LIGNE	3	3
POINT / POINT	2	2
Total	61	52

Tableau 1-6 - Tableau des cas possibles et des cas réels pour le modèle DEM

Le tableau précédent montre que, pour le DEM, il existe 52 *cas réels* alors que le modèle 4I (tableau 1-4) n'en trouvait que 37.

1.6. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a couvert l'ensemble des notions qui sont considérées importantes pour la bonne compréhension de ce mémoire. La première section a débuté le chapitre avec le mandat d'éclaircir les concepts entourant la troisième dimension. Les notions de dimensions, d'objets et d'univers ont été discutées. Finalement, il a été convenu que la meilleure définition générale du 3D est celle présentée par Kennedy (2001)). Cette dernière mentionne qu'il y a présence de 3D lorsque les objets sont à l'intérieur d'un univers à trois dimensions indépendamment de la dimension des objets. La deuxième section a présenté trois méthodes pour faire la représentation d'objets en 3D. Les modèles par balayage, volumiques et par frontières sont les trois techniques utilisées pour représenter des objets qui ont une hauteur, une largeur et une profondeur. Les différents types de systèmes informatiques ont également été décrits. Il a été possible de mieux comprendre la nature des logiciels de visualisation scientifique, de réalité virtuelle, de SIG et des CAO. La section 1.3 avait pour but d'étudier l'analyse spatiale. La section suivante a montré différentes structures de données géométriques. La première partie présentait des modèles 2D et 3D qui sont non topologiques et la deuxième partie a fait le même exercice pour des modèles topologiques. Finalement, la dernière section présentait quatre différents modèles conçus pour identifier les relations spatiales.

Maintenant que ces concepts ont été présentés et mieux compris, il faut les appliquer à la problématique du projet de recherche. Pour ce faire, le chapitre suivant présente une évaluation des différents logiciels de modélisation 3D.

Chapitre 2. Analyse de la performance des systèmes informatiques pour la modélisation géologique

Ce chapitre a pour but d'identifier le logiciel qui est le plus efficace pour la construction et la manipulation de modèles géologiques 3D. Différentes solutions ont été testées et analysées en profondeur. L'évaluation a été faite selon trois fonctionnalités : l'acquisition, la modélisation et l'analyse spatiale. Pour réaliser cette évaluation, chaque logiciel devait être apte à construire une partie d'un modèle 3D.

2.1. Sélection des logiciels à comparer et descriptions des données tests

Avant d'entreprendre cette analyse, une présélection des logiciels géomatiques a été effectuée afin de réduire l'ampleur du travail. Les outils comparés ont été choisis pour couvrir certains types de logiciels présentés à la section 1.2.4. Trois catégories de logiciels ont été évaluées : les SIG, les CAO et, évidemment, les outils de modélisation géologique⁸. Plusieurs logiciels SIG étaient disponibles pour l'évaluation, comme ArcGIS, Geomedia et MapInfo. Étant donné qu'ArcGIS est le logiciel le plus utilisé au Québec par les géologues et qu'il possède une extension 3D, ce dernier a été choisi pour représenter les logiciels SIG. Pour la sélection du logiciel CAO, deux solutions étaient envisagées : AutoCAD et MicroStation. Ces deux logiciels sont très répandus et grandement utilisés dans le domaine de la géomatique. Même si ce sont des logiciels CAO, ils ont été développés avec des buts différents. Premièrement, MicroStation est un logiciel qui est surtout utilisé pour réaliser de la représentation cartographique. Par exemple, les arpenteurs-géomètres l'utilisent beaucoup pour réaliser leurs travaux de mise en plan. À l'opposé, AutoCAD est mieux adapté pour la conception d'objets dans un environnement 3D. Ce dernier est surtout employé par des ingénieurs qui conçoivent des bâtiments ou des pièces mécaniques. De plus, AutoCAD est utilisé dans le domaine de la géologie minière pour la modélisation et la gestion des mines. Selon la thématique de cette recherche, nous avons jugé plus qu'il était

⁸ Un logiciel de modélisation géologique est une spécialisation d'un logiciel CAO. Ils possèdent une structure de données semblable mais le logiciel de modélisation géologique possède des fonctions qui sont spécifiques aux besoins de la géologie (acquisition de données géologiques, interpolation de surface, etc.).

plus pertinent d'examiner le logiciel AutoCAD plutôt que MicroStation. Le choix du logiciel de modélisation géologique s'est fait parmi trois différentes solutions: GEMCOM (www.gemcomsoftware.com) de la compagnie Gemcom Software International, EarthVision (www.dgi.com) de la compagnie Digital Graphics et Gocad (www.earthdecision.com) de la compagnie Earth Decision Sciences. GEMCOM est un logiciel utilisé pour effectuer de la gestion de mines. Or, le logiciel choisi doit pouvoir apporter une solution à des problèmes géologiques variés et d'ordre plus général. Les logiciels EarthVision et Gocad semblent être des outils ayant des caractéristiques comparables. Cependant, Gocad permet l'ajout de nouvelles fonctionnalités, contrairement à EarthVision. Dans le contexte de cette recherche, il faut considérer que la possibilité de développer des nouvelles extensions est un atout majeur. De plus, Gocad est le logiciel qui est le plus utilisé pour la modélisation géologique. Le choix s'est donc arrêté sur Gocad.

Pour arriver à modéliser efficacement, un logiciel doit comporter trois fonctionnalités particulières : l'acquisition de données, la construction d'objets 3D et l'analyse spatiale. Afin de mieux comparer la performance des logiciels pour effectuer une tâche de modélisation, un modèle restreint a été réalisé. Ce dernier a été construit à partir d'un modèle géologique de Massé (2003) de la région de Moose Mountain au cours du projet RES#LON (Long *et al.*, 2001) du Réseau de Centre d'Excellence GEOIDE. Le modèle restreint construit ici comprend une unité lithologique fracturée, la Formation de Turner Valley, qui correspond à un réservoir gazéifère fracturé. Plus la densité de fractures perméables est grande à l'intérieur de l'unité, plus son potentiel économique est élevé.

Pour réaliser le travail de comparaison, le modèle restreint a été construit à partir de certaines données disponibles : un modèle numérique de terrain (MNT), une carte géologique et une coupe géologique. Le modèle numérique de terrain est constitué d'un maillage régulier de points possédant des coordonnées X, Y et Z. À partir de ces points, il est possible de construire une surface qui représente la surface de la Terre de la région de Moose Mountain. La carte géologique a été construite à partir d'observations réalisées sur les affleurements rocheux. Elle montre les contacts entre les unités géologiques affleurant à la surface de la Terre. Ces contacts sont représentés par une série de lignes courbes qui ont été drapées sur le MNT. Les coupes géologiques sont des plans verticaux sur lesquels sont

représentés les contacts entre les unités géologiques sous la surface. Ces coupes ont été dérivées et interprétées à partir de la carte géologique. Toutes ces données ont été fournies dans un format très utilisé pour l'échange de données géométriques, soit le format .dxf conçu pour AutoCAD. Ces données sont présentées dans la figure 2-1.

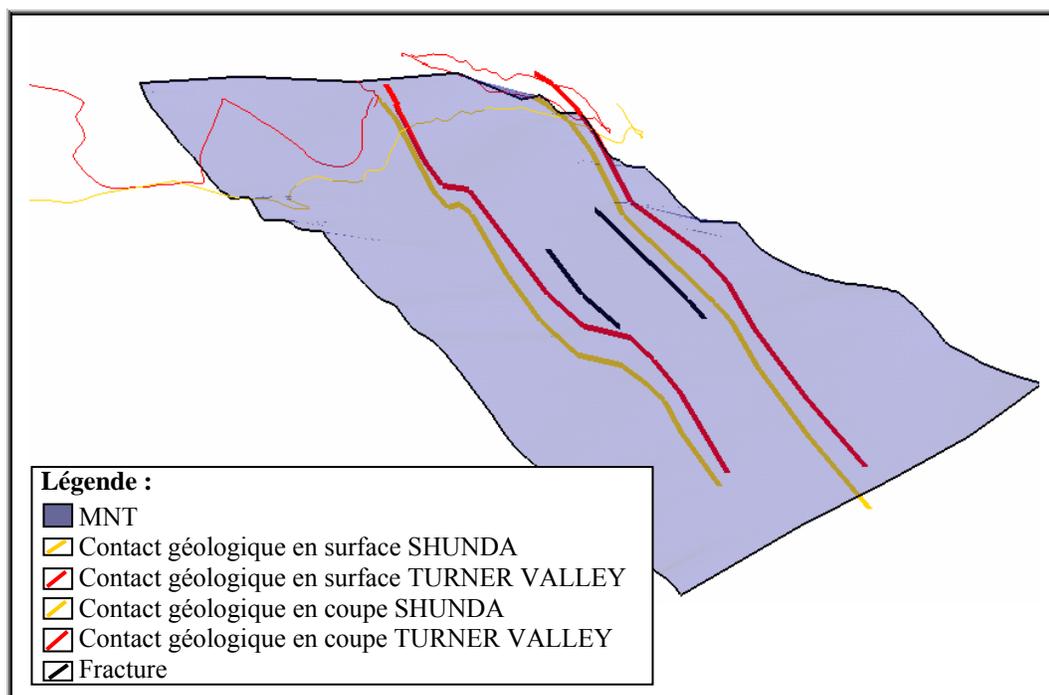


Figure 2-1 - Données fournies pour la création du modèle géologique de la Formation de Turner Valley

La figure précédente montre les trois types de données disponibles soit une fracture, des contacts géologiques et le relief. Le modèle numérique de terrain est représenté par une surface (en bleu). La carte géologique est constituée du contact en surface entre les unités géologiques de Shunda (en jaune) et de Turner Valley (en rouge). La répartition des affleurements rocheux en surface ne permet pas de connaître la géométrie des unités. Il est nécessaire d'obtenir de l'information supplémentaire pour arriver à construire un modèle qui représente de façon plus réaliste la géométrie 3D des unités géologiques du territoire. Par exemple, des données sismiques et des forages permettent d'obtenir plus d'informations concernant la position des objets en sous surface. Selon les procédures établies par Massé (2003), la construction du Modèle de Moose Mountain a été effectuée à partir des coupes géologiques. Puisque le but de l'exercice n'est pas de perfectionner les techniques d'interprétation géologique, des coupes géologiques schématiques ont été

construites et incorporées au modèle (en rouge et en jaune). Il faut noter la présence de lignes qui représentent les extrémités d'une fracture (en noir) située à l'intérieur de la Formation de Turner Valley. Il faut également spécifier que seul un secteur restreint de la région de Moose Mountain sera traité, soit le secteur situé entre les coupes géologiques illustrées à la figure 2-1.

2.2. Évaluation de la performance

2.2.1. Évaluation de la performance des logiciels pour l'acquisition des données

Pour qu'un logiciel soit performant pour l'acquisition de données dans un contexte de modélisation géologique, il doit permettre l'intégration de données multisources. Le contexte de la géologie est particulier puisqu'il existe très peu de normes pour les données spatiales ce qui est dû à la multitude de types de données (Mallet, 2002). Par exemple, les données géophysiques peuvent être des données sismiques, diagraphiques, gravimétriques, magnétiques, etc. Ce sont toutes des données physiques différentes, acquises par des systèmes différents et, par conséquent, sous des formats différents. En plus des données géophysiques, les géologues utilisent des images satellitaires, des MNT, des observations en affleurement (texte), des données géochimiques (analyse de composition des roches) et des données structurales planaires et linéaires (direction et pendage d'un plan d'une ligne). Ainsi, pour qu'un logiciel soit efficace, il doit permettre l'importation d'une multitude de formats qui contiennent de l'information géologique.

Le logiciel **AutoCAD** permet l'importation d'un nombre restreint de fichiers : 3D Studio, .dxb et .wmf. Le format .dxb est un fichier binaire produit par le logiciel AutoShade⁹. Pour leur part, les formats .wmf (Windows Metafile Format) correspondent à des fichiers utilisés pour enregistrer des images et du texte. Ils sont surtout utilisés pour appliquer des textures et des descriptions aux dessins. Il faut remarquer l'absence totale d'outils permettant l'importation de données à caractère géologique. Il a quand même été possible d'importer les données fournies pour la modélisation de l'unité de Turner Valley en format .dxf. Dans

⁹ AutoShade était un module utilisé anciennement par AutoCAD pour créer des rendus de ses plans 3D. Aujourd'hui, des fonctions sont directement intégrées au logiciel pour permettre ce genre d'opérations.

le cas d'un exercice de modélisation à partir de données géologiques réelles, l'importation de données aurait été beaucoup plus compliquée. Par exemple, il est impossible à partir d'AutoCAD de travailler avec des données brutes provenant d'un appareil sismique.

Le logiciel **ArcGIS** permet l'importation de différents formats de données : MicroStation (dgn), AutoCAD (dxf et dwg), MapInfo (mif), ArcInfo (Coverage et E00), etc. De plus, si le format recherché n'est pas directement lisible par ArcGIS, il est possible de télécharger, sur le site Web d'ESRI, une extension qui permettra l'importation de ce type de données. Les données fournies pour la modélisation de l'unité Turner Valley ont été importées sans embûches puisque le format .dxf est facilement lisible par ArcGIS. Comme pour AutoCAD, l'importation de données propres à la géologie aurait été beaucoup plus difficile à cause de l'absence totale d'outils qui permettent l'importation de données géologiques brutes (forage, sismique, etc.).

Le logiciel Gocad permet l'importation de plusieurs types de données de formats différents y compris les données spécifiques à la géologie. En plus de pouvoir importer des données provenant de certains logiciels CAO et SIG bien connus (MicroStation, AutoCAD, ArcInfo et ArcGIS), il est possible de lire des données typiquement géologiques. Par exemple, Gocad possède un outil qui permet la lecture des données provenant des logiciels de NORSAR qui sont adaptés pour la sismologie. Il va sans dire qu'il a été très facile d'importer les données pour la modélisation de la Formation de Turner Valley.

2.2.2. Évaluation de la performance des logiciels pour la construction et la visualisation d'objets 3D

La modélisation géologique est particulière, étant donné les formes irrégulières de ses objets. Pour réaliser bien construire un modèle géologique 3D, le logiciel doit être en mesure de créer des objets volumiques puisque c'est la meilleure façon de représenter des objets 3D. Ces objets volumiques devront représenter le plus exactement possible les formes irrégulières des objets géologiques. Finalement, des outils de visualisation efficaces sont nécessaires puisqu'ils permettent de faire une meilleure analyse visuelle et ainsi de construire un meilleur modèle. Trois caractéristiques sont donc essentielles aux logiciels

pour construire des modèles géologiques réalistes : la création d'objets volumiques, la possibilité de créer des formes irrégulières et la disponibilité d'outils de visualisation. Elles seront évaluées pour chacun des logiciels.

Deux facteurs limitent la création d'objets irréguliers en 3D avec le logiciel **ArcGIS**. Premièrement, les outils disponibles pour créer des objets dans les SIG ne permettent pas la construction de modèles complexes (modèles faits d'objets ayant des formes irrégulières). Les SIG sont rarement utilisés pour modéliser les données; ils sont plutôt des outils de visualisation et d'analyse. Régulièrement, les données utilisées dans les SIG proviennent de l'intégration de données modélisées avec d'autres logiciels. Deuxièmement, le logiciel ArcGIS a comme objectif de permettre une gestion des objets présents uniquement à la surface de la Terre. La principale application de l'extension 3D du logiciel est de réaliser des analyses de visibilité entre les différents éléments. Par exemple, à partir d'un modèle des bâtiments d'une ville, il est possible d'analyser l'impact de l'introduction d'un nouvel édifice dans un milieu urbain. Les capacités de visualisation du logiciel ArcGIS sont excellentes. Des fonctions qui permettent de varier la transparence, les couleurs et l'éclairage sont disponibles afin de faciliter la perception de l'utilisateur. Voyons comment se répercute ces limitations lorsque vient le temps d'effectuer de la modélisation 3D.

Le module ArcScene du logiciel ArcGIS rend possible la visualisation des données en 3D. Ce dernier permet la visualisation mais ne permet pas l'édition et la création de données. Ainsi, il est impossible de créer de nouvelles surfaces. La seule et unique façon de générer un nouvel objet à partir de ArcGIS est d'utiliser le module ArcMap. Cependant, ce dernier est limité à la création d'objets 2D (polygone). Afin de rendre la représentation 3D possible, il faut extruder les objets 2D.

Pour la construction du modèle de Turner Valley, supposons que la surface inférieure est déjà créée et que l'épaisseur de la formation est connue. Pour arriver à donner l'impression que la Formation de Turner Valley possède un volume, une série d'opérations doivent être réalisées. Premièrement, à l'aide du module ArcMap, il faut ajouter, dans la base de données, un champ qui contiendra la hauteur de l'extrusion, soit l'épaisseur de la formation. Par la suite, à l'aide du module ArcScene, il est possible d'afficher la surface

extrudée. Le résultat de la représentation 3D de la Formation Turner Valley est illustré à la figure 2-2.

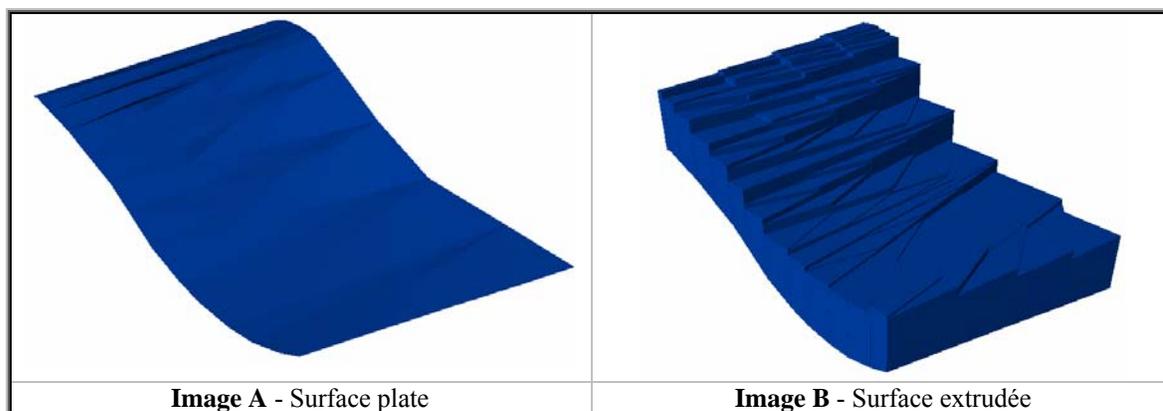


Figure 2-2 - Résultat de l'extrusion d'une surface avec le module ArcScene de ArcGIS

L'image A représente la surface inférieure de la Formation de Turner Valley importée et affichée dans le module ArcScene. L'image B montre la même surface qui a été extrudée d'une hauteur correspondant à l'épaisseur de la formation. Il faut spécifier que l'opération permettant d'extruder une surface ne crée pas un véritable objet 3D. Il s'agit uniquement d'un subterfuge qui permet d'afficher un objet qui semble être en trois dimensions mais qui n'existe pas véritablement. Pour réaliser entièrement la modélisation de la Formation de Turner Valley, il faut maintenant construire une fracture à l'intérieur du « volume » qui vient d'être créé. Puisqu'il est impossible de construire un nouvel objet dans ArcGIS, la seule façon de visualiser une surface en 3D à l'intérieur d'ArcGIS est de l'importer. La figure 2-3 illustre le résultat de l'importation de la surface représentant une fracture. Il est possible de voir la fracture (en rouge) à l'intérieur de la représentation de la surface extrudée (en beige).

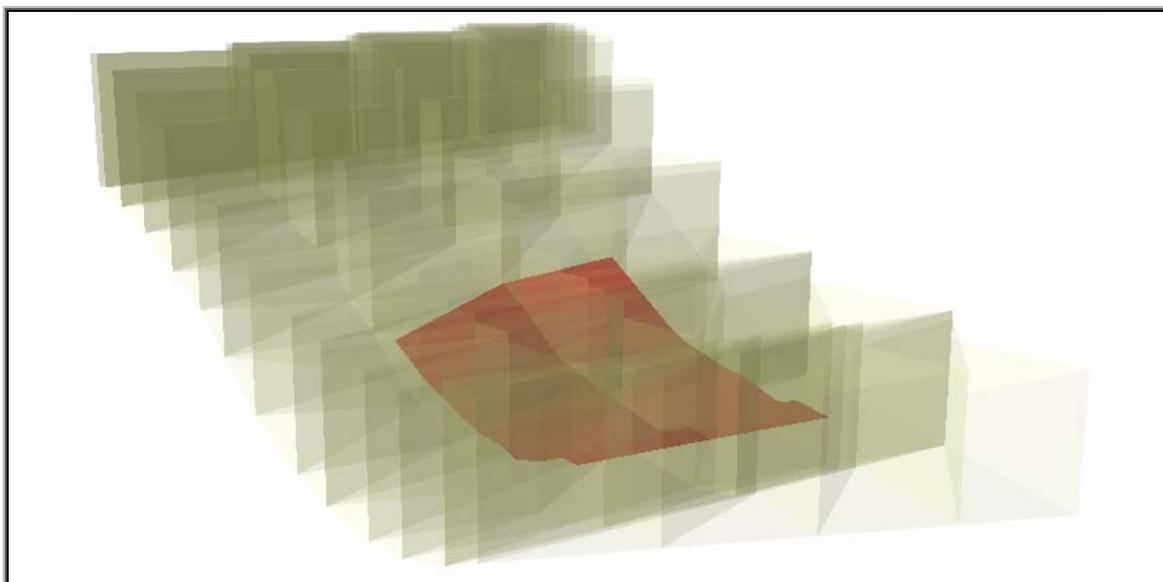


Figure 2-3 - Résultat de la modélisation d'une partie de la Formation de Turner Valley avec le module ArcScene de ArcGIS où la fracture (en rouge) est située à l'intérieur de la surface extrudée (en beige)

Pour résumer, l'absence d'outils de création d'objets 3D avec ArcGIS est très limitative pour les projets de modélisation géologique. Ce logiciel permet la visualisation d'objets en 3D à partir d'une extrusion d'objets 2D mais ne possède aucune fonction qui permet de créer des objets en 3D. Il devient donc totalement impossible de construire un modèle avec le logiciel ArcGIS.

Le logiciel **AutoCAD** offre trois façons de procéder pour créer des objets volumiques. La première est identique à celle utilisée par ArcGIS et consiste à extruder des polygones. Cependant, AutoCAD est plus performant puisque l'extrusion des surfaces est possible suivant différentes directions et selon des angles variables. La figure 2-4 donne un exemple des options possibles pour l'extrusion de surfaces avec AutoCAD.

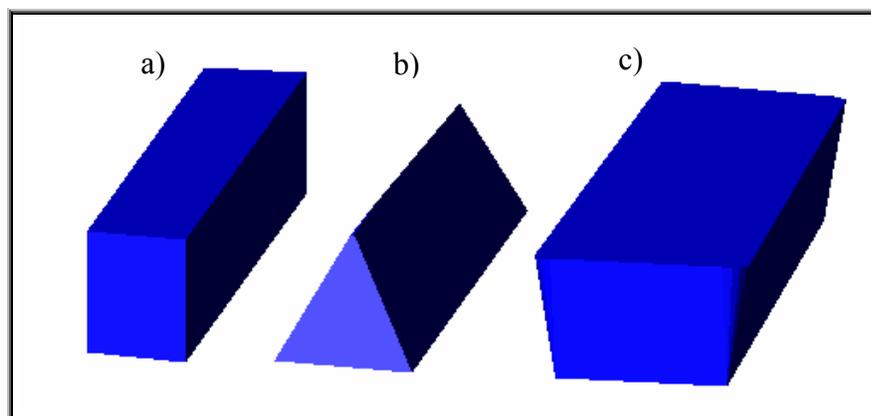


Figure 2-4 - Exemples d'extrusion de surfaces avec des angles différents : a) 0° , b) 30° et c) -10° .
AutoCAD 2004

La figure précédente montre trois solides créés par des extrusions d'une surface en utilisant des configurations différentes : a) 0° , b) 30° et c) -10° . Si un angle est positif, les côtés du volume se referment sur le centre. À l'opposé, si un angle est négatif, les côtés s'ouvrent vers l'extérieur. Pour pratiquer l'extrusion d'une surface, il faut utiliser les objets *solide 2D*. De plus, la surface doit obligatoirement être plane. Cette dernière contrainte est très restrictive pour la création d'objets géologiques. Cette option ne peut donc pas être envisagée pour créer des modèles géologiques.

La deuxième méthode pour créer des objets volumiques consiste à construire des formes régulières (cube, cylindre, cône, etc.) et y appliquer des opérations de type union, intersection et soustraction. Cette méthode correspond au modèle constructif de représentation volumique CSG présenté à la section 1.2.2. Des efforts considérables doivent être effectués pour arriver à modéliser un objet aux formes irrégulières à l'aide de formes régulières. Tel que mentionné précédemment, le CSG a été développé pour modéliser les objets de formes régulières comme des pièces mécaniques. Cette solution n'est pas bien adaptée à la réalité de la modélisation géologique.

La dernière méthode utilisée pour créer des objets volumiques consiste à créer plusieurs surfaces qui représentent un volume lorsqu'elles sont affichées ensemble. L'inconvénient de cette technique est que seules les surfaces existent vraiment; l'objet 3D n'est qu'un assemblage de ces surfaces. Cependant, cette façon de représenter les objets 3D est assez flexible et permet de représenter des formes aussi irrégulières que les objets géologiques.

De plus, la fonction *block* regroupe ces surfaces afin qu'elles soient considérées comme étant un seul objet. La figure 2-5 montre l'exemple d'un objet volumique irrégulier typiquement géologique et modélisé à l'aide de surfaces 3D réunies en *block*.

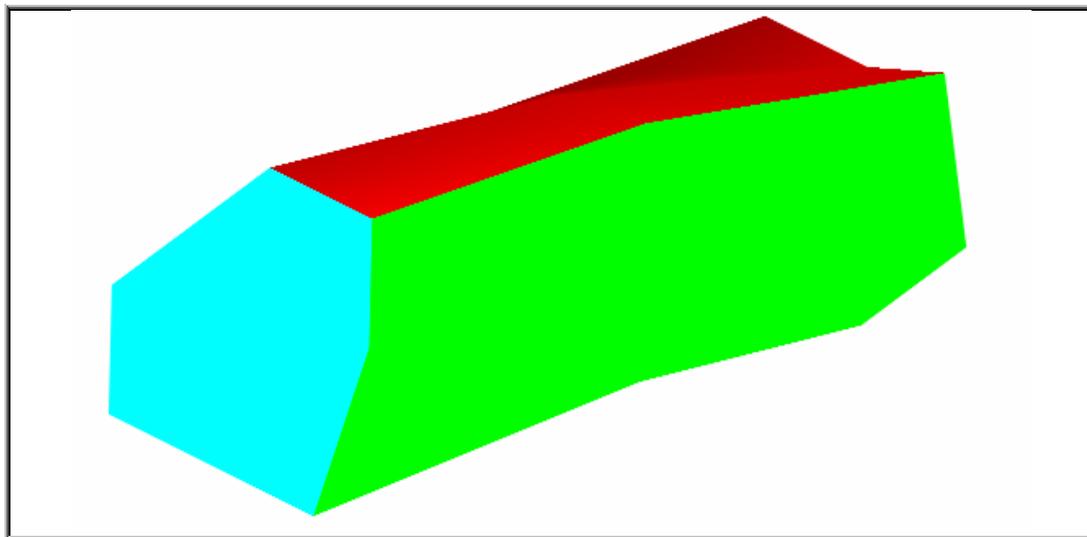


Figure 2-5 - Exemple de simulation d'objets 3D construits à partir d'un assemblage de quatre surfaces (Les surfaces bleue, verte et rouge sont visibles tandis que la surface jaune n'est pas visible de cet angle) AutoCAD 2004

Sur la figure 2-5, il est possible d'apercevoir uniquement trois faces de couleurs différentes puisque la quatrième surface, se trouvant à l'arrière, est cachée derrière les trois premières. Cet objet possède des formes qui sont suffisamment représentatives d'un objet géologique 3D. Il faut également mentionner que le logiciel AutoCAD offre plusieurs options pour la visualisation d'objets dans un environnement 3D, dont l'attribution de variables visuelles comme les couleurs, les textures, etc.

Les trois solutions qui ont été présentées pour créer des objets volumiques possèdent chacun des avantages et des inconvénients. Les deux premières méthodes (CSG et extrusion) permettent la création de volumes mais elles ne sont pas en mesure de bien représenter les formes irrégulières d'objets géologiques. Par contre, la création de surfaces en *block* permet de pallier cette lacune bien que ces *blocks* ne soient pas de véritables volumes, ce qui pose un problème pour la phase d'analyse. Par exemple, le logiciel AutoCAD ne permet pas de calculer le volume d'un solide représenté par des surfaces en *block*.

Malgré tout, la meilleure méthode pour modéliser un objet géologique avec AutoCAD est, sans contredit, la création de surfaces 3D réunies en *block*. Ainsi, cette technique a été utilisée pour modéliser la Formation de Turner Valley avec l'aide d'AutoCAD (figure 2-6).

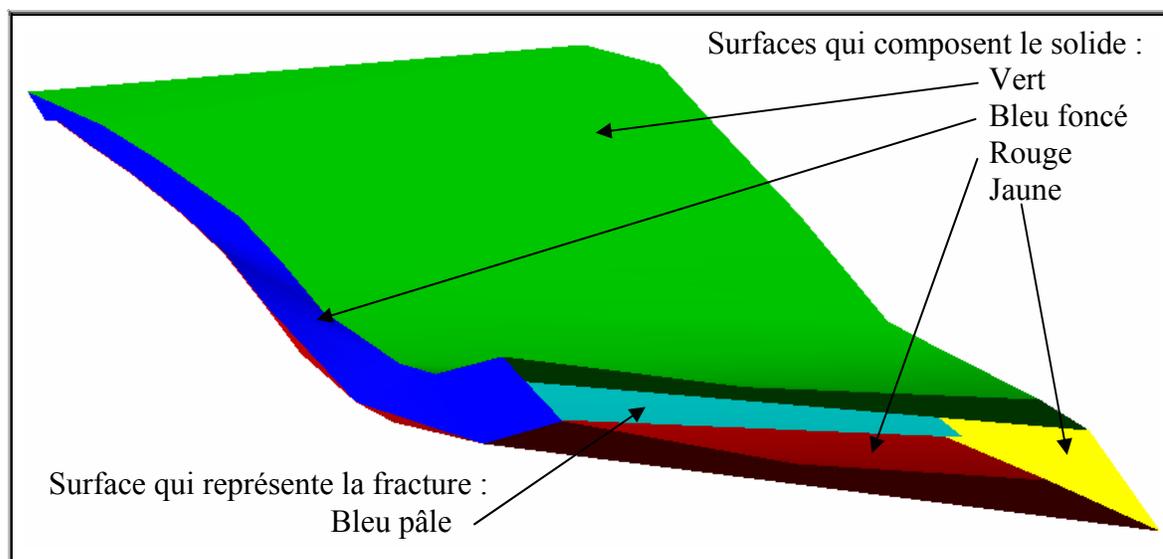


Figure 2-6 - Résultat de la modélisation de la Formation de Turner Valley avec AutoCAD 2004

La figure 2-6 illustre cinq surfaces de couleurs différentes (jaune, rouge, bleu foncé et vert) réunies ensemble pour construire la Formation Turner Valley en 3D. Cependant, les surfaces aux extrémités ne sont pas affichées pour permettre de voir la fracture qui se situe à l'intérieur des surfaces (bleu pâle). Ces objets ont été modélisés à partir des contacts supérieurs et inférieurs de la Formation de Turner Valley sur les coupes géologiques. Le processus pour construire ces objets est relativement simple. La première étape consiste à créer une surface 3D avec un nombre déterminé de nœuds et de déplacer les noeuds sur la coupe géologique. Les six surfaces doivent être construites avec cette méthode.

Le logiciel **Gocad** possède toutes les fonctions nécessaires pour effectuer une modélisation géologique efficace. C'est la principale raison qui en fait sa grande popularité auprès des compagnies minières et pétrolières. Ce logiciel réalise la construction d'objets 3D de deux manières différentes. Premièrement, le modèle des voxels est utilisé pour créer des objets 3D (image A de la figure 2-7). Le deuxième modèle utilisé est celui par représentation de frontières (image B de la figure 2-7). Il est peu utilisé par les géologues puisqu'il y a présentement un nombre restreint de fonctionnalités qui utilisent ce type d'objets.

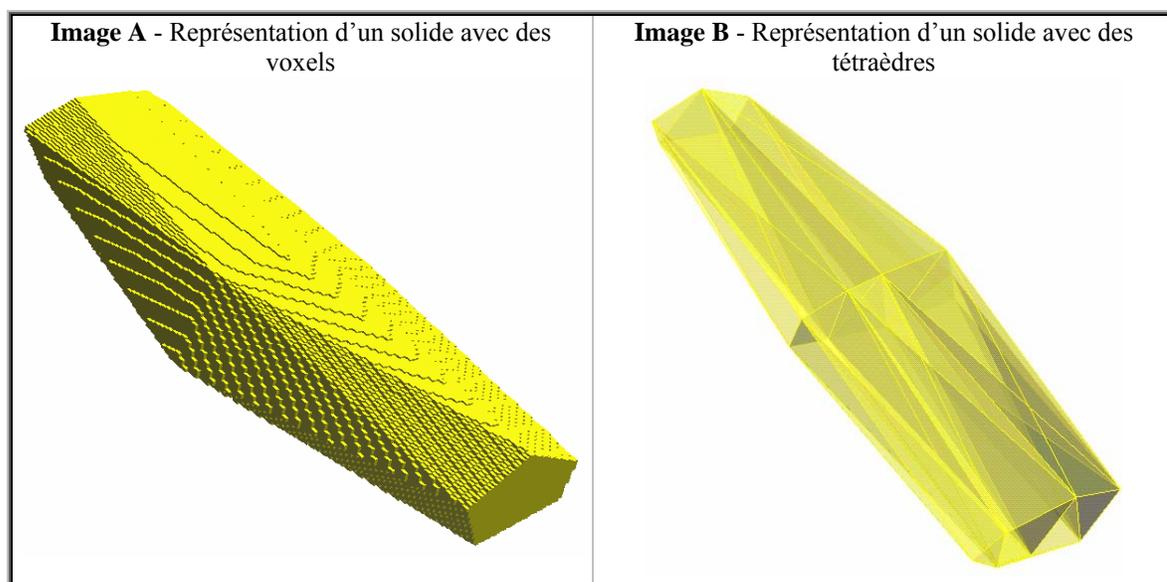


Figure 2-7 - Représentation volumique dans Gocad V. 2.0.8. : voxels (image A) et modèle par frontières (image B)

L'image A montre un exemple d'objets modélisés par des voxels. Ces derniers sont opaques, ce qui ne permet pas de visualiser l'intérieur des objets. L'image B montre le même objet construit à l'aide du modèle par frontières. Dans cet exemple, la transparence du solide rend possible la visualisation d'objets situés à l'intérieur de celui-ci. La construction du modèle est facilitée par la grande variété de fonctions d'affichage des objets. Il est possible d'attribuer des variables graphiques (couleur, texture, épaisseur, etc.) aux objets, aux frontières et aux noeuds.

Pour construire la Formation de Turner Valley à partir des coupes géologiques, une série d'opérations a été nécessaire. Premièrement, il fallait créer les surfaces supérieures et inférieures de l'unité. L'étape suivante consistait à transformer les deux surfaces en nuage de points puisque Gocad permet la création de solides uniquement à partir d'un groupe de points. Il est ainsi possible de créer le solide représentant une partie de la Formation de Turner Valley. De plus, la création de la fracture a été relativement aisée à réaliser. À l'aide des outils de numérisation, il est facile de créer et d'éditer de nouveaux objets. La figure 2-8 montre le résultat de la création du modèle avec Gocad.

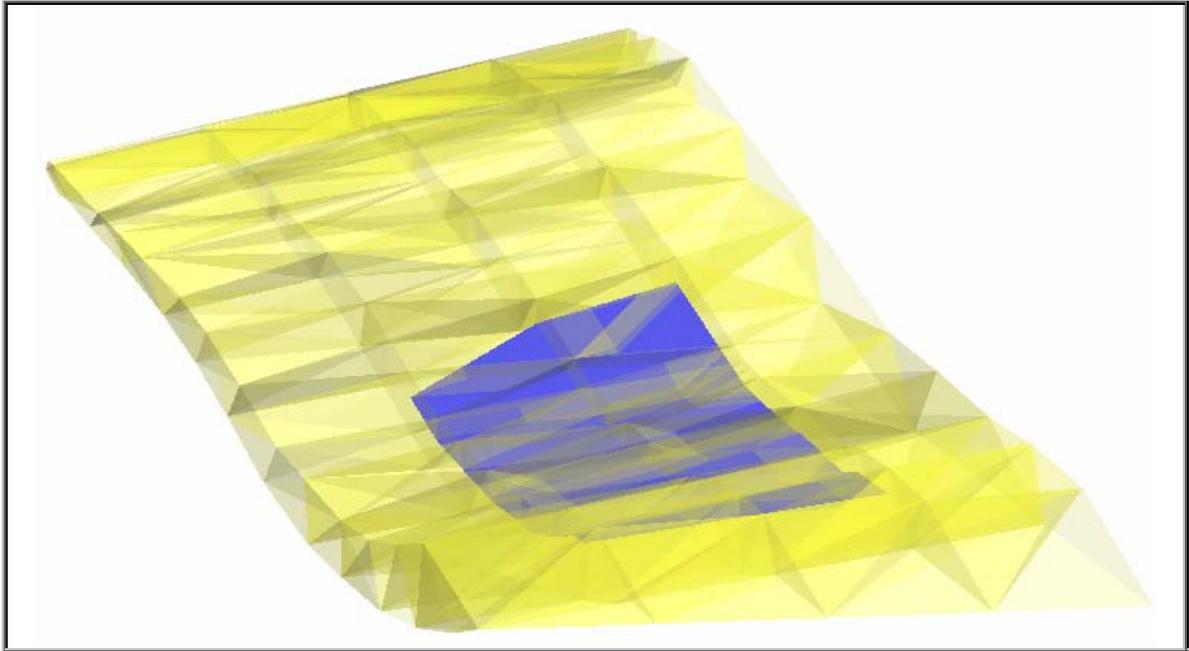


Figure 2-8 - Résultat de la modélisation d'une partie de la Formation de Turner Valley avec Gocad 2.0.8
La modélisation d'un objet géologique avec Gocad ne représente pas un grand défi puisque le logiciel est très bien adapté à cette réalité et offre des outils performants pour la conception de modèles.

2.2.3. Évaluation de la performance des logiciels pour l'analyse spatiale

Cette section vise à évaluer les performances des différents logiciels pour l'analyse spatiale. Deux aspects seront particulièrement explorés : l'analyse métrique et l'analyse topologique. Pour analyser le modèle du Turner Valley, une requête métrique et une requête topologique devaient être réalisées par chacun des logiciels. Pour l'aspect métrique, la requête devait donner l'information concernant le volume du solide modélisé. Du côté topologique, une requête avec l'opérateur *contient* devait informer l'utilisateur de la relation entre le solide, qui représente la Formation de Turner Valley, et la surface, qui représente la fracture à l'intérieur de la Formation.

Le logiciel **AutoCAD** possède des capacités restreintes pour ce qui est de l'analyse spatiale. Il dispose d'un petit nombre d'opérateurs d'analyse métrique simple, comme les calculs d'aire et de distance. Par contre, il n'est pas en mesure de décrire les relations topologiques entre les différents éléments d'un modèle. Le logiciel n'est tout simplement pas conçu pour

faire ce genre de travail. Évidemment, ce logiciel n'est pas plus en mesure d'effectuer l'analyse du modèle de la Formation du Turner Valley. Par contre, il serait possible de répondre à une requête métrique si l'unité avait été modélisée avec des solides. Cependant, comme il a été mentionné précédemment, ce type de modélisation ne permet la création de modèle géologique réaliste. La requête topologique est tout simplement impossible à réaliser avec les fonctionnalités d'AutoCAD. Étant donné le peu d'options disponibles, les capacités du logiciel AutoCAD en matière d'analyse spatiale sont insuffisantes pour les besoins de la géologie.

Le logiciel **ArcGIS** est très puissant pour effectuer de l'analyse spatiale et offre plusieurs possibilités autant pour l'analyse métrique que topologique. Les opérateurs métriques sont nombreux : mesure de distances, délimitation de corridors, identification d'objets situés à une certaine distance d'un autre objet, calcul d'aire, calcul de périmètre et longueur d'une ligne. ArcGIS permet également les requêtes topologiques. Ces opérateurs sont nombreux et offrent beaucoup de possibilités. Par exemple, les requêtes suivantes peuvent être réalisées: *est traversé par la frontière de, se croise, est complètement à l'intérieur de, contient complètement, a son centre dans, partage une frontière avec, touche la frontière de, est identique à, contient et est contenu*. Cependant, tous ces opérateurs métriques et topologiques ne sont utilisables que dans un environnement 2D. Pour le montrer, la figure 2-9 donne un exemple de l'utilisation de l'opérateur topologique *contient* dans un univers 3D.

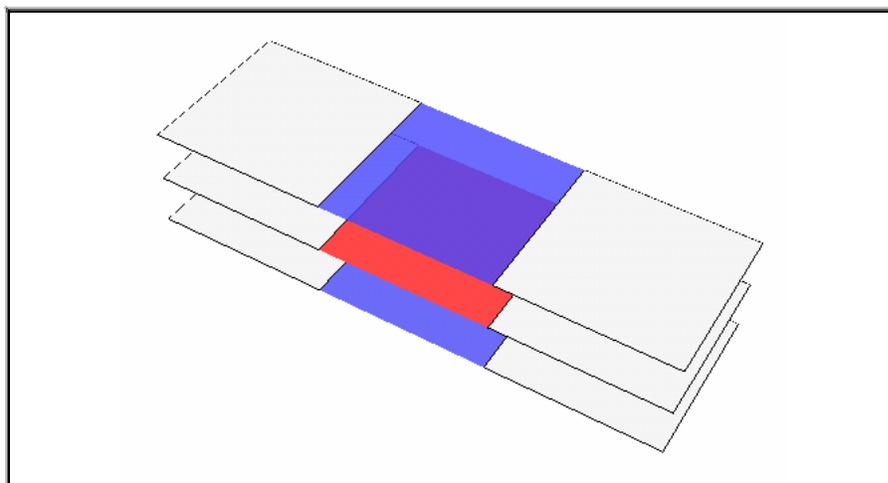


Figure 2-9 - Exemple d'analyse topologique avec l'opérateur *contient* de ArcGIS 8.1

L'image précédente montre plusieurs surfaces qui se superposent. Une requête a été effectuée afin d'identifier tous les objets qui sont contenus à l'intérieur de la surface en rouge. Cependant, le résultat obtenu identifie toutes les surfaces qui sont contenues (en bleu) indépendamment de l'altitude de celles-ci. Ainsi, il est évident que la troisième dimension n'est pas considérée pour les requêtes topologiques. Certains opérateurs, comme l'analyse de visibilité, ont été développés en considérant la troisième dimension. Par contre, ces opérateurs sont totalement inutiles dans le contexte de la géologie puisque ce sont des requêtes qui doivent être effectuées sur la surface de la Terre. Ces particularités font en sorte qu'ArcGIS n'est pas adéquat pour l'analyse spatiale dans un modèle géologique.

L'analyse du modèle de Turner Valley s'effectue par une requête métrique qui doit donner l'information concernant le volume du solide. Les opérateurs métriques d'ArcGIS sont incapables de calculer le volume d'une surface extrudée puisque l'objet ainsi créé n'existe tout simplement pas. La figure 2-10 montre la boîte de dialogue pour le calcul d'aire et de volume.

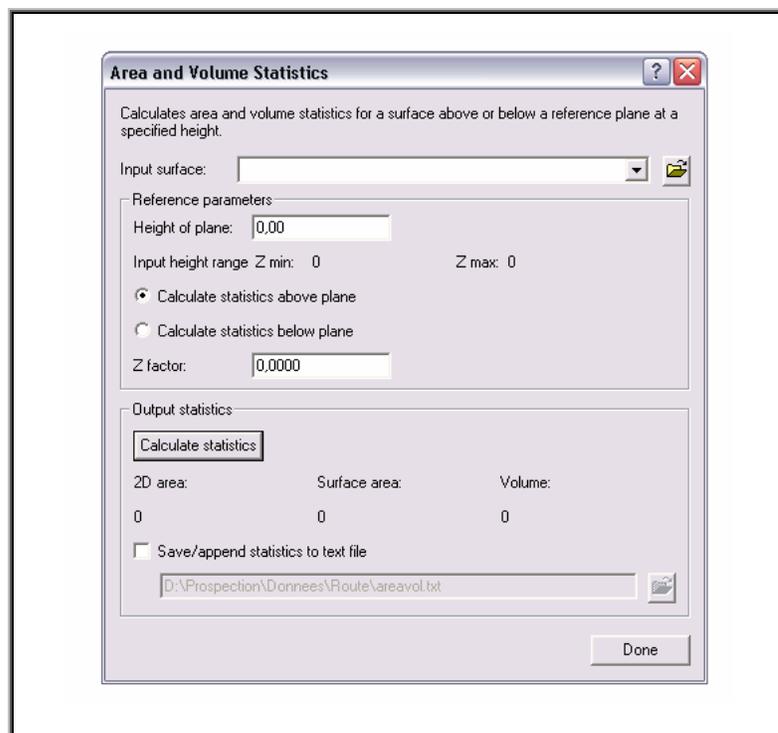


Figure 2-10 - Boîte de dialogue de la fonction de calcul d'aire et de volume ArcGIS V 8.1

Sur l'image précédente, le volume est calculé à partir d'une certaine hauteur vers une surface. Par exemple, si le paramètre *height of plane* est égale à 0, le volume sera calculé entre une surface de référence située à une hauteur de 0 et une autre surface définie par l'utilisateur. Pour la requête métrique dans ce modèle, il serait intéressant de connaître le volume entre les surfaces inférieure et supérieure de la Formation de Turner Valley. Cette opération ne pourra être effectuée car la surface de référence utilisée doit avoir une altitude constante et ce n'est pas le cas pour les surfaces géologiques comme celles de la Formation de Turner Valley. Cette façon de procéder ne convient donc pas pour calculer le volume d'une unité géologique.

La deuxième requête à effectuer dans le modèle visait à sélectionner la fracture contenue à l'intérieur de l'unité Turner Valley. Il y a plusieurs limitations importantes qui rendent impossible l'accomplissement de cette tâche. Puisqu'ArcGIS n'utilise pas d'objets 3D, l'accomplissement d'une requête de type *contient* entre une fracture et une unité est impossible. Deuxièmement, comme il a été mentionné précédemment, les requêtes topologiques sont toutes effectuées dans le plan XY. Supposons que cette requête est effectuée sur le modèle avec la surface inférieure de la Formation de Turner Valley comme

référence; l'opérateur *contient* indiquera que la fracture est à l'intérieur de la surface inférieure. De même, s'il y avait d'autres fractures en-dessous ou au-dessus de la surface inférieure, le logiciel indiquerait que ces surfaces sont toutes contenues à l'intérieur de la surface inférieure. Ces inconvénients démontrent bien que la réalisation des requêtes topologiques 3D est tout simplement impossible avec ArcGIS.

Finalement, pour ce qui est du logiciel **Gocad**, plusieurs opérateurs d'analyse métrique sont disponibles: *volume d'un solide*, *volume d'une partie d'un solide*, *aire d'une surface*, *périmètre d'une surface*, *longueur d'une ligne*, *longueur d'un segment de ligne*, *distance entre deux objets* et *identification des objets qui sont à l'intérieur d'une certaine distance d'un autre objet*. Ce grand nombre d'analyses métriques permet d'affirmer que Gocad est un logiciel bien outillé pour répondre à des requêtes spatiales métriques. Par exemple, la figure 2-11 illustre la façon de procéder pour arriver à connaître la valeur du volume du solide qui représente la Formation de Turner Valley.

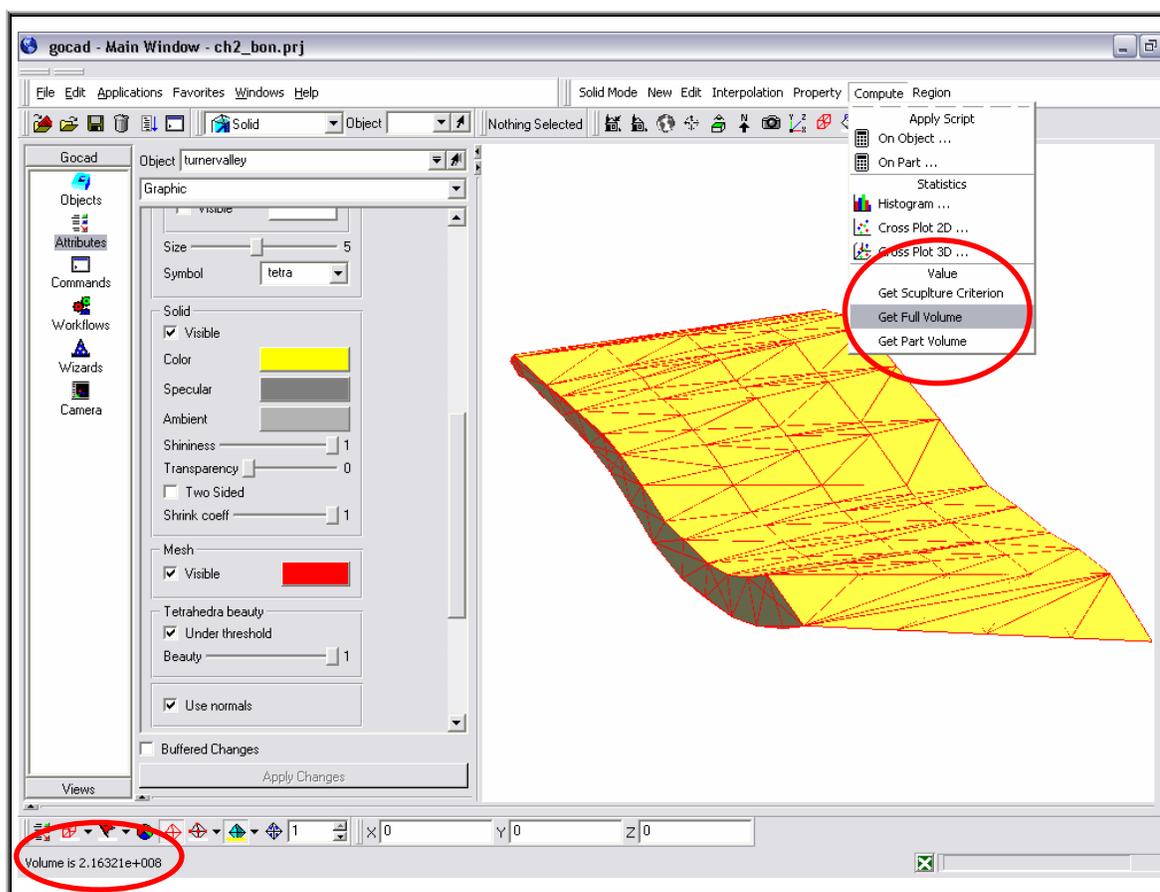


Figure 2-11 - Résultat du calcul de volume de la section de la Formation de Turner Valley et menu des opérations possibles sur solide Gocad 2.0.8

La figure précédente montre le menu des opérations qui sont disponibles pour analyser un solide. À partir de la fonction *Get Full Volume* du menu *Compute*, il a été possible d'obtenir le volume occupé par la Formation de Turner Valley. Le résultat de la requête est affiché en bas à gauche de l'écran Gocad, et indique $2,16321 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Le logiciel Gocad ne possède aucune fonction qui permet de répondre à des questions d'ordre topologique. Cependant, il existe un moyen détourné pour déterminer des relations topologiques entre des objets. Par exemple, avec le concept de propriété, il est possible d'attribuer une valeur à chacun des voxels d'un objet. Ces propriétés peuvent être calculées à partir de différentes fonctions. Ainsi, la distance euclidienne entre un voxel et une surface peut être calculée et enregistrée dans une propriété. Si pour deux objets d'un modèle géologique donné, aucune valeur de la distance euclidienne n'est égale à 0, cela signifie que les deux objets sont disjoints. Bien que cette façon détournée d'effectuer une requête

topologique permettre d'obtenir des résultats convenables dans certains cas, ce ne sont pas l'ensemble des relations topologiques qui peuvent être ainsi déduites et calculées. Par exemple, ce procédé ne permet pas de définir la relation *contient* entre une surface et une ligne. Une simple analyse de distance n'est pas en mesure de déduire cette relation. Ainsi, la capacité d'analyse topologique de Gocad est tout de même très limitée. Tentons maintenant de réaliser la requête topologique sur le modèle de la Formation de Turner Valley, c'est-à-dire de déterminer la relation *contient* entre la Formation de Turner Valley et la fracture. Aucun opérateur n'est disponible dans Gocad pour indiquer explicitement une telle relation topologique. Le seul moyen de déterminer si la Formation de Turner Valley contient la fracture est d'effectuer une analyse visuelle.

2.3. Discussion et conclusion du chapitre

Les essais d'acquisition, de construction d'objets 3D et d'analyse effectués dans ce chapitre permettent de résumer les compétences de chacun des logiciels pour la modélisation géologique. Pour déterminer le système le plus efficace, une note a été attribuée à chaque logiciel pour chacune des fonctionnalités. Les résultats de ce travail d'évaluation ont également été présentés lors de la conférence ISPRS (Pouliot 2003). Le tableau 2-1 montre ces résultats.

Légende : + = Excellent; 0 = Bon; - Insuffisant

	AutoCAD	ArcGIS	Gocad
Performance pour l'acquisition			
Quantité de formats importables	-	0	+
Fichiers spécifiques à la géologie	-	-	+
Performance pour la construction d'objets 3D			
Création d'objets 3D	0	-	+
Réalisme des objets aux formes irrégulières	+	-	+
Visualisation	+	+	+
Performance pour l'analyse			
Analyse métrique	∅	0	+
Analyse topologique	∅	0	-
Performance globale			
Résultat	-	-	+

Tableau 2-1 - Résultats de la performance globale pour la modélisation géologique de trois types de logiciels (CAO, SIG et modélisation géologique)

La figure précédente montre que les logiciels AutoCAD et ArcGIS ont obtenu des résultats identiques mais pour des raisons différentes. Le logiciel AutoCAD performe bien pour la construction d'objets, ce qui est tout à fait prévisible puisque cette caractéristique est propre à la famille de logiciels CAO. Avec un peu de patience, il est possible d'attribuer n'importe quelle forme à un objet. Cependant, ce logiciel est très peu adapté pour l'acquisition et l'analyse spatiale. De son côté, le logiciel ArcGIS est un exemple très représentatif de logiciels provenant de la famille des SIG puisqu'il performe bien au niveau de l'analyse spatiale mais il possède des lacunes importantes au niveau de la modélisation. D'autre part, ArcGIS montre de bonnes aptitudes pour l'acquisition de données mais, évidemment, les données propres à la géologie sont complètement ignorées. Finalement, le logiciel Gocad dispose de toutes les caractéristiques nécessaires à un logiciel pour être un bon outil de modélisation géologique. Ce dernier facilite la construction de modèles, possède plusieurs opérateurs d'analyse métrique et fait l'acquisition de données provenant d'une multitude de sources qui ont un rapport direct avec des données géologiques. Pour ces raisons, ce logiciel a obtenu les meilleures notes dans tous les aspects de l'analyse de la performance. La seule ombre au tableau est l'absence d'opérateurs d'analyse topologique. Ces résultats ne sont pas surprenant car ce type de logiciel avait été adapté pour ce type de travail. Ainsi

l'analyse comparative ne fait que confirmer les appréhensions que nous avons face aux limites des outils génériques CAD et SIG quant à leurs aptitudes à construire des modèles 3D.

Chapitre 3. Élaboration de la structure GeoTEN

Le chapitre précédent a montré que l'une des faiblesses du logiciel de modélisation géologique Gocad est l'absence d'opérateurs d'analyse spatiale topologique. Maintenant que nous connaissons les structures de stockage de données et le fonctionnement des systèmes présentement disponibles sur le marché, il est possible de proposer une structure qui pourra répondre aux besoins exprimés en introduction. La première section du chapitre identifie les exigences liées au développement tandis que la deuxième partie décrit en détail le modèle conceptuel de données de la nouvelle structure.

3.1. Identification des exigences de développement

Avant de définir la structure topologique, il est important de bien préciser les exigences liées au développement. Ainsi, deux choix ont été faits avant de débiter le développement. Premièrement, pour réaliser des analyses sur des données provenant de la modélisation géologique, il faut évidemment utiliser un logiciel qui permet de créer ce genre de données. Il fallait donc choisir quel logiciel serait utilisé pour le développement. Deuxièmement, au lieu de réinventer la roue, la base d'une structure déjà existante sera utilisée pour en élaborer une nouvelle qui sera adaptée au contexte de cette recherche. Le développement d'une structure topologique vise à rendre l'analyse topologique possible et efficace pour des données provenant d'un modèle géologique. La structure devra donc démontrer un bon niveau de performance pour répondre à des requêtes topologiques. Ainsi, il est primordial de choisir une structure de référence compatible avec ce besoin. Cette section fait une description du raisonnement derrière chacun des choix qui ont été réalisés.

Pour réaliser un développement valable et potentiellement utilisable, il faut employer le logiciel qui est le plus performant pour la modélisation géologique. Ce choix n'a pas été très difficile à faire puisque l'analyse de la performance, au chapitre 2, a montré que le logiciel le plus performant était Gocad. Par contre, l'utilisation de ce logiciel apporte son lot de contraintes pour le développement de la structure. L'aspect le plus critique est la nature des primitives géométriques. Idéalement, la nouvelle structure devrait être compatible avec la structure de Gocad en ce qui a trait à la nature des primitives. Il est

toujours possible de faire la transition d'une structure à une autre. Par exemple, il est possible de convertir des primitives d'une structure de type 3D FDS à une structure de type SSM. Cependant, cette opération requiert une certaine adaptation et un temps de traitement plus long.

Le deuxième choix concerne la structure de référence. Dans le but d'identifier la meilleure structure de référence pour le développement du nouveau modèle, une analyse comparative a été effectuée entre les modèles TEN, SSM et 3D FDS. Pour être considérée potentiellement utilisable, une structure doit posséder deux caractéristiques particulières : **la rapidité d'analyse** et **l'utilisation de primitives géométriques particulières**. Étant donné que la nouvelle structure sera utilisée uniquement pour analyser les relations topologiques, il est impératif que cette dernière soit performante pour ce genre de travail. De plus, les primitives doivent être bien adaptées pour représenter des objets géologiques. Ainsi, l'adaptation de la structure au logiciel de modélisation géologique Gocad en sera grandement facilitée.

La **rapidité d'analyse** d'une structure est fonction de plusieurs variables différentes. Trois critères ont été ciblés pour réaliser cette analyse comparative : la dénormalisation, la gestion des singularités et la quantité de données. Le tableau 3-1 effectue une comparaison entre les trois principales structures topologiques 3D pour la rapidité d'analyse.

Légende : + Excellent; 0 Bon; - Insuffisant

	Poids	3D FDS	TEN	SSM
Espace de stockage	1	0	0	0
Gestion des singularités	1	+	-	0
Normalisation /Dénormalisation	3	0	+	-
Total		0	+	-

Tableau 3-1 - Comparaison entre les structures de données topologiques 3D présentées pour la rapidité d'analyse

Un facteur d'évaluation (poids) dénotant l'importance des critères en fonction du gain de rapidité pour l'analyse topologique a été ajouté pour chaque élément de comparaison. La dénormalisation est le critère le plus important puisqu'il affecte l'ensemble des requêtes qui peuvent être effectuées par le logiciel. D'un autre côté, la gestion des singularités a

beaucoup moins d'impact puisqu'elle ne concerne que certaines requêtes bien précises. Par exemple, la requête qui demande de connaître la relation *contient* entre des points et des solides est très efficace si une singularité *point dans solide* est définie. Par contre, elle n'est d'aucune utilité pour la relation *contient* entre deux solides. Comme il est possible de le voir dans le tableau 3-1, le TEN est considéré comme étant la structure la plus performante pour la rapidité d'analyse. Les paragraphes suivants montrent quelles sont les raisons qui justifient ce résultat.

Une structure qui est normalisée (inverse de dénormalisation) met plus de temps pour répondre à une requête. La raison est simple; plus l'information nécessaire à la réalisation d'une requête est dispersée dans une multitude de tables, plus le temps de réponse est long. Pour un système de gestion de base de données, il est beaucoup plus long de naviguer entre plusieurs tables que de chercher la réponse à l'intérieur d'une seule. Les structures TEN, 3D FDS et SSM sont toutes relativement normalisées mais le TEN est le plus performant. Voici un exemple pour illustrer ce fait :

Essayons de connaître les primitives qui forment un solide à partir du 3D FDS, du SSM et du TEN. Avec le 3D FDS (figure 1-16), il faut d'abord identifier tous les champs *solide de gauche* et *solide de droite* de la table *face* qui indiquent le numéro du *solide*. L'opération est relativement facile puisqu'elle implique uniquement la recherche d'un numéro à l'intérieur de deux champs d'une table. Pour la structure du SSM (figure 1-18), l'opération est un peu plus complexe. À l'intérieur de la table *solide*, le modèle conceptuel montre le champ *face* avec une cardinalité de 1 à N qui signifie qu'un *solide* peut être composé de 1 à plusieurs *faces*. À l'étape de l'implantation, l'ajout d'une autre table sera nécessaire pour enregistrer ces données puisqu'il est impossible, pour une table, d'avoir un nombre de champs. Ainsi, pour trouver les faces qui sont des composantes d'un solide en particulier, il faudra faire une recherche sur deux tables. Cette opération prendra un peu plus de temps que pour le 3D FDS. Avec la structure TEN (figure 1-19), pour identifier les tétraèdres qui composent un *solide*, il suffit de trouver dans la table des tétraèdres, toutes les entrées qui ont le numéro du solide recherché. Cette recherche implique uniquement

la recherche d'un champ à l'intérieur d'une seule table. Il s'agit donc de la structure la plus dénormalisée et, par conséquent, la plus performante pour ce type de requête.

Le deuxième critère qui influence la rapidité d'analyse est la gestion des singularités par la structure. Une singularité est une relation entre deux primitives qui doit absolument être inscrite dans une table pour être identifiée. Pour bien illustrer ce concept, voici un exemple de singularité. La structure du 3D FDS permet à un nœud d'être situé à l'intérieur d'un solide sans être rattaché à aucune autre primitive. Ainsi, pour pouvoir identifier la relation *nœud dans solide*, la relation doit être explicitement définie dans la table *nœud dans solide*. La gestion d'un grand nombre de singularités augmente la vitesse d'analyse puisqu'elle permet de définir explicitement des relations entre deux types de primitives. La structure 3D FDS est le modèle qui possède le plus grand nombre de singularités, soit quatre : *nœud dans solide*, *nœud sur face*, *arc dans solide* et *arc sur face*. La structure SSM est au deuxième rang avec un total de deux singularités : *nœud dans solide* et *face dans solide*. Finalement, la structure TEN ne permet aucune singularité. Comme il a été expliqué précédemment à la section 1.4.2.2.3. , il est impossible de trouver une primitive qui n'est pas rattachée à une primitive de dimension supérieure (exception faite des tétraèdres).

Le dernier critère pour l'évaluation de la rapidité d'analyse est l'espace de stockage des données. Ce critère est facilement justifiable puisque plus une structure enregistre un grand nombre de données, plus l'analyse sera longue. Le modèle 3D FDS requiert un espace réduit pour le stockage des données, ce qui est une conséquence du fait que ce dernier enregistre uniquement les objets à modéliser et non pas l'ensemble des espaces vides d'un secteur. Pour la structure SSM, le but visé est de minimiser la quantité de données pour rendre le transfert via Internet plus efficace. Ainsi, cette structure possède uniquement deux primitives géométriques permettant de minimiser la quantité de données. Finalement, la structure TEN a été développée pour des milieux qui ne possèdent pas d'espaces vides. Par exemple, dans un milieu urbain, il existe des espaces qui ne sont pas occupés par des objets (bâtiments) contrairement au milieu géologique qui est entièrement rempli d'objets. C'est dans cet optique que la règle générale de la structure TEN a été élaborée. Cette règle indique que l'ensemble de l'espace doit être subdivisé en tétraèdres et cela a un impact direct sur la quantité de données. Puisque l'ensemble de l'espace est divisé en tétraèdres, le

nombre d'objets est très grand, ce qui fait augmenter l'espace de stockage nécessaire. Puisque la nouvelle structure sera construite dans le but précis de stocker des objets géologiques et étant donné l'absence d'espaces vides dans un environnement de modélisation géologique, l'ensemble de l'espace sera occupé par des objets. Ainsi, l'argument de la subdivision complète de l'espace n'est pas un critère important puisque la quantité de données enregistrées sera relativement semblable peu importe le modèle. Pour le critère de l'espace de stockage et en considérant ces facteurs, tous les modèles peuvent être mis sur un pied d'égalité.

La deuxième caractéristique importante pour déterminer l'aptitude d'une structure afin de répondre aux besoins et contraintes de cette étude est **l'utilisation de primitives géométriques particulières**. Pour déterminer si une structure est adéquate pour représenter des objets géologiques, deux critères ont été examinés : la triangulation des surfaces et la triangulation des volumes (tétraèdres). Ces deux critères ont pour but d'évaluer la flexibilité pour la construction d'objets irréguliers puisque la triangulation de surfaces et de volumes en facilite la construction. Une des façons les plus efficaces de créer un MNT passe par le Triangulated Irregular Network (TIN) car cette technique réduit la portion du territoire en surfaces triangulées, donc plus simples à gérer. Il est beaucoup plus difficile de créer une surface avec des faces qui possèdent un nombre variable d'arêtes qu'avec des faces qui en ont un nombre constant. Le même raisonnement s'applique pour la création et la représentation de solides. Il faut également spécifier que la triangulation des surfaces et des solides est utilisée par Gocad. Dans le cas où la structure de référence triangulerait également ses surfaces et ses solides, l'adaptation en serait grandement facilitée.

Les structures 3D FDS et SSM utilisent des faces qui ne sont pas triangulées. Les surfaces et les solides sont constitués de faces qui ont un nombre variable d'arêtes. Cette façon de construire les objets est avantageuse pour la modélisation d'un milieu régulier comme un environnement urbain. Cependant, dans le contexte d'un milieu géologique, il est plus difficile de construire des objets irréguliers. La structure TEN est basée sur la triangulation des surfaces et des solides qui peut être considérée comme l'extension du TIN en 3D. Cette caractéristique est importante pour la construction d'objets aux formes irrégulières.

Le tableau 3-2 montre les résultats de la comparaison de chacune des structures pour l'aptitude à construire des objets géologiques. Étant donné que le TEN est la seule structure qui utilise systématiquement la triangulation, il est le modèle le plus apte pour représenter fidèlement des objets géologiques.

Légende : + Excellent; 0 Bon; - Insuffisant

	Poids	3D FDS	TEN	SSM
Triangulation des surfaces	1	-	+	-
Triangulation des solides	1	-	+	-
	Total	-	+	-

Tableau 3-2 - Comparaison des structures pour l'aptitude à construire des objets géologiques
Suite à l'évaluation de la rapidité d'analyse et l'utilisation de primitives géométriques particulières, il est évident que la structure TEN est la plus appropriée dans le contexte de cette recherche. Les développements ont donc été réalisés en s'appuyant sur un logiciel de modélisation géologique (Gocad) et une structure topologique de données (TEN).

3.2. Définition de la structure topologique GeoTEN

La présente section établit les concepts de base de la nouvelle structure qui a été baptisée GeoTEN puisqu'elle est fortement inspirée du TEN et que la géologie est son domaine d'application principal. Cette section présente également une comparaison entre la nouvelle structure et les structures du TEN et de Gocad. Le modèle d'implantation de la nouvelle structure est présenté à la figure 3-1

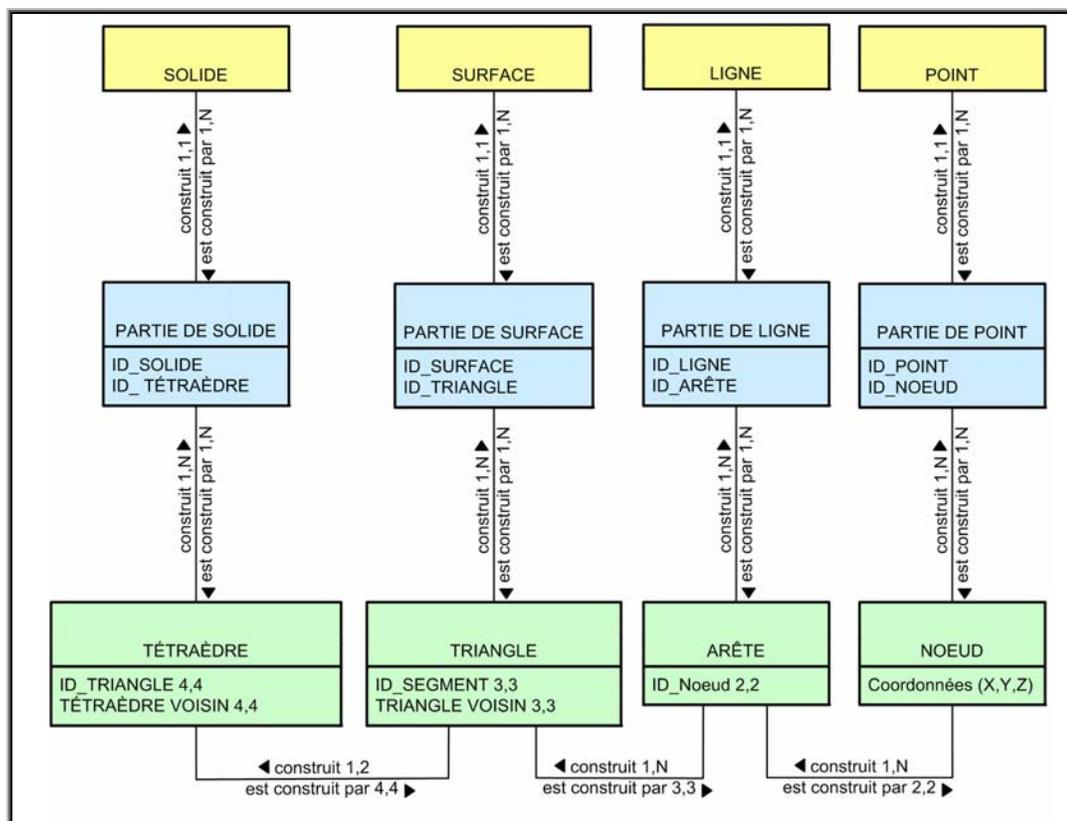


Figure 3-1 - Modèle d'implantation de la structure topologique GeoTEN

La figure précédente montre les primitives géométriques (en vert), les parties (en bleu) et les objets géométriques (en jaune). Comme pour les structures précédentes, le GeoTEN est régi par des règles générales de fonctionnement (tableau 3-3).

No	Description des règles
1	Un nœud possède des coordonnées X, Y et Z. Un nœud peut faire partie d'un ensemble point, être une composante d'un segment ou les deux;
2	Une arête est composée d'un nœud à chaque extrémité. Une arête peut faire partie d'une ligne, être une composante d'un triangle ou les deux;
3	Un triangle est composé de trois arêtes. Un triangle peut faire partie d'une surface, être une composante d'un tétraèdre ou les deux;
4	Un tétraèdre est composé de quatre triangles. Un tétraèdre peut être uniquement un constituant d'un solide;
5	Les « parties » sont des objets intermédiaires entre les primitives géométriques et les objets géométriques. Elles sont composées d'un nombre illimité de primitives mais sont rattachées à un seul et unique objet géométrique;
6	Pour les triangles et les tétraèdres, les primitives voisines (sur la même surface ou dans le même volume) doivent être inscrites explicitement;
7	Les singularités ne sont pas permises;

Tableau 3-3 - Règles de construction de la structure proposée qui sont inspirées de la structure TEN

Les sept règles du tableau 3-3 dictent le comportement de tous les objets de la structure. La règle #1 définit la composition d'un noeud et établit la relation entre un noeud et un point. Selon cette règle, un noeud peut être une composante d'un ensemble de points. Dans le modèle conceptuel, cela se traduit par la définition des noeuds avec des coordonnées tridimensionnelles et un lien entre les vertex et les points¹⁰. La règle #2 indique qu'une arête est composée de deux noeuds, qu'elle peut faire partie d'une ligne et qu'elle est utilisée pour former les triangles. Ainsi, les arêtes sont en relation avec les noeuds, les triangles et les lignes. La règle #3 spécifie qu'un triangle est composé de trois arêtes et que les surfaces et les tétraèdres sont formés de triangles. À partir de cette règle, trois relations sont créées (*arête - triangle*, *tétraèdre - triangle* et *surface - triangle*). La règle #4 établit des liens avec la table des tétraèdres. Dans ce cas-ci, il y a seulement deux relations qui sont définies. La première relation établit le lien entre les tétraèdres et les triangles et spécifie qu'un tétraèdre est formé à partir de quatre triangles. La seconde relation indique que tous les tétraèdres sont des constituants d'au moins un solide, ce qui crée un lien entre la table des solides et celles des tétraèdres. La règle #5 introduit les *parties* qui sont des subdivisions d'un même objet géométrique qui se touchent ou qui sont séparées. C'est un concept très utile en géologie puisqu'il arrive qu'un objet soit divisé en plusieurs parties et déplacé par une fracture. Le logiciel Gocad applique ce concept aux objets dans son modèle conceptuel de données (figure 1-12). La règle #6 spécifie le besoin de connaître les voisins immédiats des primitives voisines des triangles et des tétraèdres. Dans le modèle conceptuel, cela se traduit par la présence de champs à l'intérieur des tables de tétraèdres et de triangles qui informent sur les voisins immédiats des primitives. Finalement, la règle #7 indique qu'aucune singularité entre les primitives n'est tolérée. Cette règle implique que lorsque deux primitives se croisent (peu importe lesquelles) une subdivision doit avoir lieu. Par exemple, lorsque deux arêtes se croisent, il doit y avoir l'introduction d'un noeud à l'endroit de l'intersection.

¹⁰ Les relations avec les parties seront implantées plus tard avec la cinquième règle.

3.3. Évaluation de la structure proposée

Les deux sections qui suivent font une description des différences et des similitudes du GeoTEN par rapport aux structures du logiciel Gocad et du Tetrahedral Network.

3.3.1. Comparaison avec la structure TEN

La différence majeure entre la structure TEN et la nouvelle structure est le non-respect de la règle générale du TEN qui veut qu'une primitive géométrique fasse toujours partie d'une autre primitive géométrique de dimension supérieure. Cette règle oblige la subdivision complète de l'espace en tétraèdres et c'est pour cette raison que le GeoTEN ne respecte pas cette règle. Ce choix a été fait en raison de l'utilisation de Gocad puisqu'il n'est pas conçu pour construire et représenter des données qui suivent cette règle. Du point de vue de la performance, ce changement réduit la rapidité d'analyse et l'espace de stockage nécessaire à la structure. L'interrogation d'un modèle qui est régi par la règle générale du TEN est plus performante puisque les relations entre les différentes primitives sont stables. Par exemple, dans un modèle où la règle générale est appliquée, un point fait toujours partie d'au moins un tétraèdre. Il est beaucoup plus facile d'interroger la base de données si cette relation est respectée. Par contre, lorsque cette règle générale n'est pas appliquée, il est impossible d'affirmer qu'un point fait partie d'au moins un tétraèdre. Dans ce cas, une recherche à l'intérieur d'une table est nécessaire ce qui implique un temps de traitement plus important. La deuxième conséquence donne un avantage au GeoTEN puisque l'espace de stockage nécessaire pour l'enregistrement d'un modèle est réduit. Il y a donc un effet direct sur le nombre d'enregistrements d'une table et sur la rapidité d'analyse du modèle.

La sixième règle a des répercussions sur certaines tables puisqu'elle spécifie que les primitives voisines aux triangles et aux tétraèdres doivent être explicitées. La figure 3-2 compare les tables des deux structures.

<table border="1"> <thead> <tr> <th>TRIANGLE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ID_Arc 3,3 Tétraèdre de gauche Tétraèdre de droite</td> </tr> </tbody> </table>	TRIANGLE	ID_Arc 3,3 Tétraèdre de gauche Tétraèdre de droite	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TRIANGLE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ID_SEGMENT 3.3 TRIANGLE VOISIN 3.3</td> </tr> </tbody> </table>	TRIANGLE	ID_SEGMENT 3.3 TRIANGLE VOISIN 3.3
TRIANGLE					
ID_Arc 3,3 Tétraèdre de gauche Tétraèdre de droite					
TRIANGLE					
ID_SEGMENT 3.3 TRIANGLE VOISIN 3.3					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TÉTRAÈDRE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ID_Triangle 4,4</td> </tr> </tbody> </table>	TÉTRAÈDRE	ID_Triangle 4,4	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TÉTRAÈDRE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ID_TRIANGLE 4.4 TÉTRAÈDRE VOISIN 4.4</td> </tr> </tbody> </table>	TÉTRAÈDRE	ID_TRIANGLE 4.4 TÉTRAÈDRE VOISIN 4.4
TÉTRAÈDRE					
ID_Triangle 4,4					
TÉTRAÈDRE					
ID_TRIANGLE 4.4 TÉTRAÈDRE VOISIN 4.4					
TEN	GeoTEN				

Figure 3-2 - Comparaison des tables des triangles et des tétraèdres du TEN et de la nouvelle structure. L'information concernant les primitives adjacentes dans la table de la nouvelle structure est donnée dans des champs spécifiques qui sont remplis uniquement lorsque la primitive est un constituant d'un objet géométrique (figure 3-2). Un tétraèdre doit absolument être relié à un solide. Par contre, il est possible qu'un triangle ne soit pas un constituant d'une surface. Le champ sera donc vide si un triangle sert exclusivement à la construction d'un tétraèdre. Si un triangle fait partie d'une surface, l'information inscrite dans les champs des triangles adjacents concernera uniquement les triangles appartenant à la même surface. Ces ajouts augmentent la rapidité d'analyse puisque certaines requêtes doivent être en mesure de connaître les voisins immédiats d'un triangle pour déterminer un type de relation en particulier. Ainsi, ces champs permettent de connaître rapidement les voisins des primitives et évitent une recherche dans une multitude de tables pour obtenir cette information.

La dernière différence entre le TEN et la nouvelle structure concerne la troisième règle qui fait référence à la construction des tétraèdres. La figure 3-3 montre comment un tétraèdre est défini avec le TEN et avec la nouvelle structure.

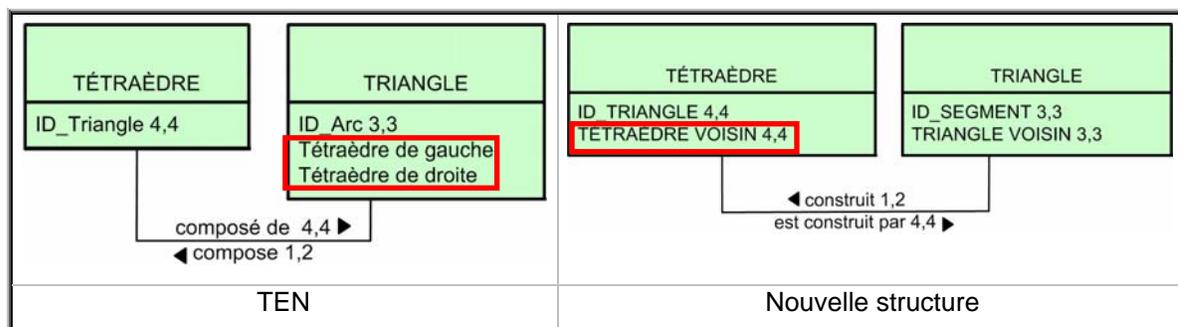


Figure 3-3 - Comparaison de la définition des tétraèdres du TEN et de la nouvelle structure

La définition d'un tétraèdre dans la structure TEN se fait à partir de la table des triangles. Ainsi, un triangle possède un attribut qui indique l'identifiant unique du tétraèdre de gauche et celui du tétraèdre de droite. Cette façon de fonctionner est valable dans un environnement où tout l'espace est divisé en tétraèdres, ce qui n'est pas le cas avec la nouvelle structure. L'application de ce procédé pour la définition des tétraèdres aurait occasionnée beaucoup de pertes d'espace puisque plusieurs triangles sont utilisés uniquement comme composantes d'une surface. Ainsi, plusieurs champs auraient été vides. La solution est de définir les tétraèdres directement dans la table des tétraèdres. Dans la nouvelle structure, la table des triangles ne contient pas d'information concernant les tétraèdres mais elle possède un nouveau champ qui indique les triangles formant le contour d'un tétraèdre. Ce changement permet également de faire un gain en rapidité d'analyse. La définition explicite des tétraèdres dans la nouvelle structure évite des requêtes compliquées pour identifier les primitives servant à la construction d'un tétraèdre. Cependant, une plus grande quantité de données est enregistrée, ce qui augmente la taille de la base de données.

3.3.2. Comparaison avec le logiciel Gocad

Une grande similitude existe entre le logiciel Gocad et la nouvelle structure, ce qui permet de passer du format interne de Gocad à la nouvelle structure avec un effort d'adaptation minimal. Ces deux structures utilisent les mêmes primitives pour représenter les objets géométriques soit les noeuds, les arêtes, les triangles et les tétraèdres. Malgré ceci, certaines transformations de la structure utilisée par Gocad sont nécessaires pour permettre les requêtes topologiques avec la structure proposée. Elles concernent surtout les liens entre les

primitives géométriques. La figure 3-4 montre la différence de configuration entre les primitives de Gocad et celles de la nouvelle structure.

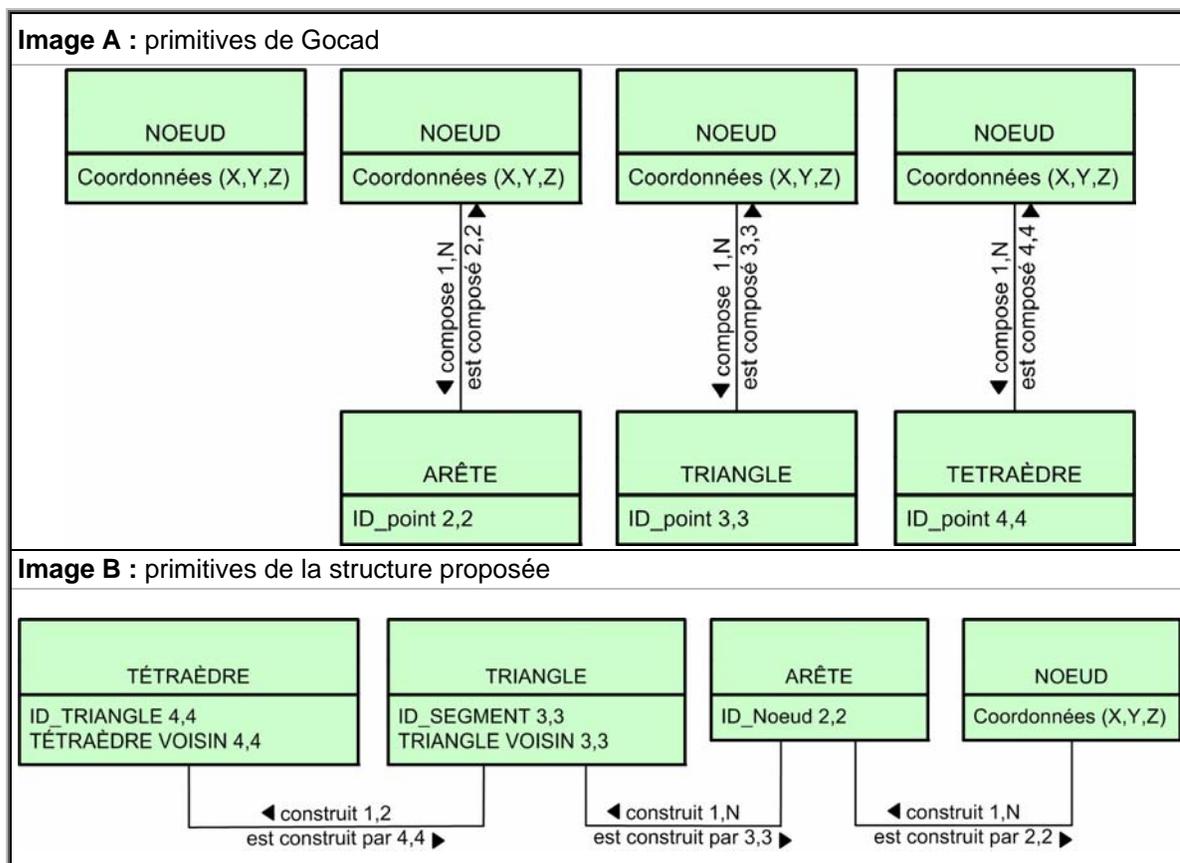


Figure 3-4 - Comparaison entre les primitives de Gocad et du GeoTEN

Comme il est possible de voir, la structure de données de Gocad (image A) utilise quatre différentes tables de noeuds. Cette façon de définir les primitives crée une indépendance entre les objets. La nouvelle structure (image B) utilise une seule et unique table de noeud. Ainsi, la construction des primitives requiert un lien direct avec une primitive de dimension inférieure. Par exemple, pour former un triangle, il faut utiliser les arêtes comme éléments de base, de sorte qu'un triangle est constitué de trois segments.

Cette nouvelle façon de construire les primitives est un changement majeur par rapport à la philosophie originale de Gocad. La conséquence immédiate de ce changement est l'apparition de liens entre les différents types d'objets. Dans ces conditions, toutes les primitives (noeud, arête, triangle et tétraèdre) doivent posséder un identifiant unique. Il devient ainsi possible d'identifier des objets qui possèdent des primitives en commun. Par

exemple, pour savoir si un solide et un segment sont disjoints, il suffit de comparer la liste des noeuds faisant partie des deux objets. Si aucun noeud est commun aux deux objets, ces deux objets sont disjoints.

3.4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a permis de proposer une structure topologique de données 3D adaptée pour l'analyse de modèles géologiques.

Au départ, une analyse des besoins a été présentée. Premièrement, il a été question de l'utilisation d'un logiciel de modélisation géologique dans le but de fournir des données provenant de la modélisation géologique. Ainsi, l'utilisation du logiciel Gocad s'est avérée être la meilleure solution puisque, tel que démontré au chapitre 2, il s'agit du meilleur outil disponible pour la modélisation géologique. Deuxièmement, il a été convenu que l'utilisation d'un modèle de référence d'une structure topologique serait pertinente. Pour ce faire, une comparaison avec le TEN, le SSM et le 3D FDS a été réalisée en fonction de deux critères d'évaluation, soit la rapidité d'analyse et l'utilisation de primitives géométriques particulières. Il s'est avéré que la structure la mieux adaptée pour servir de modèle de référence est le TEN. En prenant en considération ces choix, une structure topologique de données nommée GeoTEN a été proposée. En général, les règles du TEN ont été respectées dans la définition du GeoTEN. Cependant, certaines règles ont été ajoutées pour augmenter la rapidité d'analyse du modèle. Par exemple, la règle #6 indique la présence de champs dans les tables *tétraèdre* et *triangle* qui doivent contenir de l'information concernant les voisins immédiats. Cette règle a une influence directe sur la rapidité d'analyse de la structure. Finalement, la dernière section avait pour but de comparer le GeoTEN avec les contraintes qui ont dicté son développement. Les différences majeures entre la structure proposée et le TEN ont été indiquées. Ces différences ont été introduites dans le but d'augmenter la rapidité d'analyse.

Ce chapitre avait pour but d'élaborer une structure topologique de données qui soit totalement adaptée pour l'analyse de modèles géologiques. Il a été possible de voir que tous les développements ont été réalisés dans ce sens. Dans le but de réellement tester cette structure, un prototype a été élaboré.

Chapitre 4. Implantation de la structure topologique

Pour véritablement évaluer les capacités de la nouvelle structure, une application a été développée. Le but était de coupler le GeoTEN au logiciel Gocad pour effectuer des requêtes topologiques à partir d'un modèle géologique 3D et d'ainsi tester la faisabilité et l'apport réel d'une telle structure.

4.1. Introduction

Tout projet lié à l'utilisation de l'informatique comporte des contraintes technologiques. Ce projet ne fait pas exception à la règle. Le développement proposé concerne l'implantation d'une structure topologique de données 3D appliquée au domaine de la modélisation géologique. Étant donné que l'objectif de ce projet n'est pas de développer un nouvel outil de modélisation, un logiciel de modélisation géologique existant devra interagir avec la structure de données proposée. La figure 4-1 montre la stratégie d'implantation qui a été choisie.

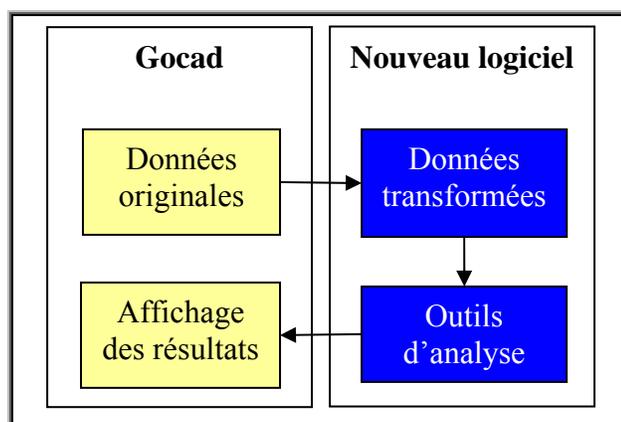


Figure 4-1 - Stratégie d'implantation pour le développement du prototype d'analyse topologique 3D.

La figure précédente montre le schéma du développement d'un nouveau logiciel qui communique avec Gocad par l'entremise de ses données. Le logiciel développé récupère les données provenant de la modélisation, effectue les transformations et les analyses nécessaires, puis retourne le résultat dans un fichier lisible par Gocad. Cette façon de procéder permet de choisir le langage de programmation pour développer le nouveau logiciel. Si le développement avait été réalisé directement dans Gocad, il aurait fallu utiliser le langage de programmation qu'utilise Gocad (C++). Cependant, la présence de deux

interfaces (logiciel de modélisation et logiciel développé) est une contrainte pour réaliser une analyse performante. Étant donné que l'objectif de ce projet est de démontrer que l'addition de la topologie aide à mieux analyser un modèle géologique, il n'est pas nécessaire de développer une solution complètement intégrée.

Ayant choisi la stratégie d'implantation, certains choix technologiques sont nécessaires. Le logiciel Gocad possède beaucoup d'objets, en plus des objets génériques, qui sont directement reliés à la géologie. Par exemple, les objets WELLS sont utilisés pour représenter des forages et les SGRID servent à modéliser une grille stratigraphique. Ils ne sont en fait qu'une spécialisation d'un objet plus général. Par exemple, les WELLS ne sont que des lignes qui possèdent l'information descriptive des *log* de forages. Dans cette optique, et pour simplifier l'implantation, uniquement les objets génériques ont été implantés, c'est-à-dire les points, les lignes, les surfaces et les solides.

Plusieurs options sont disponibles pour le choix du langage de programmation comme le C++, le Visual Basic et le Java. Pour déterminer le langage utilisé, l'aspect le plus important est la facilité avec laquelle l'interface et les commandes peuvent être rapidement programmées. Dans ces conditions, la meilleure option est d'utiliser Visual Basic.

Le dernier choix technologique concerne le Système de Gestion de Base de Données (SGBD) qui facilitera la gestion des données dans le logiciel prototype. Plusieurs fonctions sont disponibles (ajout, mise à jour, suppression, etc.) dans un SGBD, ce qui implique une économie de temps pour le développement et l'assurance de la qualité des données. De plus, l'interrogation d'un SGBD se fait par l'entremise d'un langage de programmation qui permet de réduire le temps de développement des requêtes. Le choix du logiciel s'est arrêté sur SQL Server. Plusieurs autres logiciels auraient pu être utilisés (Microsoft Access, My SQL, Oracle), mais SQL Server était disponible et en mesure de répondre aux besoins.

4.2. Développement du prototype

La stratégie de développement choisie dicte les étapes à suivre pour effectuer le développement du prototype. La figure 4-2 montre les deux fonctions qui doivent être programmées pour obtenir une réponse à une requête topologique.

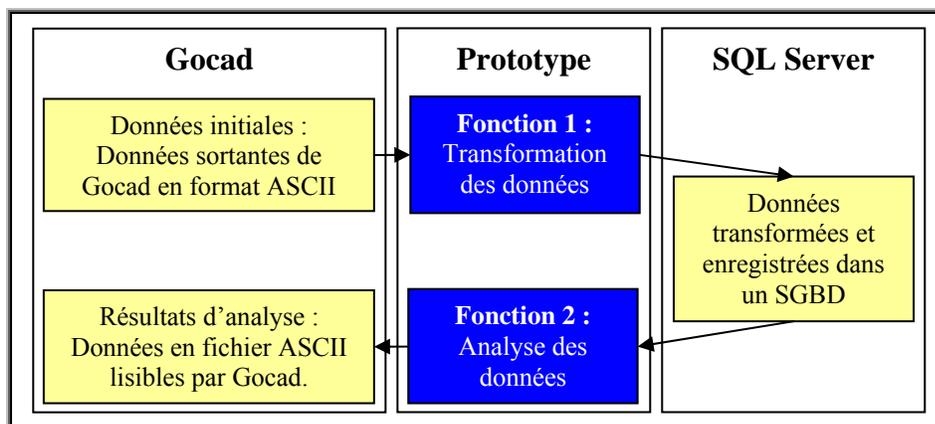


Figure 4-2 - Emplacement et utilité des fonctions du prototype.

Comme il est possible de constater à la figure 4-2, le prototype est divisé en deux fonctions distinctes. La première fonction sert à transformer les données provenant de Gocad et les enregistrer dans la nouvelle structure. La deuxième fonction sert à analyser les données qui sont à l'intérieur du système de gestion de base de données (SQL Server) et à fournir un résultat qui pourra être affiché avec Gocad. Voici une description des algorithmes qui ont servi à la programmation des deux fonctions du prototype.

4.2.1. Algorithme de la Fonction 1 : Transformation des données

Cette fonction sert à transformer les données qui proviennent de Gocad et à les intégrer dans une base de données. Au départ, les données de Gocad sont enregistrées dans une structure qui n'est pas topologique. Un certain nombre d'opérations doivent être effectuées pour formater ces données et les intégrer dans la structure topologique. Pour ce faire, quatre étapes sont nécessaires : la correction des problèmes de connectivité, la formation des intersections non détectées, l'élimination des primitives en double et finalement, la copie des données au SGBD. Il faut noter que les deux premières étapes ont été réalisées de façon manuelle. La figure 4-3 illustre l'ordre de réalisation des différentes étapes de la première fonction.

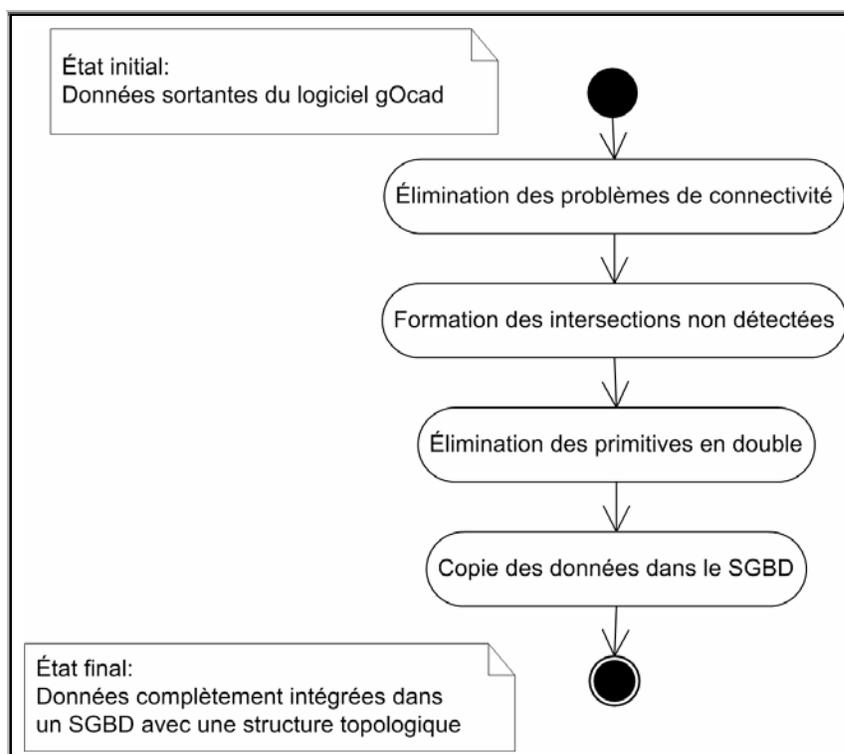


Figure 4-3 - Liste des fonctions à réaliser afin de transformer des données non topologiques en données topologiques.

Cette fonction prend les données sortantes de Gocad (état initial) et les transforme pour les intégrer au SGBD (état final). Les paragraphes suivants donnent une description détaillée de chacune des quatre étapes de cette figure.

L'élimination des erreurs de connectivité est la première étape à réaliser. La connectivité entre les primitives géométriques est à la base des relations topologiques. Pour identifier toutes les relations de voisinage, il faut vérifier que les objets supposément adjacents, le sont véritablement. Ces erreurs sont souvent attribuables à une granularité différente des coordonnées qui est utilisée pour stocker ces dernières dans les fichiers. Par exemple, deux points qui ont des coordonnées qui ne sont pas totalement identiques sont considérés comme étant des points différents. Ces problèmes sont mieux connus sous les noms de *overshoot* et *undershoot*. En français, ces termes peuvent se traduire par *dépassement* et *insuffisance*. La figure 4-4 illustre ces situations dans un environnement 2D.



Figure 4-4 - Erreurs de connectivité pour des segments dans un univers en 2D.

La figure précédente illustre deux objets qui doivent être connectés mais qui sont, soit au-delà de l'objectif (image A), soit à court de l'objectif (image B). Pour enrayer ces problèmes, il faut analyser le fichier en détail pour détecter les erreurs. Pour ce faire, un seuil de tolérance doit être introduit, ce qui permet de décider des cas qui doivent être corrigés. Lorsque les cas problématiques sont identifiés, il suffit de déplacer les nœuds qui sont problématiques à un endroit convenable. La figure 4-5 montre l'exemple de l'intersection entre deux surfaces qui ont un problème de dépassement.

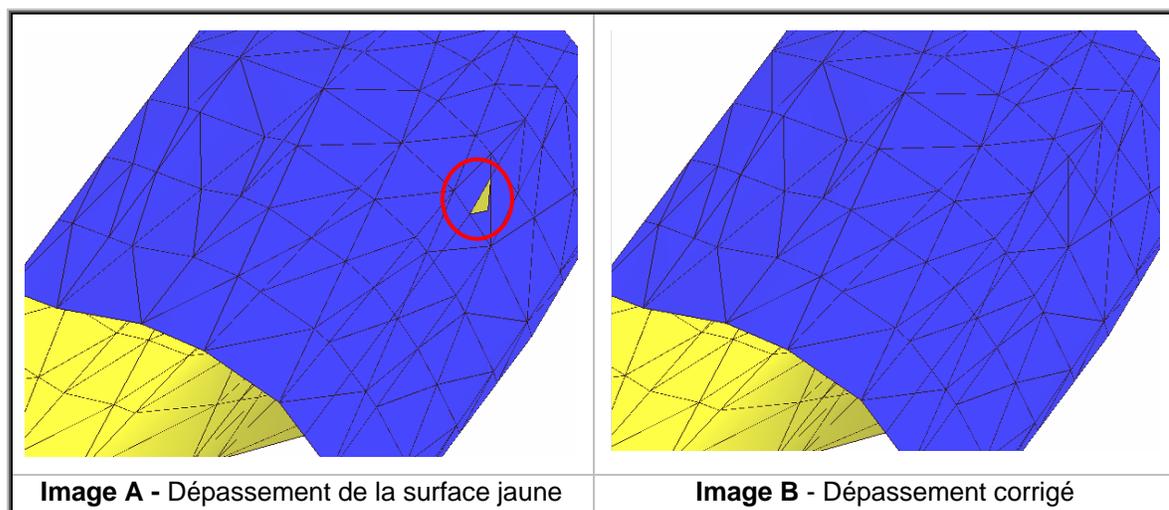


Figure 4-5 - Problème de dépassement entre deux surfaces dans un environnement 3D.

L'image A montre un triangle jaune (encerclé en rouge) qui dépasse de la surface bleue. Si l'extrémité du triangle est à l'intérieur de la tolérance établie par l'utilisateur, cette dernière sera ramenée sur la surface. Sur l'image B, il est possible de constater que le triangle jaune, qui était mal connecté, a été déplacé pour corriger la situation. Cette opération est très importante puisque le processus d'élimination des primitives en double est basé sur une comparaison de coordonnées. Dans le cas où deux points qui doivent être au même endroit

ne possèdent pas les mêmes coordonnées, l'étape d'élimination des primitives en double ne fonctionnera pas et tout le reste du processus sera erroné.

La deuxième étape consiste à faire la **création des intersections non détectées**. Pour effectuer cette opération, il faut trouver les endroits où deux primitives se croisent et où un nœud n'existe pas car, normalement, ces endroits devraient être marqués par la présence d'un nœud. Par exemple, lorsque deux arêtes se croisent, un nœud doit être présent pour marquer l'endroit de l'intersection. La figure 4-6 montre le cas de l'intersection entre deux arêtes.

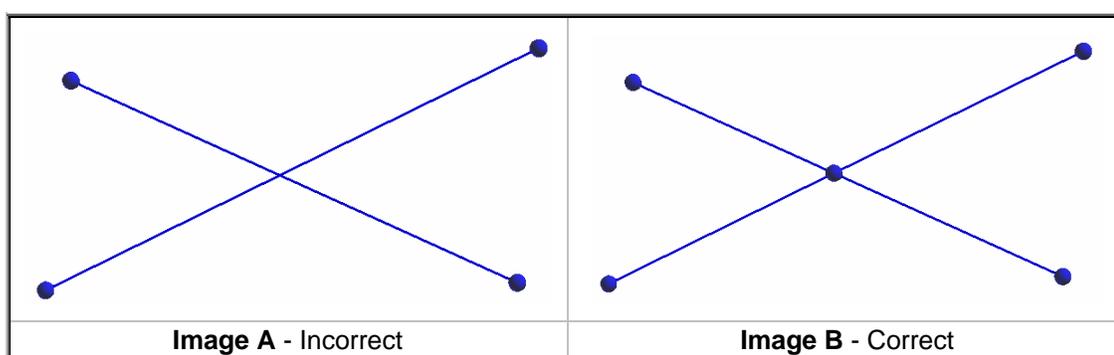


Figure 4-6 - Cas possible où l'absence de primitives doit être corrigée. Exemple du cas de l'intersection entre deux arêtes.

L'image A montre deux arêtes qui se croisent sans que l'intersection soit marquée par la présence d'un nœud. Cette situation est interdite par la règle #7 (tableau 3-3) de la définition de la nouvelle structure. L'image B illustre le résultat de la correction du problème avec l'insertion d'un nœud à l'endroit de l'intersection. Cette opération implique que les arêtes qui se croisent doivent être divisées.

La création des intersections non détectées permet de créer un lien entre les différentes primitives. Ces liens sont cruciaux pour l'identification des relations entre deux objets. Par exemple, sans calcul mathématique, il est impossible de savoir s'il y a une relation entre deux arêtes si cette dernière n'est pas marquée par un nœud. Le tableau 4-1 dresse une liste exhaustive de tous les cas où la modification des primitives est nécessaire.

Type de cas	Primitive 1	Primitive 2	Nouvelles primitives ajoutées
Simple	Noeud	Noeud	Aucune
Simple	Noeud	Arête	1 noeud, 1 arête
Simple	Noeud	Triangle	1 noeud, 3 arêtes, 3 triangles
Simple	Noeud	Solide	1 noeud, 4 arêtes, 3 triangles, 4 tétraèdres
Simple	Arête	Arête	1 noeud, 2 arêtes
Complexe	Arête	Triangle	Plusieurs solutions possibles
Complexe	Arête	Solide	Plusieurs solutions possibles
Complexe	Triangle	Triangle	Plusieurs solutions possibles
Complexe	Triangle	Tétraèdre	Plusieurs solutions possibles
Complexe	Tétraèdre	Tétraèdre	Plusieurs solutions possibles

Tableau 4-1 - Résultats de la modification des primitives.

Ce tableau montre que les cas simples sont facilement transformables tandis que les cas complexes exigent une analyse plus approfondie. C'est la configuration des éléments qui provoque la multiplication des cas. La figure 4-7 illustre un exemple de cas multiples.

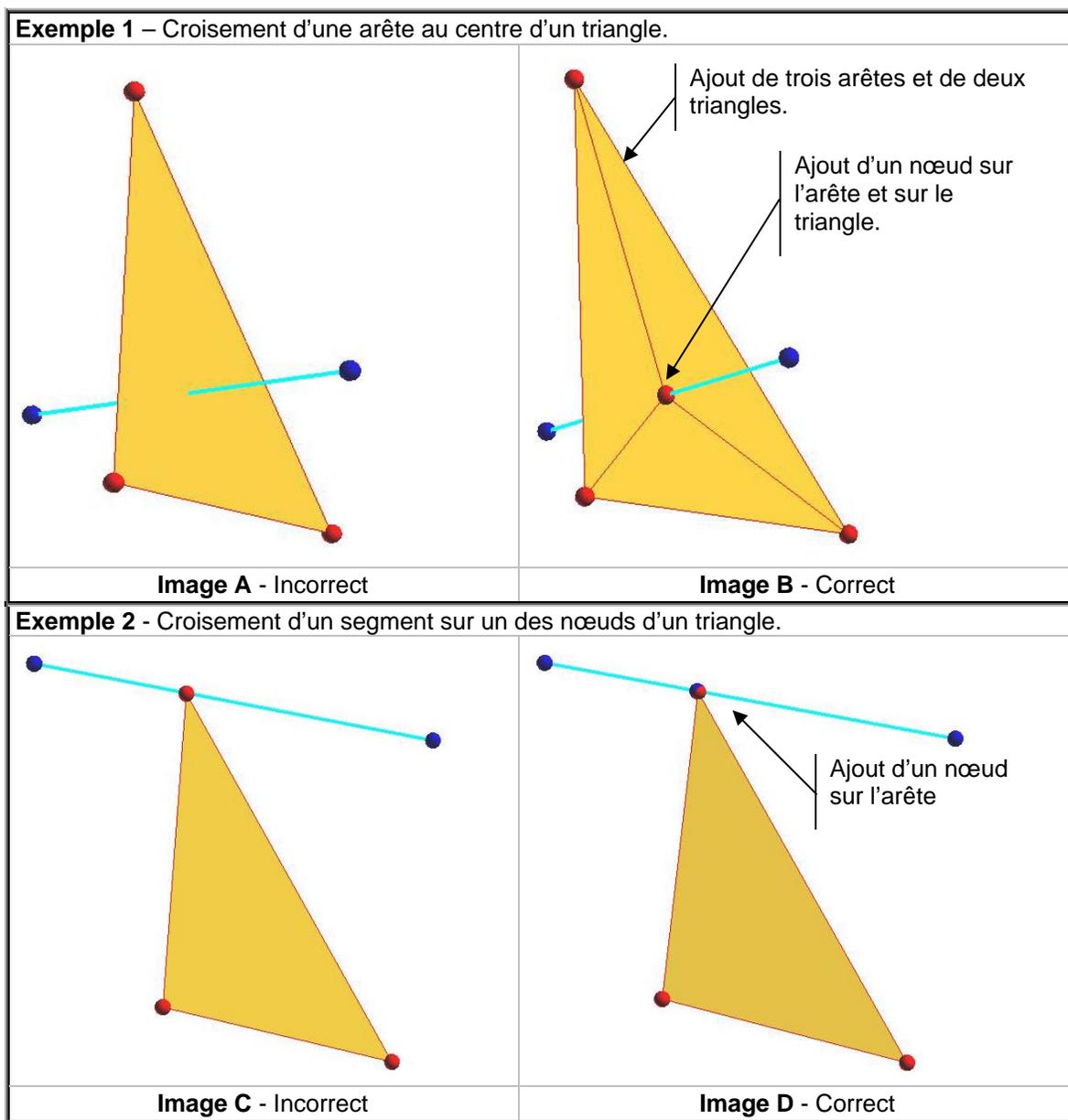


Figure 4-7 - Exemple d'un cas d'intersection entre des primitives qui possède une multitude de possibilités de configuration.

La figure précédente montre deux exemples différents d'insertion de nouvelles primitives à la suite de la détection d'une intersection entre un triangle et une arête. Le premier exemple (image A) est un cas où l'intersection entre les deux primitives se fait au centre du triangle. Pour résoudre le problème, l'arête doit être divisée en deux et le triangle doit être divisé en trois parties (image B). L'exemple 2 (image C) illustre une autre configuration puisque l'intersection des primitives est faite sur un nœud du triangle. Dans cette situation, la solution est plus simple puisque seule la division de l'arête et l'introduction d'un nouveau

nœud sont nécessaires (image D). L'algorithme doit être en mesure de résoudre l'ensemble des cas possibles.

La troisième étape consiste à **éliminer les primitives** en double. Ici encore, la raison fondamentale de cette opération est de créer un lien entre les primitives géométriques. Le but ultime est de déterminer si deux objets possèdent un nœud commun en comparant les identifiants uniques. Par exemple, dans le cas où deux arêtes sont décrites par les mêmes nœuds de départ et d'arrivée, l'une des arêtes sera éliminée. Ainsi, tous les objets et les primitives géométriques qui faisaient référence à une primitive supprimée doivent maintenant faire référence à la primitive qui a survécu. La figure 4-8 illustre un exemple d'élimination de primitives en double.

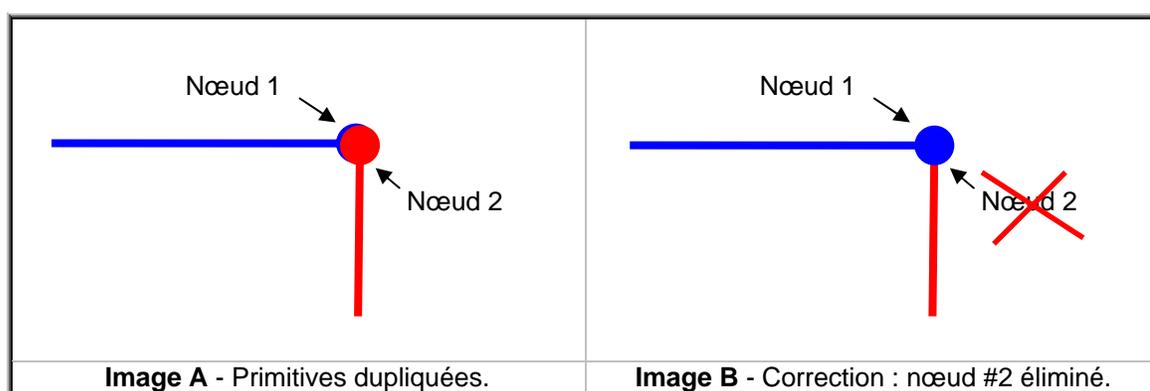


Figure 4-8 - Erreurs de duplication de nœuds qui composent des segments en 2D.

L'image A montre un exemple d'un nœud qui est dupliqué et qui fait partie de deux arêtes différentes. L'image B illustre la façon de corriger la situation. Ainsi, le nœud #2 est éliminé et l'arête en rouge est maintenant composée par le nœud #1. Il faut spécifier que ce travail doit être fait pour toutes les primitives (nœud, arête, triangle et tétraèdre). L'algorithme doit d'abord éliminer les nœuds en double pour permettre l'élimination des autres primitives par la suite. Par exemple, pour savoir si une arête est identique à une autre, la comparaison est faite avec les identifiants des nœuds qui la composent. Ces identifiants doivent être uniques pour une coordonnée en particulier, d'où la nécessité de débiter le travail de nettoyage par les nœuds.

Finalement, la dernière étape consiste à **copier les données dans le SGBD**. Deux opérations doivent être effectuées. Il faut d'abord générer une nouvelle base de données, ce

qui consiste à créer les tables, identifier les clés primaires et définir les contraintes de clés étrangères. La figure 4-9 montre les différentes associations entre les tables à l'intérieur de SQL Server.

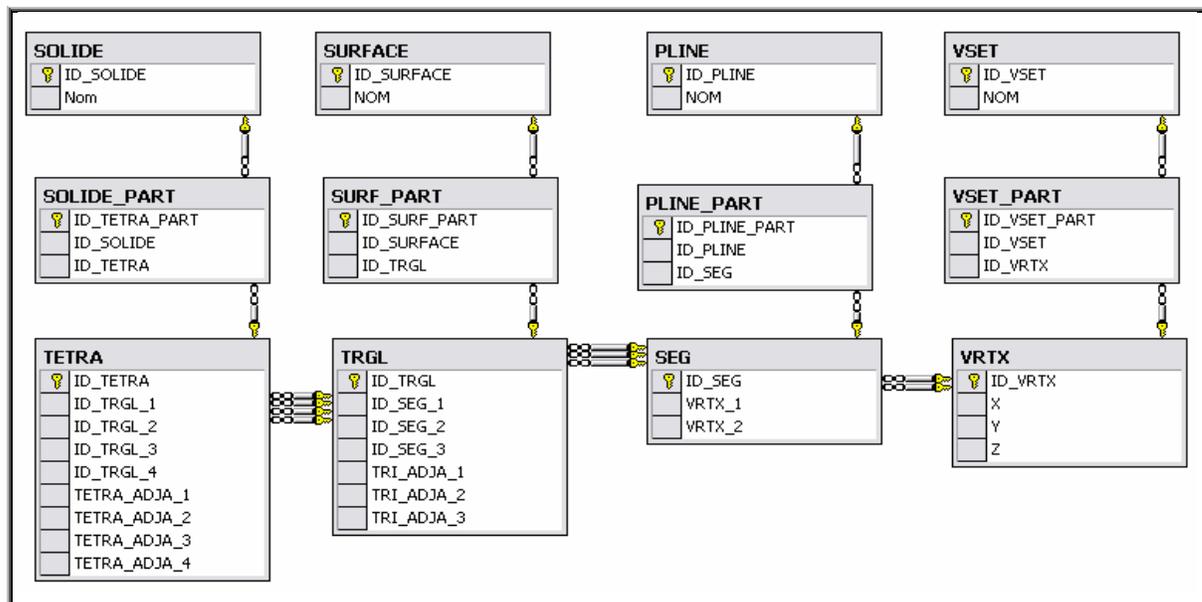


Figure 4-9 – Modèle d’implantation de données de la structure proposée implémenté dans SQL Server. Par la suite, l’inscription de nouvelles données à l’intérieur du SGBD peut avoir lieu. Puisque toutes ces données sont déjà à l’intérieur de l’application sous forme de variables, un simple transfert est nécessaire pour les intégrer à la base de données.

Cette étape complète la première fonction qui consistait à faire la transformation des données provenant de Gocad. Après l’exécution de cette fonction, toutes les données sont enregistrées dans le SGBD et prêtes à être analysées.

4.2.2. Algorithme de la Fonction 2 : Analyse des données

L’interrogation de la base de données est la dernière étape et la plus intéressante. Elle consiste à effectuer des requêtes sur les données à partir de la structure nouvellement implantée. Ainsi, il sera possible de déterminer des relations topologiques entre les différents objets. La programmation de cette fonction a nécessité trois étapes distinctes de développement : la construction de l’interface, la programmation des opérateurs d’analyse topologique et la conversion des résultats en fichier ASCII. Les paragraphes suivants décriront chacune de ces étapes.

Le **développement de l'interface** a pour but de permettre l'interrogation de la base de données. Le but visé était de permettre à l'utilisateur d'interagir avec les données. Cette interface est présentée à la figure 4-10

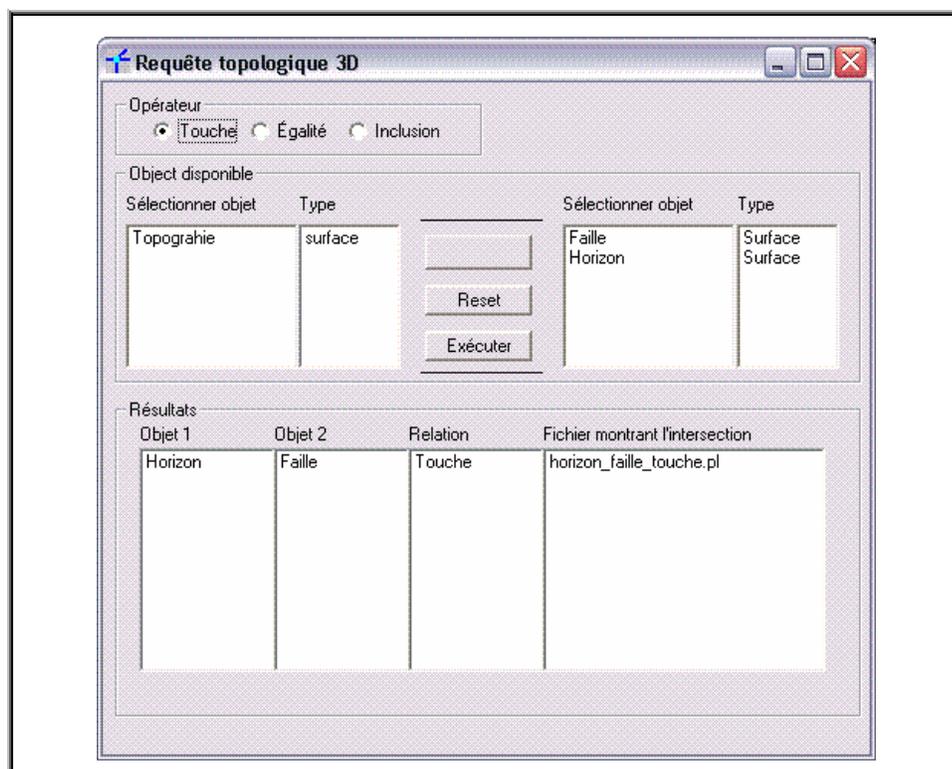


Figure 4-10 - Interface d'interrogation des données géométriques du SGBD telles que structurées pour respecter l'analyse topologique 3D.

L'interface est divisée en trois parties : les opérateurs, les objets disponibles et les résultats. La première partie présente l'ensemble des opérateurs topologiques disponibles à l'utilisateur lors des analyses. À la deuxième section, il est possible de choisir les objets sur lesquels les relations topologiques seront identifiées. Le nom et le type (point, ligne, surface ou solide) de chaque objet sont organisés en liste. Finalement, la dernière partie donne le résultat de la requête. Le type de relation et le nom du fichier qui contient le résultat de la requête sont inscrits pour toutes les combinaisons d'objets.

La deuxième étape consiste à **programmer des opérateurs d'analyse topologique**. Pour réaliser cette étape, il faut interroger la base de données pour recueillir l'information pertinente à la réalisation d'une requête. Chaque opérateur est un cas particulier et doit être programmé séparément. À titre d'exemple et dans le but de réduire la redondance dans le

texte, un aperçu de l'opérateur *contient* sera présenté. Cet opérateur a été choisi pour faire un parallèle avec l'évaluation de la performance au chapitre 2. Ainsi, il sera possible de survoler les étapes nécessaires pour la réalisation de la requête sur la Formation de Turner Valley.

L'opérateur *contient* peut avoir six combinaisons différentes d'objets : point/surface, point/solide, ligne/surface, ligne/solide, surface/solide et solide/solide. La programmation de l'algorithme devra tenir compte de chacun de ces cas. Ainsi, la première tâche est de catégoriser le type d'objets qui doit être analysé et d'utiliser la bonne fonction. Pour concorder avec l'exemple de Turner Valley, l'exemple de la relation *contient* sera présenté dans le cas particulier où une surface (fracture) et un solide (Formation de Turner Valley) doivent être analysés. Les étapes à suivre pour identifier cette relation sont illustrées à la figure 4-11.

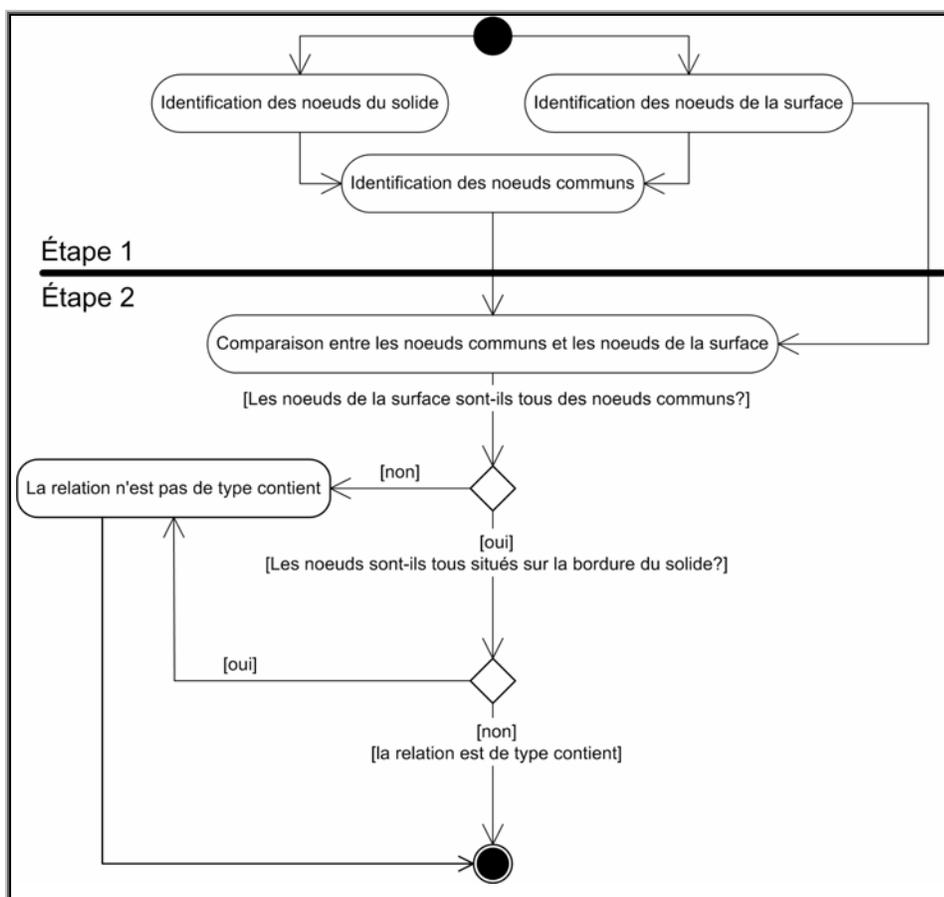


Figure 4-11 - Étapes suivies pour identifier la relation *contient* entre un solide et une surface à partir de la structure de données proposée.

La première étape consiste à identifier les nœuds communs aux deux objets. Tout d'abord, il faut identifier les nœuds qui sont utilisés pour construire le solide et la surface. Ensuite, il suffit de comparer les identifiants uniques des nœuds appartenant à la surface et au solide pour connaître ceux qui sont utilisés par les deux objets. La figure 4-12 montre graphiquement les opérations effectuées à la première étape.

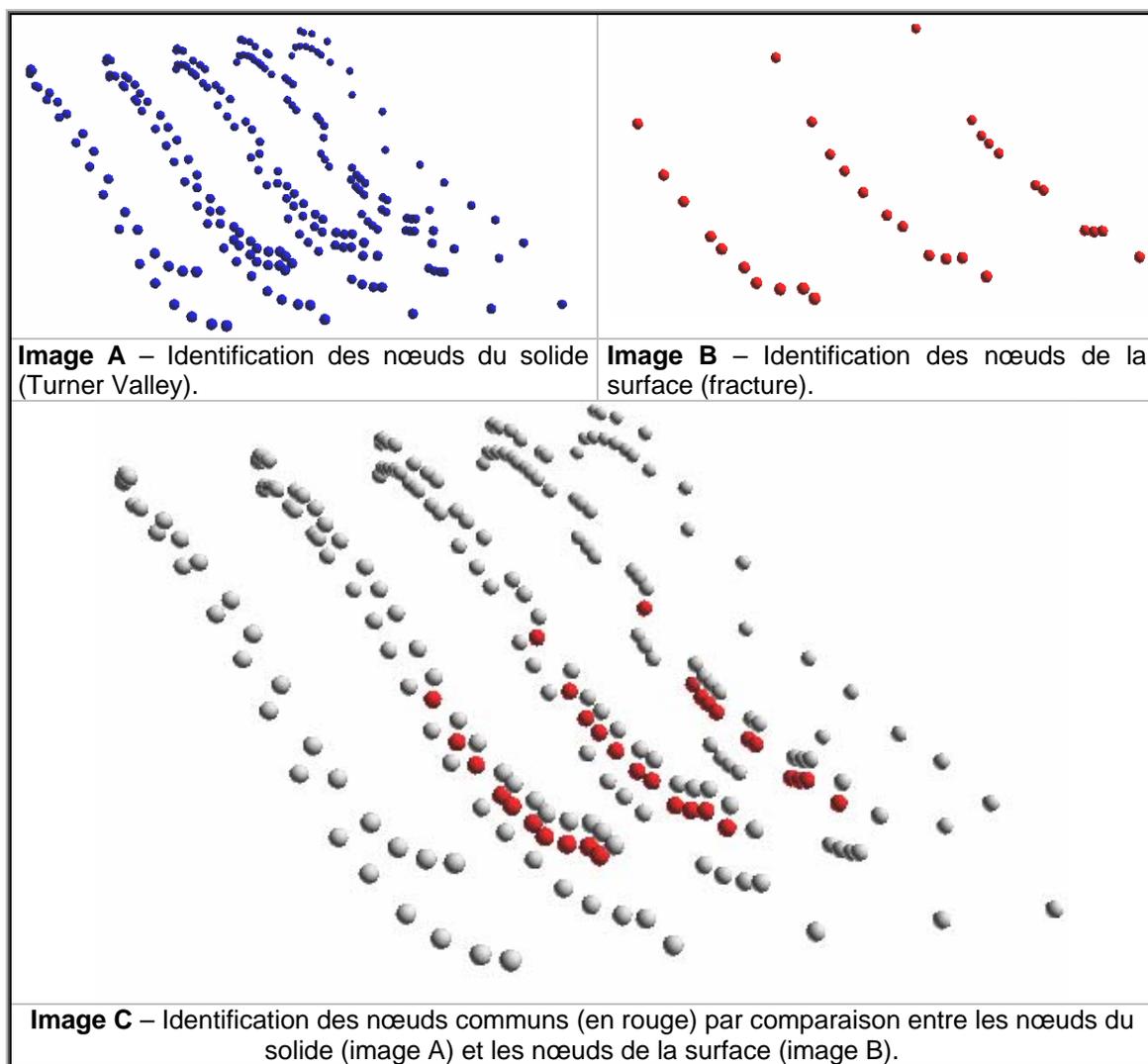


Figure 4-12 - Identification des nœuds communs à un solide et à une surface.

La figure précédente montre le résultat des étapes pour identifier les nœuds communs aux deux objets. Premièrement, il faut identifier les nœuds qui composent le solide (image A) et la surface (image B). La comparaison des deux résultats permet de connaître les nœuds qui sont communs aux deux objets (image C). Il est à noter que l'absence de nœuds communs indique que les deux objets sont disjoints.

La deuxième étape consiste à définir la configuration particulière des deux objets puisque le type de relation est déterminé par les endroits où se situent les nœuds communs. La relation *contient* possède très peu de configurations possibles. Pour déterminer si cette relation est présente entre un solide et une surface, il faut effectuer deux vérifications. Premièrement, tous les nœuds qui composent la surface doivent également appartenir au solide. Si ce n'est pas le cas, il est impossible que la relation entre la surface et le solide soit de type *contient*. Cette opération se fait rapidement puisque les nœuds des deux objets ont déjà été identifiés à l'étape 1.

La deuxième vérification permet de s'assurer que la surface n'est pas située uniquement sur l'extérieur du solide. Dans ce cas particulier, il ne s'agit pas d'une relation d'adjacence mais plutôt d'une relation de composition (figure 4-13)

Image A : Relation d'inclusion (*contient*) puisqu'au moins un triangle est à l'intérieur du solide.

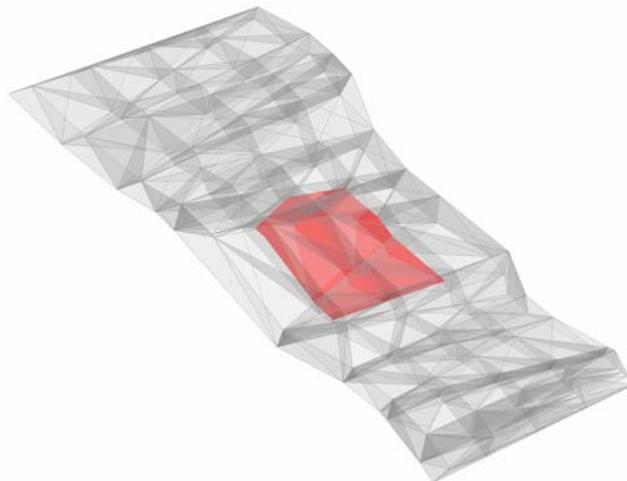


Image B : Relation de composition (*est composé de*) étant donné que tous les triangles de la surface sont en bordure du solide.



Figure 4-13 - Relations topologiques possibles dans les cas où les nœuds de la surface sont tous des composantes du solide.

Ces deux images montrent des surfaces (rouge et bleue) qui sont complètement intégrées au solide (gris) puisque tous les nœuds des surfaces sont également des composantes du solide. Cependant, l'image A montre une relation *contient* tandis que l'image B illustre une relation *est composé de* entre le solide et la surface. Cette différence est due au fait que tous

les points communs entre le solide et la surface de l'image B sont situés sur la frontière du solide. Pour identifier correctement cette relation il faut déterminer, à partir des données à l'intérieur du SGBD, si tous les noeuds communs sont uniquement sur la frontière du solide. Lorsqu'il est possible d'affirmer qu'au moins un nœud n'est pas sur la frontière du solide, la relation *contient* entre le solide et la surface est confirmée.

En résumé, la démarche pour arriver à déterminer la relation *contient* entre un solide et une surface se fait en deux étapes :

- 1) Identifier les nœuds communs aux deux objets.
- 2) Vérifier la configuration des objets :
 - a. Vérifier si tous les nœuds de la surface appartiennent également au solide
 - b. Vérifier si les nœuds communs aux deux objets ne sont pas tous en bordure du solide.

Après avoir identifié la relation *contient* entre la surface et le solide, il faut passer à la dernière étape de la fonction 2.

La deuxième fonction se termine par la création d'un fichier lisible par Gocad pour **afficher les résultats de la requête**. Les résultats des requêtes topologiques peuvent être représentés par des données graphiques. Par exemple, la relation *contient* entre un solide et une surface peut être représentée par l'objet qui est contenu (surface). La création du fichier de sortie est simple puisqu'il suffit d'identifier les primitives qui composent l'objet à représenter et les organiser dans un fichier ASCII pour qu'il soit lisible par Gocad. Il s'agit d'une opération peu complexe.

4.3. Discussion et conclusion du chapitre

L'absence totale d'opérateurs topologiques pour l'analyse des modèles géologiques a été identifiée au chapitre 2 comme étant une faiblesse importante du logiciel Gocad. L'extension développée dans ce projet permet de pallier à cette faiblesse. Ainsi, en plus des requêtes spatiales métriques incluses avec Gocad, le prototype permet une multitude de possibilités en matière d'analyses topologiques. Comme il a été possible de le voir, l'exemple de l'analyse de la Formation de Turner Valley a été réalisé. Ainsi, le prototype a

répondu à une requête topologique qui n'avait pas pu être réalisée par aucun des logiciels étudiés au chapitre 2. Il a été montré que l'utilisation de la structure topologique de données 3D proposée permet de répondre à des requêtes. C'est ainsi que l'opérateur *contient* entre une surface et un solide a été présenté à titre d'exemple. Cependant, les limites exactes de l'utilisation de la structure topologique n'ont pas pu être totalement vérifiées en raison du nombre restreint de tests effectués.

Conclusion

L'objectif principal de cette recherche était d'adapter une structure de données au contexte de l'analyse topologique de modèles géologiques 3D. Pour atteindre le but visé, trois objectifs spécifiques avaient été fixés :

- Mettre en évidence les forces et les limites des systèmes SIG et CAO pour la construction et l'analyse de modèle 3D.
- Examiner l'apport des outils d'analyse spatiale topologique pour la modélisation géologique.
- Formaliser l'utilisation d'un ou de plusieurs opérateurs topologiques 3D pour la modélisation géologique.

Pour atteindre ces objectifs, cinq étapes intermédiaires avaient été fixées :

- Inventorier et étudier les structures topologiques 2D et 3D.
- Inventorier et comparer les systèmes informatiques permettant la modélisation 3D.
- Construire ou adapter une structure permettant de réaliser l'analyse spatiale 3D spécifique au domaine de la géologie.
- Développer un prototype montrant la faisabilité de cette structure.
- Faire la preuve que le prototype est un atout pour faire l'analyse d'un modèle géologique 3D.

Afin de conclure sur ce travail, la façon dont chacune de ces étapes ont été réalisées sera examinée.

La première étape avait pour but de faire une revue exhaustive des différentes structures de données topologiques 2D et 3D. Avant de réaliser cette étude, il fallait réviser certaines connaissances concernant des sujets précis. Voici un résumé des notions qui ont été présentées.

Étant donné que les notions entourant le 3D n'étaient pas claires, quelques définitions ont été présentées (ESRI 2001; Bédard 2003; Bentley 2001). Finalement, il a été convenu que

la définition d'ESRI était la plus appropriée. Cette dernière dit que le 3D est défini par le nombre de dimensions de l'univers dans lequel les objets se trouvent. Ainsi, peu importe le nombre de dimension des objets, s'ils sont dans un univers 3D, c'est du 3D. Par la suite, les techniques de représentation 3D ont été présentées. Trois grandes familles de modèles de représentation 3D ont été distinguées : par balayage, par frontières et par volume. Finalement, une étude exhaustive des techniques utilisées pour déterminer les relations topologiques entre objets a été réalisée. Trois différents modèles ont été présentés : les quatre intersections, les neuf intersections et le Dimension Extend Method.

Ces notions étant bien claires, l'étude des structures de données géométriques pouvait commencer. Pour débiter cette recherche, certaines structures non topologiques de données 2D et 3D ont été présentées : la structure spaghetti, le modèle par dictionnaire de points, la représentation par chaînes/points et la structure de données du logiciel Gocad. Par la suite, les structures topologiques ont été analysées. Ainsi, deux structures topologiques 2D (DIME et POLYVRT) et trois structures topologiques 3D (TEN, SSM et 3D FDS) ont été présentées. Avec cette recherche, il a été possible de voir l'évolution des méthodes de stockage des données à référence spatiale. Cette revue a montré que huit structures topologiques de données 3D théoriques avaient déjà été proposées, ce qui est surprenant puisqu'aucun système commercial n'utilise ce genre de structure.

La deuxième étape visait à inventorier les systèmes informatiques permettant la modélisation 3D. Trois logiciels ayant des origines différentes ont été choisis pour être testés, soit un SIG, un CAO et un logiciel de modélisation géologique. La comparaison visait trois principales fonctions : l'acquisition de données, la capacité de construction d'objets 3D et l'analyse spatiale. Nos résultats ont montré que les SIG sont peu performants pour la construction d'objets 3D et l'importation de données à caractère géologique. Ils possèdent de bonnes capacités d'analyse spatiale dans un environnement 2D mais sont moins performants en 3D. Nos analyses ont également montré que les CAO possèdent peu de fonctions d'analyse spatiale et des capacités limitées d'importation de données. Cependant, ils sont performants pour la construction d'objets irréguliers (comme les objets géologiques) en 3D. Une dernière catégorie de logiciel a été analysé : les logiciels de modélisation géologique. Évidemment, ces derniers possèdent de nombreuses qualités

nécessaires à la construction d'un modèle géologique; ils permettent l'importation de données provenant d'une multitude de sources, ils rendent possible un grand nombre d'analyses métriques et, la plus importante, ils possèdent beaucoup d'outils qui facilitent la création d'objets géologiques 3D. Ainsi, il a été démontré qu'un logiciel spécialement construit pour la modélisation géologique comme Gocad, surpasse grandement les capacités des SIG (ArcGIS) et des CAO (AutoCAD). Cet inventaire a également permis de démontrer l'absence d'outils qui rendent possible l'interrogation d'un modèle sur l'aspect topologique. Tous les logiciels testés n'ont pas été en mesure de réaliser une requête 3D à caractère topologique sur un modèle géologique.

L'hypothèse de départ de cette recherche était que le développement d'une structure de stockage, permettant d'explicitier les relations spatiales entre les différents objets géologiques, rendrait l'analyse d'un modèle plus efficace. Ainsi, la troisième étape visait à créer une structure de stockage de données permettant la réalisation des requêtes topologiques. Pour ce faire, une structure de référence a été utilisée. Cette dernière a été choisie en fonction de deux caractéristiques particulières : la rapidité d'analyse et l'aptitude de ses primitives pour la modélisation géologique. Les modèles TEN, le SSM et le 3D FDS ont été comparés dans le but de trouver la structure la plus apte à servir de référence. La démonstration a été faite que le TEN proposé par Pilouk (1996) était la meilleure solution. De plus, le TEN facilite la transformation des données de Gocad puisque les deux utilisent les mêmes primitives géométriques.

Ainsi, une nouvelle structure a été proposée à partir du modèle TEN. La nouvelle structure est basée sur l'utilisation de quatre primitives géométriques (vertex, segment, triangle et tétraèdre) et quatre objets géométriques (point, ligne, surface et tétraèdre). Un nouvel objet a été ajouté à cette structure : les parties. Ces dernières permettent à un même objet d'avoir plusieurs sections dispersées n'importe où sur le territoire. Ce genre d'objet est intéressant dans un contexte géologique puisqu'il arrive qu'une même unité soit divisée en plusieurs parties et déplacée par une fracture. Contrairement au TEN, cette structure n'oblige pas la subdivision complète du territoire en primitives géométriques, ce qui permet de réduire la quantité de données contenues dans la structure. Il faut également noter qu'une règle a été ajoutée pour augmenter la rapidité d'analyse du modèle. La nouvelle règle indique la

présence de champs dans les tables *tétraèdre* et *triangle* qui doivent contenir de l'information concernant les voisins immédiats. Cette règle a une influence directe sur la rapidité d'analyse de la structure. Par contre, la structure proposée respecte la majorité des autres règles du TEN.

La création d'un prototype, permettant la réalisation d'analyses topologiques dans un modèle géologique via la structure proposée, a permis de réaliser la quatrième étape. La première étape du développement du prototype a été l'établissement d'une stratégie d'implantation. Pour réaliser ce prototype, trois technologies ont été utilisées, soit un outil de modélisation (Gocad), un langage de développement (Visual Basic) et un système de gestion de base de données (SQL Server). Avec ce développement, il a été montré que le prototype est un atout pour l'analyse d'un modèle géologique, ce qui a permis de réaliser la cinquième étape. L'évaluation de la performance des logiciels a démontré qu'il est impossible de réaliser des requêtes topologiques dans un modèle géologique. Le prototype développé dans ce travail a été en mesure de réaliser ce genre de requêtes. Ainsi, il est possible d'affirmer que l'ajout de la topologie permet d'augmenter les capacités d'analyse spatiale d'un modèle géologique.

Discussion sur la recherche

Cette recherche a montré toutes les étapes nécessaires pour l'établissement d'une structure topologique de données 3D complètement adaptée pour la modélisation géologique. Cette tâche a été effectuée dans le but de répondre à l'hypothèse de départ qui disait qu'une structure topologique de données permettrait de mieux analyser un modèle géologique. Le travail qui a été présenté ici montre bel et bien que la structure proposée augmente les capacités d'analyse d'un modèle géologique. Cependant, est-ce la meilleure façon de procéder?

Imaginons que le prototype développé soit réellement utilisé par un géologue pour analyser un modèle. Pour modéliser les objets géologiques, la structure de données de Gocad est utilisée et pour faire l'analyse topologique, les données doivent être transformées pour être intégrées à la nouvelle structure. Cette façon de procéder possède deux avantages : permettre d'afficher rapidement les données à partir de Gocad et répondre rapidement aux

requêtes topologiques. Cependant, les données doivent être dupliquées, ce qui représente une solution peu optimale. Ainsi, les modèles géologiques qui possèdent une grande quantité d'objets peuvent devenir très volumineux à traiter et à manipuler. Il serait possible d'imaginer d'autres solutions afin de contrer ce problème.

La première solution serait d'utiliser uniquement la structure topologique pour enregistrer le modèle. La duplication des données n'est alors plus nécessaire et les requêtes topologiques peuvent se faire rapidement. Cependant, l'affichage des données à l'écran deviendrait beaucoup moins performant. À partir de Gocad, il est facile et rapide de créer et d'afficher des données puisqu'elles ne sont pas stockées dans une structure très complexe. Par contre, avec une structure topologique, il est beaucoup plus difficile de retrouver tous les constituants d'un objet et de les afficher dans un court laps de temps. Ainsi, il serait plus difficile d'effectuer un affichage efficace avec un logiciel qui utilise uniquement une structure topologique de données.

Une autre solution aurait été de ne pas utiliser de structure topologique. Pour arriver à des résultats sans structure topologique, il faut utiliser une multitude de calculs mathématiques. Cette solution a l'avantage de ne pas hypothéquer la rapidité de visualisation du logiciel. Cependant, la réponse aux requêtes est beaucoup plus longue puisque les calculs doivent se faire en temps réel.

Suite à nos travaux et au contexte de cette recherche (besoins liés au projet GEOIDE RES#LON), nous croyons que la meilleure solution est celle qui a été développée dans ce mémoire. Cette solution permet d'effectuer rapidement autant l'affichage des données que l'analyse du modèle. L'utilisation de la structure topologique seule ne permet pas un affichage efficace. De plus, l'utilisation de la structure non topologique seule ne permet pas la réalisation de requêtes dans un temps jugé acceptable. Ainsi, l'utilisation des deux types de structures semble être la meilleure solution.

Travaux futurs

Ce mémoire a permis de voir l'apport de la géomatique au domaine de la géologie mais il serait possible d'aller encore plus loin. La modélisation géologique 3D fait face à une

problématique d'intégration de données très importante. Un nombre impressionnant de données provenant d'une multitude de sources sont disponibles pour construire les objets géologiques. Cependant, pour transposer ces données à l'intérieur d'un modèle, beaucoup d'efforts doivent être déployés. Il faudrait rendre plus facile la transformation des données brutes vers l'intégration complète au modèle géologique.

Pour la modélisation géologique, il est certain que la représentation de la troisième dimension est la voie à suivre. À partir d'un modèle 3D, les géologues sont en mesure de mieux comprendre la complexité des objets. Par contre, certains aspects doivent être améliorés pour exploiter tout le potentiel des modèles 3D. Premièrement, il faut rendre plus facile la navigation dans le modèle. Des outils doivent être développés pour permettre à l'utilisateur une exploration intuitive des données. Il serait intéressant d'appliquer les concepts d'exploration de données des systèmes OLAP à la visualisation des modèles géologiques 3D. Le deuxième aspect concerne le sujet principal de ce mémoire qui était l'amélioration des capacités d'analyse. La discussion sur la recherche a permis de constater qu'il n'y a pas une seule et unique solution pour effectuer de l'analyse topologique d'un modèle 3D. Il serait intéressant de procéder à des expérimentations plus exhaustives pour mesurer l'ampleur des contraintes introduites par l'utilisation d'autres solutions. Par exemple, des requêtes topologiques pourraient être développées à partir d'une structure non topologique (par calculs mathématiques). Ainsi, une comparaison entre cette façon de procéder et la solution qui a été développée dans ce mémoire pourrait être établie.

L'application d'une structure topologique à d'autres domaines pourrait être une avenue à explorer. Par exemple, l'archéologie est un domaine qui fait également la représentation d'objets qui sont sous la surface de la Terre. Les relations de voisinage de ces objets sont aussi très importantes. Ainsi, l'application d'une structure topologique à ces données permettrait à l'archéologue de mieux analyser les relations entre les objets de son modèle.

Bibliographie

- Apel, M. (2001) Development of a 3D GIS based on the 3D modeller gOcad, IMAG Meetin, Cancun.
- Bak, P.R. et Mill, A.J. (1989) Three dimensional representation in a geoscientific resources management system for the minerals industry, *dans*: Three dimensional applications in geographical information systems, London, Taylor & Francis, p. 155-182.
- Bédard, Y. et Larrivée, S. (2003) Opérateur spatiaux dans les systèmes de gestions de base de données, Note de cours: GMT 20843, Département des sciences géomatiques, Université Laval, Ste-Foy.
- Bédard, Y., Pouliot, J., Larrivée, S., Normand, P., et Frenette, P. (2001) Optimisation de la modélisation et du traitement graphique des données 3D urbaines, Rapport de recherche, Centre de recherche en géomatique, Université Laval, Ste-Foy.
- Bentley (2002) Documentation de MicroStation SE, Documentation en ligne.
- Bernhardsen, T. (2002) Geographic information system, an introduction, New York, Wiley, p. 428.
- Breunig, M., Bode, T., et Cremers, A.B. (1994) Implementation of elementary geometric database operation for 3D GIS, International Symposium on Spatial Data Handling, Edinburgh, Scotland, p. 604-617.
- Brisebois, A., Pouliot, J., Lachance, B., et Rabeau, O. (2003) Three-dimensional spatial analysis : myth or reality, Conférence annuelle du réseau GEOIDE, Victoria, Canada.
- Brown, I.M. et Herber, M.J. (1996) Knowledge-based geological visualisation using AVS, Electronic Geology.
- Chrisman, N. (1974) Impact of Data Structure on Geographic Infromation Processing, Conférence AUTO-CARTO, p. 165-177.
- Clementini, E. et DiFelice, P. (1994) A Comparison of Methods for Representing Topological Relationships, Raport de recherche, University of L'Aquila, L'Aquila, Italie.
- Clementini, E., DiFelice, P., et OOsterom, P.V. (1993) A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction, International symposium on large spatial databases, Singapore, p. 277-295.
- Cooke, D.F. et Maxfield, W.H. (1967) The development of a geographic base file and its uses for mapping, Conference Urban & Regional Information Systems Association (URISA), p. 207-218.

- Coors, V. (2001) 3D-GIS in Networking Environments, Computer, Environments and Urban Systems, Vol. 24, No.2, p. 345-357.
- Cromley, R.G. (1992) Digital Cartography, University of Connecticut, p. 317.
- De Cambray, B. et Yeh, T.-S. (1994) A multidimensional (2D, 2.5D, and 3D) geographical data model, International Conference on Management of Data (COMAD'94), Bangalore, Inde, p. 317-336.
- De Kemp, E.A. (2000) 3D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi Greenstone belt, Computer & Geosciences, Vol. 26, No.5, p. 509-530.
- De Kemp, E. A. et Sprague, K. B. (2001) New interpretive tools for three-dimensional structural geological modeling : Bézier-based curves, rivons and skeletons, Rapport de recherche, Geological Survey of Canada, Ottawa.
- De La Losa, A. (2000) Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques, Thèse de Doctorat, Université Marne-La-Vallée, p. 175.
- Develin, k. (1994) Mathematics: The sciences of patterns, New York, Scientific American Library, p. 215.
- Egenhofer, M.J. (1989) A formal definition of binary topological relationships, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 367, p. 457-472.
- Egenhofer, M. J. et Herring, M. J. (1990) Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic databases, Rapport de recherche, Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, Maine.
- Foley, J.D., VanDam, A., Feiner, S., et Hughes, J. (1990) Computer Graphics: Principles and practice, Pearson Addison Wesley, p. 1200.
- Fritsh, D. (1990) Towards three-dimensional data structures in geographic information systems, Conférence EGIS'90, p. 333-345.
- Gardan, Y. et Lucas, M. (1984) Techniques graphiques interactives et CAO, Hermès, p. 238.
- Gocad (2004) Documentation en ligne de Gocad, Site web de Gocad (www.ensg.inpl-nancy.fr/GOCAD).
- Heywood, I., Cornelius, S., et Craver, S. (1998) An introduction to geographical information systems, England, Longman, p. 279.
- Jones, C.B. (1989) Data structure for Three-dimensional spatial information systems in geology, International Journal of Geographical Information Systmes, Vol. 3, No.1, p. 15-31.

- Kennedy, H. (2001) The ESRI Press dictionary of GIS terminology, Redlands, California, ESRI Press, p. 200.
- Kirkwood, D. (2002) Note de cours : GLG-10358 Géologie pratique, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, Canada.
- Korte, G.B. (1997) The GIS book, understanding the value and implementation of geographic information systems, Onword Press, p. 414.
- Lachance, B., Pouliot, J., et Kirkwood, D. (2005) 3D Topological analysis of geological models., Geomatica (En cours d'édition).
- Lebel, D., Rivard, B., Kirkwood, D., Tao, C.V., Stockmal, G.S., Toutin, T., Richard, B., et Malo, M. (2000) Geomatics for 3D geology exploration: Introduction to the Moose Mountain GEOIDE project, Conférence Géomatique 2000, Montréal.
- Lebel, D., Vuitton, R., Deblonde, C., M.A.Vallée, Kirkwood, D., C.V.Tao, Roza, R.D., Marcil, J.S., et Malo, M. (2001) Comparison of high resolution digital photogrammetry methods for 3D geological mapping, Moose Mountain gas field, Alberta, GEOMATICA, Vol. 55, No.4, p. 523-528.
- Long, B., Perret, D., Kirkwood, D., Pouliot, J., et Tao, C. V. (2001) Tailored geomatics by corridor geohazards and georesources, Proposé de recherche GEOIDE.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., et Rhind, D.W. (2001) Geographical information systems and science, Canada, John Wiley & Sons, p. 472.
- Mallet, J.-L. (2002) Geomodeling, Oxford, p. 624.
- Mantyla, M. (1988) An introduction to Solid Modeling, Computer Sciences press, p. 144.
- Massé, L. (2003) Développement méthodologique pour la modélisation géologique avec exemple pour la région de Moose Mountain, AB., Mémoire de Maîtrise, Université Laval, p. 71.
- Molenaar, M. (1990) A formal data structure for 3D vector maps, Conférence EGIS'90, Amsterdam, The Netherlands, p. 780-781.
- OQLF, 2004, Le grand dictionnaire terminologique, Office Québécois de la langue française.
- Peroche, B., Argence, J., Chazanfarpour, D., et Michelucci, D. (1988) La synthèse des images, Hermès.
- Peucker, T.K. et Chrisman, N. (1975) Cartographic Data Structures, The American Cartographer, Vol. 2, No.1, p. 55-69.
- Pfund, M. (2001) Topologic data structure for a 3D GIS, Conférence ISPRS, Bangkok, Thailand, p. 233-237.

- Pigot, S. (1995) A topological model for 3-dimensional Spatial Information System, Thèse de doctorat, University of Tasmania.
- Pilouk, M. (1996) Integrated modelling for 3D GIS, Thèse de doctorat, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), p. 200.
- Pullar, D. et Egenhofer, M.J. (1988) Towards formal definition of topological relations among spatial objects, Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Australia, p. 225-242.
- Ramos, F. (2003) Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel, Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, p. 175.
- Raper, J.F. et Belk, B. (1991) Three-dimensional GIS, *dans*: Geographical Information Systems: Principles and application, London, Longman Scientific Publications, p. 299-317.
- Rivest, S. (2000) Investigation des modes d'intégration physique entre un serveur de base de données multidimensionnelle et un SIG, Essai de Maîtrise, Université Laval, p. 59.
- Scott, K. (2001) UML Explained, Addison-Wesley, p. 151.
- Shi, W., Yang, B., et Li, Q. (2003) An object-oriented data model for complex objects in three-dimensional geographic information systems, International Journal of Geographical Information Systmes, Vol. 17, No.5, p. 411-430.
- Sutherland, I.E. (1965) The Ultimate Display, Conférence IFIP, p. 506-508.
- Wozencraft, J.M. (2002) Complete costal mapping with airborne lidar, Oceans conference record (IEEE), p. 1194-1198.
- Zlatanova, S. (2000) 3D GIS for Urban Development, Thèse de doctorat, Graz University of Technology, p. 222.
- Zlatanova, S., Rahman, A.A., et Pilouk, M. (2001) 3D GIS: current status and perspectives, Joint conference on Geo-spatial theory, processing and application, Ottawa, Canada, p. 6.